

Automatisierte Wassermengenanalyse in der Trinkwasserversorgung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Axel Knobloch
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2014

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. em. Raimund Herz, M.S. (Technische Universität Dresden)

Karlsruhe 2014

Kurzfassung

Wasserverluste treten in jedem leitungsgebundenen System zur Trinkwasserversorgung auf, ihre Höhe ist ein Indikator für den Zustand des Rohrnetzes. Im Rahmen der Instandhaltung ist daher die Dichtheit von Wasserversorgungsnetzen regelmäßig zu prüfen und Höhe, Verteilung und Entwicklung der Wasserverluste zu ermitteln. Zu diesem Zweck sind sowohl gemessene als auch ungemessene Einspeise- und Abgabemengen möglichst genau zu ermitteln, um eine Wasserbilanz zu erstellen und daraus aussagekräftige Kennzahlen abzuleiten. In der Praxis werden jedoch Wasserabgaben, die nicht mit Messgeräten erfasst werden, wie z.B. zur Leitungsspülung oder Brandbekämpfung, in der Regel nicht oder nur anhand von Pauschalwerten berücksichtigt.

Große Wasserversorgungssysteme sind häufig in mehrere Zonen gegliedert, die entweder der kontinuierlichen Überwachung, der Trennung von Wässern unterschiedlicher Herkunft oder der Gewährleistung des Versorgungsdrucks dienen. Da sich die Wasserverluste nicht homogen über das gesamte Wasserversorgungssystem verteilen, sollte eine separate Wasserbilanz für jede einzelne Zone erstellt werden. Stattdessen wird von vielen Wasserversorgungsunternehmen einmal jährlich eine übergeordnete Wasserbilanz für das Gesamtsystem erstellt. Die Ursache ist im hohen Arbeitsaufwand zu sehen, den die manuelle Erfassung von Daten aus vielen unterschiedlichen Quellen und deren Zuordnung zu den jeweiligen Zonen nach sich zieht. Solche Gesamt-Wasserbilanzen sind nicht geeignet, die Höhe und Verteilung der Wasserverluste in einem komplexen Wasserversorgungssystem zu ermitteln und optimale Gegenmaßnahmen auszuwählen und zu priorisieren.

Um die Maßnahmen zur Reduzierung von Wasserverlusten zu optimieren, bedarf es Werkzeuge, die die Entscheidungsträger in Wasserversorgungsunternehmen dabei unterstützen, vollständige Wasserbilanzen für separate Zonen zu erstellen, Problemzonen zu identifizieren und die jeweiligen Ursachen und Auswirkungen der Wasserverluste zu untersuchen und zu bewerten. Gleichzeitig soll der Bearbeitungsaufwand reduziert werden. Dies erfordert eine weitgehende Automatisierung dieses Prozesses, der sich unter dem Begriff Wassermengenanalyse zusammenfassen lässt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiges Verfahren zur automatisierten Wassermengenanalyse konzipiert und in Form eines Software-Werkzeugs umgesetzt. Das neu entwickelte Werkzeug ist über eine Austauschdatenbank in ein Geografisches Informationssystem (GIS) eingebettet, welches die für die Wassermengenanalyse erforderlichen Eingangsdaten aus verschiedenen, an das GIS angebotenen IT-Systemen eines Wasserversorgungsunternehmens erfasst und aufbereitet. Anhand von Messwerten der Einspeisemengen und Ablesedaten der Kundenwasserzähler werden zonenweise Wasserbilanzen berechnet. Ungemessene Wasserbilanzkomponenten werden anhand neu entwickelter Verfahren zur Analyse der Einspeiseganglinie einer Zone näherungsweise bestimmt. Der automatisierte Abgleich der Entwicklung des Nachtmindestverbrauchs einer Zone mit dem Datum von Schadensreparaturen liefert Erkenntnisse über Leckraten und -laufzeiten. Mit der gleichen Methodik werden Spülmengen und Löschwasserentnahmen ermittelt. Auf diese Weise werden erstmals Top-down Verfahren und Bottom-up Verfahren für die Quantifizierung von Verlusten kombiniert und für die Erstellung von Wasserbilanzen genutzt. Auf Basis der Berechnungsergebnisse

werden Kennzahlen zur Bewertung der Wasserverlustsituation und möglicher Ursachen automatisiert berechnet.

Um die Eigenschaften und die Praxistauglichkeit des entwickelten Werkzeugs unter realen Bedingungen zu erproben, wurde es im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts *AWaRe* (Förderkennzeichen: 02WQ1256C) an vier ausgewählten Pilotgebieten im Wasserversorgungssystem der Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG (SWP) getestet. Die Berechnungsergebnisse zeigen signifikante Unterschiede in der Höhe der Wasserverluste der einzelnen Zonen und belegen die Notwendigkeit der zonenweisen Erstellung von Wasserbilanzen. Die Untersuchungen ergaben außerdem, dass ungemessene Abgaben durch die Analyse der Einspeiseganglinie in vielen Fällen hinreichend genau ermittelt werden können. Es konnte nachgewiesen werden, dass ungemessene Wassereinnahmen im Rahmen von Leitungsarbeiten und zur Brandbekämpfung die Aussagekraft der Wasserbilanz nicht wesentlich beeinflussen. Das entwickelte Verfahren ermöglicht weiterhin die näherungsweise Quantifizierung der Wasserverluste, die an bereits behobenen Schäden entstanden sind. Somit lässt sich die Höhe der in einer Zone verbleibenden Wasserverluste aus unbekanntem Leckagen präziser bestimmen. Die Untersuchungen zeigten auch, dass das Werkzeug auf vollständige und verlässliche Eingangsdaten angewiesen ist. Fehlerhafte Eingangsdaten können bei der automatisierten Wassermengenanalyse nicht in allen Fällen identifiziert werden und verfälschen die ermittelten Ergebnisse. Unter der Voraussetzung eines sehr guten Datenbestandes ist die Übertragbarkeit des Werkzeuges auf andere Wasserversorgungsunternehmen gegeben.

Abstract

Water losses occur in any pipeline-based drinking water supply system. Their volume is an indicator of the overall condition of the pipe network. Maintenance therefore also includes the regular inspection of the integrity of water supply networks and the determination of the volume, distribution, and development of water losses. For this purpose, both metered and unmetered input volumes and consumption volumes have to be determined as precisely as possible in order to set up a water balance and derive suitable performance indicators. In practice, however, volumes that are not metered by measuring instruments, such as water for flushing the mains or for fighting fires, are not considered at all or allowances are used only.

Large water supply systems are usually divided into several zones for continuous monitoring, separation of waters of various origins or ensuring supply pressure. As water losses are not distributed homogeneously over the complete water supply system, a separate water balance should be set up for every individual zone. Instead, many water utilities compile an overall water balance for the complete system once per year. This balance is not suited for determining the volume and distribution of water losses in a complex water supply system and for selecting and prioritizing optimum countermeasures. The reason is the high expenditure associated with the manual acquisition of data from many different sources and their allocation to the respective zones.

To optimize work for reducing water losses, tools are needed to support decision-makers at water utilities in compiling overall water balances for separate zones, identifying problem zones, and analyzing and assessing causes and effects of the water losses. At the same time, the work expenditure shall be reduced. This requires large automation of this process, which may be summarized by the term water loss analysis.

Subject of this dissertation is the development of a novel method for automated water loss analysis. This method was implemented in the form of a software tool. The newly developed tool is embedded in a geographical information system (GIS) via an exchange database. It acquires the input data required for water loss analysis from the various IT systems of a water utility that are connected to the GIS. Based on the metered system input volumes and consumption recorded by the customers meters, water balances are calculated for every zone. Unmetered water balance components are approximated using newly developed methods to analyze the system input hydrograph of a zone. Automatic comparison of the minimum night flow of a zone with the date of repairs provides findings about leak rates and leak run times. With the same method, flushing volumes and water consumption for firefighting are determined. In this way, top-down and bottom-up methods are combined for the first time to quantify water losses and to set up water balances. Based on the calculation results, performance indicators can be computed automatically to assess water losses and possible causes.

To test the properties and practical suitability of the tool developed under real conditions, it was applied within the framework of the *AWaRe* joint project (grant No. 02WQ1256C) funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in four selected pilot areas of the water supply system of Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG (SWP). The calculation results revealed significantly different water loss volumes in the individual zones

and showed that water balances have to be set up in a zone-wise manner. Moreover, the study revealed that unmetered water abstraction can be determined with sufficient accuracy by analyzing the system input hydrograph. It was found that the unmetered water consumption for pipe repair works and firefighting does not significantly affect the quality of the water balance. The method developed also allows for the approximative quantification of water losses at already repaired pipe failures. In this way, the volume of water losses in a zone due to unknown leaks can be determined more precisely. Moreover, the studies showed that the tool is dependent on complete and reliable input data. Incorrect input data cannot always be identified in automated water loss analysis and may distort the results. The tool may be transferred to other water utilities. However, detailed analyses require a comprehensive database.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation | 1 |
| 1.2 | Zielsetzung | 3 |
| 1.3 | Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2 | Wasserversorgungssysteme | 7 |
| 2.1 | Kapitelüberblick | 7 |
| 2.2 | Aufgaben und Anlagenteile | 7 |
| 2.2.1 | Die Wasserversorgung in Deutschland | 7 |
| 2.2.2 | Anlagenteile | 8 |
| 2.2.3 | Vertikale Ebenen | 14 |
| 2.3 | Strukturen realer Wasserversorgungssysteme | 16 |
| 2.3.1 | Allgemeines | 16 |
| 2.3.2 | Rohwassersysteme | 16 |
| 2.3.3 | Transportsysteme | 16 |
| 2.3.4 | Verteilungssysteme | 17 |
| 2.3.5 | Einfluss der Struktur auf die Wassermengenanalyse | 17 |
| 2.4 | Kennzahlen zur Beschreibung von Wasserversorgungssystemen | 17 |
| 2.4.1 | Allgemeines | 17 |
| 2.4.2 | Beschreibung der hydraulischen Komponenten | 17 |
| 2.4.3 | Beschreibung der physikalischen Komponenten | 20 |
| 2.5 | Messgeräte in der Wasserversorgung | 24 |
| 2.5.1 | Allgemeines | 24 |
| 2.5.2 | Volumenmessung und Durchflussmessung | 24 |
| 2.5.3 | Druck- und Niveaumessung | 29 |
| 2.6 | Prozessleitsysteme | 31 |
| 2.6.1 | Aufgaben | 31 |
| 2.6.2 | Fernwirktechnik | 31 |
| 2.6.3 | Fernablesung von Durchflussmessgeräten | 32 |
| 2.7 | Betriebliche Aspekte | 33 |
| 3 | Wasserverluste | 35 |
| 3.1 | Kapitelüberblick | 35 |
| 3.2 | Terminologie | 35 |
| 3.2.1 | Entwicklung der Terminologie | 35 |
| 3.2.2 | Erweiterte Terminologie nach DVGW | 37 |
| 3.2.3 | Wasserverschwendung | 40 |
| 3.3 | Reale Wasserverluste | 41 |
| 3.3.1 | Zusammenhang zwischen Schäden und Wasserverlusten | 41 |
| 3.3.2 | Schadensstellen | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.3 | Schadensursachen | 44 |
| 3.3.4 | Schadensarten | 59 |
| 3.3.5 | Leckrate | 61 |
| 3.3.6 | Laufzeit | 62 |
| 3.3.7 | Wasserverlustmenge | 65 |
| 3.4 | Scheinbare Wasserverluste | 65 |
| 3.4.1 | Zählerabweichungen | 65 |
| 3.4.2 | Abgrenzungsverluste | 69 |
| 3.4.3 | Schleichverluste | 69 |
| 3.4.4 | Wasserdiebstahl und unzulässige Wasserentnahme | 70 |
| 3.4.5 | Datenhandhabungsfehler | 70 |
| 3.5 | Auswirkungen von Wasserverlusten | 71 |
| 3.5.1 | Allgemeines | 71 |
| 3.5.2 | Technische Auswirkungen | 71 |
| 3.5.3 | Ökonomische Auswirkungen | 72 |
| 3.5.4 | Ökologische Auswirkungen | 72 |
| 3.5.5 | Soziale Auswirkungen | 73 |
| 3.6 | Aktuelle Zahlen zu Wasserverlusten | 73 |
| 3.6.1 | Wasserverlustsituation in Deutschland | 73 |
| 3.6.2 | Wasserverlustsituation in der EU | 78 |
| 3.6.3 | Globale Wasserverlustsituation | 79 |
| 3.6.4 | Zusammenfassung der Zahlen und Bewertung des Reduktionspotenzials | 81 |
| 4 | Wassermengenanalyse | 83 |
| 4.1 | Kapitelüberblick | 83 |
| 4.2 | Bedeutung der Wassermengenanalyse für die Wasserverlustbekämpfung | 83 |
| 4.3 | Verfahren und Werkzeuge zur Ermittlung der Wasserverluste | 85 |
| 4.3.1 | Überblick | 85 |
| 4.3.2 | Deduktive Verfahren (oder Top-down Verfahren) | 86 |
| 4.3.3 | Induktive Verfahren (oder Bottom-up Verfahren) | 89 |
| 4.3.4 | Werkzeuge zur Wasserbilanzerstellung | 93 |
| 4.4 | An der Wassermengenanalyse beteiligte Organisationseinheiten | 97 |
| 4.4.1 | Überblick | 97 |
| 4.4.2 | Technische Abteilungen eines WVU | 97 |
| 4.4.3 | Kaufmännische Abteilungen eines WVU | 98 |
| 4.4.4 | Externe Daten | 99 |
| 4.5 | Kennzahlen zur Bewertung von Wasserverlusten | 99 |
| 4.5.1 | Kennzahlen in der Wasserversorgung | 99 |
| 4.5.2 | Finanzielle Kennzahlen | 100 |
| 4.5.3 | Betriebliche Kennzahlen zur Beschreibung der Wasserverluste | 103 |
| 4.5.4 | Ökologische Kennzahlen | 106 |
| 4.6 | Datengüte von Messwerten und Kennzahlen | 106 |
| 4.6.1 | Bewertung der Genauigkeit von erhobenen Werten | 106 |
| 4.6.2 | Festlegung des Vertrauensniveaus | 107 |
| 4.6.3 | Bewertung der Genauigkeit von berechneten Werten | 107 |
| 4.7 | Wassermengenanalyse als Werkzeug zur Strategieentwicklung | 108 |
| 4.7.1 | Überblick | 108 |
| 4.7.2 | Formulierung von Zielwerten | 109 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.7.3 | Identifikation von Gegenmaßnahmen | 112 |
| 4.8 | Defizite und Verbesserungspotenzial | 113 |
| 4.8.1 | Gängige Praxis der Wassermengenanalyse in Deutschland | 113 |
| 4.8.2 | Befragung von WVU in Baden-Württemberg | 113 |
| 4.8.3 | Fazit und Ableitung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs | 115 |
| 5 | Konzeption der automatisierten Wassermengenanalyse | 119 |
| 5.1 | Kapitelüberblick | 119 |
| 5.2 | Projekthintergrund | 119 |
| 5.3 | Das Werkzeug <i>AWaRe</i> | 120 |
| 5.4 | Schnittstellen und Eingangsdaten | 122 |
| 5.4.1 | Schnittstellen zur Softwareumgebung des WVU | 122 |
| 5.4.2 | Schnittstellen zu anderen Modulen von <i>AWaRe</i> | 123 |
| 5.4.3 | Topologische Anforderungen der <i>WMA</i> | 124 |
| 5.5 | Modul WB - Wasserbilanz | 127 |
| 5.5.1 | Ermittlung der Rohrnetzeinspeisung Q_N | 127 |
| 5.5.2 | Ermittlung der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AI} | 131 |
| 5.5.3 | Ermittlung der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} | 135 |
| 5.5.4 | Ermittlung der scheinbaren Wasserverluste Q_{VS} | 140 |
| 5.5.5 | Ermittlung der realen Wasserverluste Q_{VR} | 144 |
| 5.5.6 | Datenaustausch mit dem hydraulischen Modell | 147 |
| 5.6 | Modul PI - Kennzahlen | 148 |
| 5.6.1 | Allgemeine Kennzahlen | 148 |
| 5.6.2 | Finanzielle Kennzahlen | 148 |
| 5.6.3 | Betriebliche Kennzahlen | 148 |
| 5.6.4 | Ökologische Kennzahlen | 149 |
| 5.7 | Modul UA - Ursachenanalyse | 150 |
| 5.7.1 | Laufzeit bekannter Schäden | 150 |
| 5.7.2 | Leckrate bekannter Schäden | 151 |
| 5.7.3 | Wasserverlustanteil unterschiedlicher Schadensstellen | 151 |
| 5.7.4 | Schadensraten unterschiedlicher Leitungsgruppen | 151 |
| 5.7.5 | Schadenswahrscheinlichkeit einzelner Rohrleitungen | 152 |
| 5.7.6 | Grad der Rohrnetzüberwachung unterschiedlicher Bilanzierungszonen | 157 |
| 6 | Pilothafte Umsetzung der automatisierten Wassermengenanalyse | 159 |
| 6.1 | Kapitelüberblick | 159 |
| 6.2 | Versorgungsgebiet der Stadt Pforzheim | 159 |
| 6.2.1 | Demographie | 159 |
| 6.2.2 | Geografie | 160 |
| 6.2.3 | Geologie | 160 |
| 6.2.4 | Infrastruktur | 162 |
| 6.3 | Wasserversorgung der Stadt Pforzheim | 163 |
| 6.3.1 | Die Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG | 163 |
| 6.3.2 | Wasserversorgungssystem | 164 |
| 6.3.3 | Schadenssituation | 171 |
| 6.3.4 | Wasserverlustsituation | 174 |
| 6.4 | Erstellung der Austauschdatenbank | 176 |
| 6.4.1 | Anbindung an IT-Systeme der SWP | 176 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.4.2 | Größe der Austauschdatenbank | 179 |
| 6.5 | Wahl der Pilotgebiete | 179 |
| 6.5.1 | Pilotgebiet 1: Huchenfeld und Würm | 179 |
| 6.5.2 | Pilotgebiet 2: Seehaus | 180 |
| 6.5.3 | Pilotgebiet 3: Sonnenberg | 182 |
| 6.5.4 | Pilotgebiet 4: Mäuerach | 183 |
| 6.6 | Testbetrieb | 185 |
| 7 | Ergebnisse und Diskussion | 187 |
| 7.1 | Kapitelüberblick | 187 |
| 7.2 | Diskussion der Funktionalität der <i>WMA</i> | 187 |
| 7.2.1 | Allgemeine Funktionen | 187 |
| 7.2.2 | Funktionalität des Moduls WB | 192 |
| 7.2.3 | Funktionalität des Moduls PI | 205 |
| 7.2.4 | Funktionalität des Moduls UA | 206 |
| 7.3 | Ergebnisse der Wassermengenanalyse in den Pilotgebieten | 207 |
| 7.3.1 | Ermittelte Wasserbilanzen | 207 |
| 7.3.2 | Ermittelte Kennzahlen | 211 |
| 7.3.3 | Analyse der Ursachen | 214 |
| 7.4 | Bewertung der Wasserverlustsituation in den Pilotgebieten | 216 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 219 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 219 |
| 8.2 | Ausblick | 221 |
| | Literaturverzeichnis | 222 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|-----|
| 2.1 | Schematischer Aufbau eines Wasserversorgungssystems | 9 |
| 2.2 | Spezifischer Energieverbrauch für Gewinnung, Aufbereitung und Förderung . | 12 |
| 2.3 | Verfahren und Bauformen von Volumen- und Durchflussmessgeräten | 25 |
| 2.4 | Eichpflicht in der Wassermessung | 27 |
| 2.5 | Belastungsbereiche nach Richtlinien 75/33/EWG und 2004/22/EG | 29 |
| | | |
| 3.1 | Definitionen von Einspeise- und Abgabemengen eines Wasserversorgungssystems | 37 |
| 3.2 | Standardisierte DVGW-Wasserbilanz mit Ergänzungen | 38 |
| 3.3 | Tropfverluste am Wasserhahn und Anlaufdurchfluss verschiedener Wasserzählertypen | 41 |
| 3.4 | Zusammenhänge zwischen Schäden und Wasserverlusten | 42 |
| 3.5 | Prozentuale Anteile verschiedener Schadensursachen an HW, VW und AW . . | 45 |
| 3.6 | Einfluss des Versorgungsdrucks auf die Schadenshäufigkeit an Rohrleitungen . | 53 |
| 3.7 | ALR-Konzept zur Charakterisierung der Laufzeit von Leckagen | 63 |
| 3.8 | Systemgrenzen für deutschlandweite sowie WVU-interne Bilanzierung | 76 |
| 3.9 | Prozentualer Anteil der von Benchmarkings erfassten Trinkwassermengen . . | 78 |
| 3.10 | Spezifische reale Wasserverluste nach Bundesländern | 79 |
| | | |
| 4.1 | Komponenten eines Programms zur Wasserverlustbekämpfung | 84 |
| 4.2 | Beispiel einer Nachtmindestverbrauchsmessung | 91 |
| 4.3 | Beispiel einer Nullverbrauchsmessung | 92 |
| 4.4 | Gesamtaufwand und Einzelaufwendungen von WVU gemäß Handelsgesetzbuch | 100 |
| 4.5 | Gegenüberstellung der DVGW-Grenzen für spezifische Wasserverluste und den zugehörigen prozentualen Wasserverlusten | 104 |
| 4.6 | Höhe der unvermeidbaren Wasserverluste UARL an HW, VW und AW bei unterschiedlichen Anschlussdichten | 105 |
| 4.7 | Vier-Säulen-Konzepte zur Kontrolle realer und scheinbarer Wasserverluste . . | 108 |
| 4.8 | Bestimmung des optimalen Wasserverlustniveaus bei Einsatz von Leckortung | 110 |
| 4.9 | Bestimmung des optimalen Wasserverlustniveaus bei Einsatz von Leckortung und Druckmanagement | 111 |
| 4.10 | Verfahren zur Wasserbilanzerstellung | 114 |
| 4.11 | Umfrageergebnisse zur Handhabung der Wasserbilanz | 115 |
| 4.12 | An der Wasserbilanzerstellung beteiligte Abteilungen | 116 |
| | | |
| 5.1 | Systemarchitektur des Werkzeugs <i>AWaRe</i> | 121 |
| 5.2 | Darstellung des Pilotgebiets 1 im GIS-Leitungskataster | 124 |
| 5.3 | Komponenten zur Abstraktion der Topologie eines Wasserversorgungssystems | 125 |
| 5.4 | Struktur der Austauschdatenbank zur Beschreibung der Komponenten | 126 |
| 5.5 | Verschiedene Anwendungsfälle für VWZ | 130 |
| 5.6 | Glättung berechneter Einspeisemengen an einem VWZ mittels Medianfilter . | 131 |
| 5.7 | Ermittlung des Wasserverbrauchs ohne Korrektur | 133 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.8 | Zeitanteilige Berechnung des Wasserverbrauchs | 133 |
| 5.9 | Berechnung des Wasserverbrauchs proportional zur Einspeisemenge | 134 |
| 5.10 | Ermittlung der Spülwassermenge $Q_{AN.2}$ | 138 |
| 5.11 | Ermittlung der Löschwassermenge $Q_{AN.4}$ | 140 |
| 5.12 | Zusammenhang zwischen täglicher Entnahmemenge und -dauer | 143 |
| 5.13 | Jahresgang des Nachtmindestverbrauchs und bekannte Schäden | 146 |
| 5.14 | Zusammenhang zwischen Schadensarten, -ursachen und verschiedenen Einflussgrößen | 155 |
| | | |
| 6.1 | Bevölkerungsentwicklung der Stadt Pforzheim, 1950 bis 2010 | 160 |
| 6.2 | Entwicklung der Wasserabgabe in Pforzheim | 164 |
| 6.3 | Entwicklung von Eigengewinnung und Fremdbezug in Pforzheim | 165 |
| 6.4 | Verteilung von Wasser unterschiedlicher Herkunft im Versorgungsgebiet der Stadt Pforzheim | 166 |
| 6.5 | Altersstruktur und Werkstoffzusammensetzung der HW und VW der SWP im Jahr 2012 | 169 |
| 6.6 | Alterstruktur und Werkstoffzusammensetzung der AW der SWP im Jahr 2012 | 170 |
| 6.7 | Schadensursachen an HW und VW sowie AW der SWP | 171 |
| 6.8 | Schadensraten an HW und VW sowie AW der SWP | 172 |
| 6.9 | Entwicklung der spezifischen Wasserverluste im Versorgungsgebiet der SWP . | 175 |
| 6.10 | Erstellung der Austauschdatenbank über Sichten auf IT-Systeme, isolierte und externe Datenbanken | 177 |
| 6.11 | Eingangsdaten zu Behälterüberläufen aus dem Leitsystem ids HIGH-LEIT . . | 178 |
| 6.12 | Eingangsdaten verschiedener Auftragsarten aus dem Auftragszentrum SLT.inplast | 178 |
| 6.13 | Topologie des Pilotgebiets 1 für die WMA | 180 |
| 6.14 | Topologie des Pilotgebiets 2 für die WMA | 181 |
| 6.15 | Topologie des Pilotgebiets 3 für die WMA | 183 |
| 6.16 | Topologie des Pilotgebiets 4 für die WMA | 184 |
| | | |
| 7.1 | Abweichung minütlicher Messwerte und monatlicher BWZ-Ablesungen gegenüber stündlicher Zählwerte | 191 |
| 7.2 | Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-26-02 mit stündlichen ZW . . . | 193 |
| 7.3 | Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-07-01 mit stündlichen ZW . . . | 193 |
| 7.4 | Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-26-02 mit minütlichen MW . . | 194 |
| 7.5 | Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-07-01 mit minütlichen MW . . | 194 |
| 7.6 | Streuung minütlicher Messwerte in Zone 13 und Zone 6 | 198 |
| 7.7 | Analyse des Nachtmindestverbrauchs und Quantifizierung von $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ | 204 |
| 7.8 | Überprüfung der Einspeise- und Entnahmemengen in Zone 19 (in 2012) . . . | 209 |
| 7.9 | Anteile einzelner Komponenten der nicht in Rechnung gestellten Wasserabgabe in den Pilotgebieten (in 2012) | 210 |
| 7.10 | Spezifische Wasserverluste in den Pilotgebieten (in 2012) | 212 |
| 7.11 | Kennzahlen Op31 und Op32 in den Pilotgebieten (in 2012) | 213 |
| 7.12 | Spezifischer Energiegehalt und CO_2 -Emissionen in den Pilotgebieten (in 2012) | 214 |
| 7.13 | Leckraten identifizierter Schäden in den Pilotgebieten (in 2012) | 216 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|--|-----|
| 2.1 | Aufbereitungsverfahren und ihr spezifischer Energiebedarf | 11 |
| 2.2 | Versorgungsstruktur von Rohrnetzen | 18 |
| 2.3 | Spezifische Wasserabgabe in Deutschland 2010 | 19 |
| 2.4 | Richtwerte für Schadensraten | 23 |
| 2.5 | Metrolologische Klassen gemäß Richtlinie 75/33/EWG | 28 |
| 2.6 | Dimensionierung von Zählern für Wohngebäude nach DVGW Arbeitsblatt W406 (2012) | 29 |
| | | |
| 3.1 | Kategorien scheinbarer Wasserverluste | 40 |
| 3.2 | Bodenklassen und Bodenaggressivität | 50 |
| 3.3 | Experimentelle Leckagekoeffizienten α unterschiedlicher Werkstoffe und Scha- densarten | 55 |
| 3.4 | Geschätzte Laufzeiten von Leckagen | 64 |
| 3.5 | Einfluss messtechnischer Überwachung auf die Laufzeit q_n | 65 |
| 3.6 | Anlauf- und Mindestdurchfluss von EFZ, MFZ, RKZ und WMZ | 67 |
| 3.7 | Wasserverluste in Deutschland, 1991 bis 2010 | 74 |
| 3.8 | Wasserverluste in Deutschland nach Höhe der Wasserabgabe, Stand 2010 | 74 |
| 3.9 | Wasserverluste nach Bundesländern, Stand 2007 | 75 |
| 3.10 | Wasserverluste in Deutschland, 1991 bis 2007 | 75 |
| 3.11 | Wasserverluste in der EU | 80 |
| 3.12 | Schätzung der globalen Wasserverluste | 81 |
| | | |
| 4.1 | Verfahren zur Wasserverlustermittlung | 85 |
| 4.2 | Richtwerte für Leckraten von Kleinstleckagen | 88 |
| 4.3 | Richtwerte für Leckraten von sichtbaren und versteckten Schäden | 88 |
| 4.4 | Vergleich von Software-Produkten zur Wasserbilanzerstellung | 96 |
| 4.5 | Verwendete Datenvariablen des IWA-Kennzahlensystems | 101 |
| 4.6 | Richtwerte für spezifische reale Wasserverluste | 103 |
| 4.7 | Reale Verlustkomponenten und Gegenmaßnahmen | 112 |
| 4.8 | Scheinbare Verlustkomponenten und Gegenmaßnahmen | 112 |
| | | |
| 5.1 | Tabelle $[t_bwz]$ | 128 |
| 5.2 | Tabelle $[t_bwz_ablesungen]$ | 129 |
| 5.3 | Tabelle $[t_vwz]$ | 129 |
| 5.4 | Tabelle $[t_kwz]$ | 131 |
| 5.5 | Tabelle $[t_kwz_ablesungen]$ | 132 |
| 5.6 | Tabelle $[t_abnehmer]$ | 135 |
| 5.7 | Tabelle $[t_verbrauchskurven]$ | 135 |
| 5.8 | Tabelle $[t_pauschalkunden]$ | 136 |
| 5.9 | Tabelle $[t_wvu_bedarf_ww]$ | 136 |
| 5.10 | Tabelle $[t_wvu_bedarf_netze]$ | 137 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.11 | Tabelle [t_reparaturen] | 138 |
| 5.12 | Tabelle [t_lw_bedarf] | 139 |
| 5.13 | Tabelle [t_sonstige_abgaben] | 141 |
| 5.14 | Tabelle [t_kwz_zaehlertyp] | 142 |
| 5.15 | Tabelle [t_kwz_fehlerkurven] | 142 |
| 5.16 | Tabelle [t_hb_ueberlauf] | 144 |
| 5.17 | Tabelle [t_hb_dichtheit] | 145 |
| 5.18 | Tabelle [t_schadensreparatur] | 145 |
| 5.19 | Tabelle [t_wma_uebergabe_hm] | 147 |
| 5.20 | Tabelle [t_hm_druck] | 149 |
| 5.21 | Tabelle [t_sz_ablesungen] | 149 |
| 5.22 | Tabelle [t_sz] | 150 |
| 5.23 | Tabelle [t_leitungsgruppen] | 152 |
| 5.24 | Tabelle [t_leitungsbestand] | 152 |
| 5.25 | Tabelle [t_schaeden] | 153 |
| 5.26 | Tabelle [t_rohrleitungen] | 154 |
| 5.27 | Bestimmung der Bewertungsvariable | 156 |
| 5.28 | Tabelle [t_bewertungsvariablen] | 156 |
| | | |
| 6.1 | Wassergüteparameter der unterschiedlichen Wässer | 167 |
| 6.2 | Einflussgrößen der Schadensursache Korrosion | 173 |
| 6.3 | Einflussgrößen der Schadensursache Bodenbewegung | 174 |
| 6.4 | Wasserbilanz des Versorgungsgebiets Pforzheim, 2011 und 2012 | 175 |
| 6.5 | Kenndaten zu Pilotgebiet 1: Huchenfeld und Würm | 180 |
| 6.6 | Kenndaten zu Pilotgebiet 2: Seehaus | 181 |
| 6.7 | Kenndaten zu Pilotgebiet 3: Sonnenberg | 182 |
| 6.8 | Kenndaten zu Pilotgebiet 4: Mäuerach | 184 |
| | | |
| 7.1 | Zuordnung von Reparaturmaßnahmen zu Rohrleitungen, 2008 bis 2012 | 188 |
| 7.2 | Analyse der KWZ und KWZ-Ablesungen, 2008 bis 2012 | 189 |
| 7.3 | Rechenleistung der WMA für verschiedene Pilotgebiete | 192 |
| 7.4 | Vergleich der BWZ-Zählwerte für Behältereinspeisung und -entnahme | 193 |
| 7.5 | Einfluss der Eingangsdaten auf die mittlere Abweichung der VWZ-Ergebnisse gegenüber der BWZ-Messwerte | 195 |
| 7.6 | Ermittelte Spülmengen in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012) | 197 |
| 7.7 | Ermittelte Löschwasserentnahmen in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012) | 199 |
| 7.8 | Ermittelte Abgrenzungsverluste in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012) | 200 |
| 7.9 | Ermittelte Zählerabweichungen an BWZ in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012) | 201 |
| 7.10 | Ermittelter Behälterüberlauf $Q_{VR.1}$ in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012) | 202 |
| 7.11 | Ermittelte Leckverluste $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012) | 203 |
| 7.12 | Wasserbilanz in den Pilotgebieten (in 2012) | 207 |
| 7.13 | Finanzielle Kennzahlen in den Pilotgebieten (in 2012) | 211 |
| 7.14 | Betriebliche Kennzahlen in den Pilotgebieten (in 2012) | 213 |
| 7.15 | Laufzeit und Leckrate bekannter Schäden in den Pilotgebieten (in 2012) | 215 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------|--|
| 3S | 3S Consult GmbH |
| ALC | Aktive Leckkontrolle (engl.: <i>Active Leakage Control</i>) |
| ALK | Automatisierten Liegenschaftskarte |
| AMR | Automatische Zählerablesung (engl.: <i>Automatic Meter Reading</i>) |
| AWaRe | Akronym des vom BMBF geförderten Projekts <i>GIS-integrierte automatisierte Wassermengenanalyse zur Reduzierung von Wasserverlusten in der Trinkwasserversorgung</i> |
| AW | Wasser-Anschlussleitung |
| AWWA | American Water Works Association |
| ATT | Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e. V. |
| AZ | Asbestzement (Rohrleitungswerkstoff) |
| AZP | Punkt mittleren Versorgungsdrucks (engl.: <i>Average Zone Point</i>) |
| BDEW | Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. |
| BGW | Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft |
| BK50 | Bodenkarte von Baden-Württemberg im Maßstab 1:50.000 |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BWV | Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung |
| BWZ | Betriebswasserzähler |
| BZ | Bilanzierungszone |
| $Ca(OH)_2$ | Calciumhydroxid |
| Cl_2 | Chlor |
| ClO_2 | Chlordioxid |
| CO_2 | Kohlenstoffdioxid |
| COS | COS Systemhaus GmbH |
| COSVega | Geoinformationssystem der COS Systemhaus GmbH |
| DBVW | Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft e. V. |
| DDR | Deutsche Demokratische Republik |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| DGM | digitales Geländemodell |
| DLL | Dynamische Programmbibliothek (engl.: <i>Dynamic Link Library</i>) |
| DM | Druckminderer |
| DN | Nennweite (franz.: <i>Diamètre Nominal</i>) |
| DMA | District Meter Area |
| DVGW | Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. |
| DWA | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. |
| EFZ | Einstrahl-Flügelradzähler |
| ELL | Economic Level of Leakage |
| EPA | United States Environmental Protection Agency |

| | |
|--------|--|
| EUREAU | European Federation of National Associations of Water and Wastewater Services |
| EWG | Europäische Wirtschaftsgemeinschaft |
| GG | Grauguss (Rohrleitungswerkstoff) |
| GGG | Duktilguss (Rohrleitungswerkstoff) |
| GIS | Geografisches Informationssystem |
| GIZ | Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH |
| GK50 | Geologische Karte von Baden-Württemberg im Maßstab 1:50.000 |
| GSM | Standard für digitale Mobilfunknetze (franz.: <i>Groupe Spécial Mobile</i>) |
| GW | Grundwasser |
| HB | Hochbehälter |
| HS | Hochspannung |
| HW | Wasser-Hauptleitung |
| HZ | Hochzone |
| ISDN | Internationaler Standard für digitale Telekommunikationsnetze |
| IT | Informationstechnik |
| IWA | International Water Association |
| IWG | Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| KKS | Kathodischer Korrosionsschutz |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen |
| KWZ | Kundenwasserzähler |
| LKW | Lastkraftwagen |
| MFZ | Mehrstrahl-Flügelradzähler |
| MID | Europäische Messgeräte-richtlinie (engl.: <i>Measuring Instruments Directive</i>) |
| Mio. | Million |
| Mrd. | Milliarde |
| MS | Mittelspannung |
| MW | Messwert |
| NIS | Netzinformationssystem |
| ÖVGW | Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach |
| PE | Polyethylen (Rohrleitungswerkstoff) |
| PKW | Personenkraftwagen |
| PVC | Polyvinylchlorid (Rohrleitungswerkstoff) |
| PW | Pumpwerk |
| RKZ | Ringkolbenzähler |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition |
| St | Stahl (Rohrleitungswerkstoff) |
| StBA | Statistisches Bundesamt |
| StLA | Statistisches Landesamt |
| SWAN | Smart Water Networks Forum |
| SWP | Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG |
| TWA | Trinkwasseraufbereitungsanlage |
| TZ | Tiefzone |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UN | Vereinte Nationen (engl.: <i>United Nations</i>) |

| | |
|--------|--|
| UNICEF | UN Kinderhilfswerk (engl.: <i>United Nations Children's Fund</i>) |
| UV | Ultraviolett |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| VKU | Verband der kommunalen Unternehmen e. V. |
| VW | Wasser-Versorgungsleitung |
| VWZ | Virtueller Wasserzähler |
| WHO | Weltgesundheitsorganisation (engl.: <i>World Health Organization</i>) |
| WMA | Werkzeug zur Wassermengenanalyse |
| WMZ | Woltmannzähler |
| WVU | Wasserversorgungsunternehmen |
| WW | Wasserwerk |
| ZW | Wasser-Zubringerleitung |
| ZW | Zählwert |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|------------|------------|---|
| A | $[m^2]$ | Fläche / Querschnittsfläche |
| A_0 | $[m^2]$ | Wirksamer Querschnitt |
| A_{act} | $[a]$ | Aktuelles Alter einer Leitungsgruppe |
| A_{ref} | $[a]$ | Referenzalter einer Leitungsgruppe |
| A_n | $[a]$ | Mittleres Rohrnetzalter |
| c | $[-]$ | Dimensionsloser Leckagekoeffizient |
| $CARL$ | $[l/AL/d]$ | <i>Current Annual Real Losses</i> , entspricht $Op27$ |
| d_H | $[m]$ | Hydraulischer Durchmesser |
| D_{AL} | $[1/km]$ | Hausanschlussdichte |
| D_{AS} | $[1/km]$ | Absperrschieberdichte |
| E_{CO_2} | $[t]$ | CO_2 -Emissionen aus realen Wasserverlusten |
| $Fi46$ | $[\%]$ | Nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe |
| f_{RV} | $[m^3/h]$ | Richtwert für die nächtliche Restverbrauchsmenge |
| g | $[m/s^2]$ | Erdbeschleunigung |
| H_{Gm} | $[m]$ | Mittlere Geländehöhe |
| h | $[m]$ | Potenzialhöhe/Druckhöhe/Förderhöhe |
| ILI | $[-]$ | Dimensionsloser Infrastructure Leakage Index |
| $K_{B8,2}$ | $[mmol/l]$ | Basenkapazität |
| $K_{S4,3}$ | $[mmol/l]$ | Säurekapazität |
| K_{VR} | $[€/a]$ | Kosten der realen Wasserverluste |
| K_{VS} | $[€/a]$ | Kosten der scheinbaren Wasserverluste |
| L_N | $[km]$ | Gesamtlänge des Rohrnetzes (ohne AW) |
| NRW | $[\%]$ | <i>Non-Revenue Water</i> , entspricht $Fi46$ |
| $Op25$ | $[l/AL/d]$ | Scheinbare Wasserverluste pro Hausanschluss und Tag |
| $Op27$ | $[l/AL/d]$ | Reale Wasserverluste pro Hausanschluss und Tag |
| P_m | $[m]$ | Mittlerer Versorgungsdruck |
| P_{NMV} | $[m]$ | Versorgungsdruck bei Nachtmindestverbrauch |
| q | $[m^3/s]$ | Leckrate |
| Q | $[m^3/h]$ | Durchfluss/Volumenstrom |
| Q_1 | $[m^3/h]$ | Minstdurchfluss gemäß MID |
| Q_2 | $[m^3/h]$ | Übergangsdurchfluss gemäß MID |
| Q_3 | $[m^3/h]$ | Dauerdurchfluss gemäß MID |
| Q_4 | $[m^3/h]$ | Überlastdurchfluss gemäß MID |
| Q_a | $[m^3/h]$ | Anlaufdurchfluss eines Wasserzählers |
| Q_A | $[m^3/a]$ | Rohrnetzabgabe |
| Q_{AI} | $[m^3/a]$ | In Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe |
| Q_{AN} | $[m^3/a]$ | Nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe |
| Q_{BV} | $[m^3/a]$ | Betriebsverluste bei der Wasserproduktion |

| | | |
|--------------|------------------|---|
| Q_{IR} | $[m^3/a]$ | In Rechnung gestellte Wasserabgabe |
| q_m | $[m^3/m/a]$ | Metermengenwert |
| Q_{max} | $[m^3/h]$ | Größter Durchfluss gemäß 75/33/EWG |
| Q_{min} | $[m^3/h]$ | Kleinster Durchfluss gemäß 75/33/EWG |
| q_N | $[m^3/km/a]$ | Spezifische Rohrnetzeinspeisung |
| Q_n | $[m^3/h]$ | Nenndurchfluss gemäß 75/33/EWG |
| Q_N | $[m^3/a]$ | Rohrnetzeinspeisung |
| Q_{NMV} | $[m^3/h]$ | Gemessene Nachtmindestverbrauchsmenge |
| Q_{NR} | $[m^3/a]$ | Nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe |
| Q_{RV} | $[m^3/h]$ | Restverbrauchsmenge bei Nachtmindestverbrauch |
| Q_S | $[m^3/a]$ | Systemeinspeisung |
| Q_t | $[m^3/h]$ | Trenndurchfluss gemäß 75/33/EWG |
| Q_V | $[m^3/a]$ | Wasserverluste |
| $Q_{V.BS}$ | $[m^3/a]$ | Wasserverluste bereits behobener Schäden |
| Q_{VE} | $[m^3/a]$ | Exzessive reale Wasserverluste |
| $Q_{V.KL}$ | $[m^3/a]$ | Wasserverluste infolge Kleinstleckagen |
| q_{VR} | $[m^3/km/h]$ | Spezifische reale Wasserverluste, entspricht <i>Op24</i> |
| q_{VRP} | $[l/AL/m/d]$ | Reale Verluste pro Hausanschluss und Tag pro Meter Versorgungsdruck |
| Q_{VR} | $[m^3/a]$ | Reale Wasserverluste |
| $Q_{VR.NMV}$ | $[m^3/h]$ | Reale Wasserverluste während Nachtmindestverbrauch |
| Q_{VS} | $[m^3/a]$ | Scheinbare Wasserverluste |
| R | $[-]$ | Risikoparameter der Schadenswahrscheinlichkeit |
| Re | $[-]$ | Reynoldszahl |
| S | $[Schäden/km/a]$ | Jährliche Schadensrate |
| t | $[h]$ | Laufzeit |
| t_{ED} | $[h]$ | Tägliche Entnahmedauer an einem KWZ |
| t_{WB} | $[d]$ | Bilanzierungszeitraum einer Wasserbilanz |
| U | $[m]$ | Benetzter Umfang |
| u_A | $[\%]$ | Relative Unsicherheit |
| U_A | $[m^3]$ | Unsicherheit |
| U_{ARL} | $[l/AL/d]$ | Unvermeidbare reale Wasserverluste pro Jahr (engl.: <i>Unavoidable Annual Real Losses</i>) |
| v | $[m/s]$ | Ausflussgeschwindigkeit |
| v_i | $[-]$ | Bewertungsvariable der Schadenswahrscheinlichkeit |
| V_E | $[kWh]$ | Durch reale Wasserverluste verlorene Energie |
| V_{LA} | $[m^3]$ | Leitungsvolumen |
| $WR1$ | $[\%]$ | Nicht genutzte Wasserressourcen |
| α | $[-]$ | Dimensionsloser Leckageexponent (entspricht <i>N1</i>) |
| η | $[-]$ | Dimensionsloser Gewichtungsfaktor |
| μ | $[-]$ | Dimensionsloser Ausflusskoeffizient |
| ν | $[m^2/s]$ | Kinematische Viskosität |

Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie. Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter Professor Dr.-Ing. Franz Nestmann für die Ermöglichung der Arbeit und für die Übernahme der Betreuung und Erstbegutachtung. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Raimund Herz von der Technischen Universität Dresden für das Interesse an meiner Dissertation, die vielen hilfreichen Hinweise und die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens bedanken.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Verbundprojektes *AWaRe* (Förderkennzeichen 02WQ1256C) gefördert. Ich danke sämtlichen Mitarbeitern der als Verbundpartner beteiligten Ingenieurbüros COS Systemhaus GmbH aus Ettlingen und 3S Consult GmbH in Karlsruhe, insbesondere Herrn Armin Canzler und Herrn Dr.-Ing. Jochen Deuerlein, für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts. Wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat die Zusammenarbeit mit meinem Kollegen M.Sc. Nicolai Guth, der für die Umsetzung meines Softwarekonzepts in Quellcode verantwortlich war.

Besonders möchte ich mich bei den verantwortlichen Personen der Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG bedanken, die durch die Bereitstellung von Daten den notwendigen Praxisbezug meiner Arbeit ermöglicht haben. Dankend hervorheben möchte ich hier Herrn Alexander Freygang, Herrn Aristotelis Tolikas, Herrn Robin Binder und Frau Andrea Kuttler.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Kollegen der Abteilung Wasserversorgungsnetze des IWG für die gute Arbeitsatmosphäre und die fachlichen Anregungen danken. Ganz besonderer Dank gebührt meinem Kollegen und guten Freund Dr.-Ing. Philipp Klingel für die zahlreichen wissenschaftlichen und weniger wissenschaftlichen Diskussionen und seine unerschöpfliche Hilfsbereitschaft bei technischen und allen anderen Fragestellungen.

Karlsruhe, im August 2014

Axel Knobloch

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Jahr 2010 wurden laut der von UNICEF und WHO verfassten Studie *Progress on drinking water and sanitation: 2012 Update* etwa 54 % der Menschheit mit Trinkwasser aus leitungsgebundenen Systemen versorgt, das sind circa 3,7 Milliarden Menschen. Betrachtet man nur den Teil der Menschheit, der in Städten wohnt, beträgt der Anschlussgrad an leitungsgebundene Wasserversorgungssysteme sogar 80 % (UNICEF und WHO, 2012). Man kann mit großer Sicherheit davon ausgehen, dass in jedem einzelnen dieser Systeme Wasserverluste auftreten. In ihrer Ausprägung und Höhe sind die Wasserverluste jedoch von System zu System sehr unterschiedlich. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass Wasserverluste von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst werden: Länge und Struktur des Rohrnetzes spielen genauso eine Rolle wie die eingesetzten Rohrwerkstoffe, die Verlegeweise und das Alter der Leitungen. Weiterhin wirken sich die Bodenbeschaffenheit, Grundwasserstände und -eigenschaften, Witterungseinflüsse, Verkehrsbelastung und die Aggressivität des transportierten Wassers sowie die Druckverhältnisse im Leitungsnetz auf die Häufigkeit und Laufzeit von Leckagen und Rohrbrüchen aus. Aber auch die Betriebs- und Instandhaltungsstrategie des Versorgungsunternehmens, wirtschaftliche Betrachtungen und zahlreiche weitere Faktoren haben einen Effekt auf die Höhe der Wasserverluste (s. Abschnitt 3.3).

Anhand der Höhe der Wasserverluste lassen sich Rückschlüsse über den Zustand eines Wasserversorgungssystems ziehen. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) merkt an, dass „niedrige Wasserverluste [...] ein maßgebender Indikator für einen guten Rohrnetzzustand“ sind und zu einem „reduzierten Aufwand für die Instandhaltung der Rohrnetzanlagen“ führen (DVGW, 2003a). Hohe Wasserverluste dagegen beeinträchtigen den Betrieb von Wasserversorgungssystemen und können in extremen Fällen zu intermittierender Betriebsweise oder dem völligen Zusammenbruch der Wasserversorgung führen.

Wasserverluste betreffen aber nicht nur das jeweilige Versorgungssystem aus technischer Sicht, sondern wirken sich zudem negativ auf Gesellschaft und Umwelt aus. Zu den sozialen Auswirkungen zählen Versorgungsunterbrechungen, Druckprobleme und hygienische Beeinträchtigungen des Trinkwassers. Aufgrund des hohen Wasserangebots und dem hohen Standard der Versorgungssicherheit in Deutschland kommt es äußerst selten zu solchen Beeinträchtigungen für den Wasserverbraucher. In einigen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union (EU) im Mittelmeerraum hingegen werden die Auswirkungen von Dürreperioden und Wasserknappheit durch Wasserverluste verstärkt, so dass Wasserversorger häufig dazu gezwungen sind, die Trinkwasserversorgung zu rationieren, wie Erfahrungen aus Spanien und Zypern zeigen (s. Abschnitt 3.5.5).

Selbstverständlich sind Wasserverluste immer mit finanziellen Einbußen für das Wasserversorgungsunternehmen (WVU) verbunden. Die Kosten entstehen durch notwendige Investitionen für die Erschließung zusätzlicher Ressourcen, erhöhte Fixkosten für die Steigerung der Anlagenkapazitäten sowie durch den erhöhten Aufwand an Personal und Energie für Aufbereitung und Förderung des Wassers. Aus ökologischer Sicht sind insbesondere der zusätzliche Stress auf die Wasserressourcen sowie der Energieverbrauch für Förderung und Aufbereitung

des verlorenen Wassers und die damit verbundenen CO_2 -Emissionen nachteilig zu sehen.

Um das Ausmaß der globalen Auswirkungen von Wasserverlusten besser einschätzen zu können, sei an dieser Stelle auf einen Bericht der Weltbank verwiesen, in dem der Versuch unternommen wurde, die weltweite Wasserverlustmenge abzuschätzen (Kingdom u. a., 2006). Der Bericht geht davon aus, dass weltweit jährlich mehr als 32 Milliarden Kubikmeter Trinkwasser aufgrund von Leckagen in den Versorgungsnetzen verloren gehen. Weiterhin schätzen Kingdom u. a. (2006), dass weitere 16 Milliarden Kubikmeter an die Verbraucher geliefert werden, die aufgrund illegaler Anschlüsse, mangelhafter Messung oder Korruption keine Einnahmen für die Wasserversorger generieren. Basierend auf einer approximativen Ermittlung der Wasserverluste in der Europäischen Union kann davon ausgegangen werden, dass diese Zahlen eher konservativ angesetzt sind und die tatsächliche Situation möglicherweise noch kritischer ist. Die Auswertung verschiedener Datenquellen legt nahe, dass sich die Wasserverluste in der EU in einer Größenordnung von circa 23 % der eingespeisten Wassermenge bewegen (s. Abschnitt 3.6.2). Dies allein entspräche bereits einer jährlichen Verlustmenge von 10 Milliarden Kubikmeter Wasser. Es ist offensichtlich, dass solch exzessive Wasserverluste in direktem Gegensatz zum Gedanken der nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen stehen.

Mit Hinblick auf die möglichen Folgen des Klimawandels, zunehmende Übernutzung und Wasserknappheit in vielen Regionen der Erde, Bevölkerungswachstum und steigende Urbanisierung sowie konkurrierende Nutzung von Landwirtschaft, Industrie und Privathaushalten ist davon auszugehen, dass der Druck auf die Wasserressourcen in Zukunft weiter ansteigt. Um die Ressourceneffizienz im Bereich der Wasserversorgung zu optimieren, müssen daher Maßnahmen ergriffen werden, um die Wasserverluste auf ein akzeptables Niveau zu senken.

In Deutschland wurde dieser Weg teilweise schon beschritten: In den letzten 20 Jahren konnten die Wasserverluste dank gesteigerter Sensibilität der Wasserversorger, verbesserter Leckortungsmethoden und der technologischen Weiterentwicklung der Rohrwerkstoffe von 11,6 % (1991) auf 9,3 % (2010) der eingespeisten Wassermenge reduziert werden (s. Abschnitt 3.6.1). Das ist im Vergleich mit anderen Ländern der Europäischen Union eine sehr geringe Verlustrate. Der Vergleich mit den Niederlanden (Wasserverlustrate 2010: 4,4 %) zeigt aber, dass das Reduzierungspotenzial in Deutschland noch nicht völlig ausgeschöpft ist (vgl. Tabelle 3.11). Allerdings steigt nach der Gesetzmäßigkeit der abnehmenden Grenzerträge der Aufwand für eine weitere Reduzierung der Wasserverluste ab einem gewissen Punkt überdurchschnittlich stark an. Effizientes Wasserverlustmanagement bedarf daher neuartiger Instrumente und Methoden, um das wirtschaftlich erreichbare Niveau der Wasserverluste zu ermitteln und die optimalen Gegenmaßnahmen auszuwählen.

Eine wichtige Voraussetzung für effiziente Wasserverlustreduzierung ist die Entwicklung einer geeigneten mittel- bis langfristigen Strategie im Rahmen des Wasserverlustmanagements anstelle des Einsatzes von kurzfristigen Gegenmaßnahmen zur Bekämpfung der Symptome. Um diese Strategie zu entwickeln, sind die Wasserverlustmengen möglichst exakt zu quantifizieren und ihre Ursachen und Auswirkungen zu bestimmen. Die Kenntnis der Ursachen erlaubt die Auswahl der passenden Gegenmaßnahmen. Die räumlich differenzierte Bestimmung und Bewertung der Auswirkungen dient der Priorisierung der Maßnahmen. Der Prozess der Datenerhebung und -aufbereitung für die Erstellung einer Wasserbilanz sowie die Analyse der Ursachen und Auswirkungen der Wasserverluste lässt sich unter dem Begriff der Wassermengenanalyse zusammenfassen (s. Kapitel 4). Ergebnisse einer Umfrage unter WVU in Baden-Württemberg haben gezeigt, dass die Wasserbilanz als wichtiges Werkzeug zur effizienten Wasserverlustreduzierung anerkannt ist (s. Abschnitt 4.8). Die Umfrage zeigt aber auch, dass in der Praxis die Wasserbilanz und die Wassermengenanalyse häufig unvollständig

oder fehlerhaft ausgeführt werden. Die Umfrage vermittelt den Eindruck, dass die Wasserbilanz von vielen WVU eher für statistische Zwecke denn als Mittel zur Strategieentwicklung angewendet wird.

Mögliche Ursachen dafür sind in dem relativ hohen Bearbeitungsaufwand zu sehen, da in die Erhebung und Aufbereitung der erforderlichen Daten üblicherweise mehrere Abteilungen eines WVU involviert sind (s. Abschnitt 4.4). Außerdem wird die Wassermengenanalyse derzeit in der Regel nur für das komplette Wasserversorgungssystem durchgeführt (s. Abschnitt 4.3). Die auf diese Weise ermittelten Ergebnisse geben nur Mittelwerte des Gesamtsystems wieder, die eine Identifikation von Problemzonen und eine Priorisierung von Gegenmaßnahmen nicht zulässt. Die dafür erforderliche zonenweise Bilanzierung ist jedoch mit einem erheblich höheren Aufwand verbunden, der von vielen Wasserversorgern gescheut wird.

1.2 Zielsetzung

Die in Abschnitt 1.1 beschriebene Ausgangssituation lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Trotz der relativ niedrigen Wasserverluste besteht in Deutschland immer noch Potenzial zur weiteren Wasserverlustreduktion, das aus Gründen der Nachhaltigkeit und der Ressourceneffizienz ausgeschöpft werden sollte.
- Um die Wassermengenanalyse als Werkzeug zur Strategieentwicklung bei der Wasserverlustbekämpfung einsetzen zu können, ist die Analyse des gesamten Versorgungssystems als eine Einheit nicht ausreichend.
- Die zonenweise Durchführung der Wassermengenanalyse auf konventionelle Weise ist sehr arbeitsintensiv und daher für die meisten WVU bisher unrentabel.
- Um in Deutschland die Wasserverluste auf effiziente Weise bis zu einem optimalen Niveau abzusenken, bedarf es der Entwicklung neuartiger Werkzeuge und Methoden, die die zonenweise Bilanzierung und Analyse der Wasserverluste auf wirtschaftliche Weise ermöglichen.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse, lässt sich die Zielsetzung dieser Arbeit in Form einer Forschungsfrage wie folgt formulieren:

Wie kann ein GIS-basiertes Werkzeug zur automatisierten Wassermengenanalyse Wasserversorgungsunternehmen dabei unterstützen, ihre Wasserverluste präziser zu erfassen und in optimaler Weise zu reduzieren?

Gegenstand dieser Arbeit ist, aufbauend auf den geschilderten Erkenntnissen, die Entwicklung eines Werkzeugs zur weitgehenden Automatisierung der Wassermengenanalyse für die Quantifizierung und Bewertung der Wasserverluste in Trinkwasserversorgungssystemen. Dieses Werkzeug soll es ermöglichen, die Wasserverluste in diskreten Zonen eines Wasserversorgungssystems separat zu ermitteln und deren jeweilige Ursachen und Auswirkungen getrennt zu untersuchen und zu bewerten. Das zu entwickelnde Software-Werkzeug soll in ein Geografisches Informationssystem (GIS) bzw. Netzinformationssystem (NIS) eines WVU eingebettet werden. Das GIS dient einerseits der Sammlung und Aufbereitung der erforderlichen Eingangsdaten für die Wassermengenanalyse und andererseits der Visualisierung der Ergebnisse sowie als Schnittstelle zum Anwender.

Das Konzept sieht neben der Erstellung der detaillierten Wasserbilanzen für beliebige Betrachtungszonen und -zeiträume auch die Analyse der Ursachen vor. Hierzu sollen mit Hilfe des GIS Informationen zu den wichtigsten Einflussfaktoren, die für die Entstehung von Wasserverlusten maßgeblich sind, mit Informationen über das Rohrnetz, der Schadensstatistik und den ermittelten Wasserverlusten verknüpft und Kausalitäten analysiert werden.

Die praktische Umsetzung des Werkzeugs zur automatisierten Wassermengenanalyse in einem WVU erfordert eine große Menge an Eingangsdaten, die in der Regel in mehreren Abteilungen und in voneinander unabhängigen IT-Systemen gehalten werden. Diese Arbeit behandelt daher ausführlich, welche Eingangsdaten benötigt werden, wo und in welcher Form sie üblicherweise vorgehalten werden und wie sie für die Wassermengenanalyse bereitgestellt werden können. Um die Eigenschaften des Werkzeugs unter realen Bedingungen zu erproben, wird dieses im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts *AWaRe* bei den Stadtwerken Pforzheim GmbH & Co. KG (SWP) implementiert und getestet. Den spezifischen Eigenschaften des Wasserversorgungssystems der Stadt Pforzheim sowie der dortigen Wasserverlustsituation werden daher in dieser Arbeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Die Ergebnisse der Implementierung des Werkzeugs bei den SWP werden detailliert ausgewertet und diskutiert. Außerdem wird die Praxistauglichkeit und Übertragbarkeit des Werkzeuges auf andere WVU analysiert und bewertet. Das zu entwickelnde Werkzeug zielt insbesondere auf mittlere und große WVU, da die Automatisierung der Wassermengenanalyse erst ab einer gewissen Komplexität der Rohrnetze sinnvoll ist. Außerdem verfügen kleinere WVU oftmals nicht über die notwendige Hardware- und Softwareumgebung, um das neue Werkzeug zu implementieren und mit den erforderlichen Eingangsdaten zu versorgen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit lässt sich thematisch in drei übergeordnete Teile gliedern: Im ersten Teil sollen die notwendigen Grundlagen zu Wasserversorgungssystemen und Wasserverlusten sowie der Stand der Technik bei der Wassermengenanalyse erarbeitet werden. Damit wird der Grundstein für den zweiten Teil gelegt, der die Konzeption, Entwicklung, Implementierung und Erprobung eines Werkzeugs zur automatisierten Analyse und Bewertung von Wasserverlusten behandelt. Im dritten Teil wird die Tauglichkeit des entwickelten Werkzeugs untersucht und es werden die erzielten Ergebnisse analysiert. Die Inhalte der einzelnen Kapitel werden im folgenden kurz vorgestellt.

Grundlagen und Stand der Technik In Kapitel 2 werden der Aufbau und die Funktionsweise von Wasserversorgungssystemen mit Hinblick auf die Entstehung von Wasserverlusten und deren Bilanzierung eingehend betrachtet. Dazu werden zunächst die einzelnen Anlagenteile eines Wasserversorgungssystems mit ihren jeweiligen Aufgaben beschrieben und ihre spezifischen Charakteristika hinsichtlich Entstehung und Auswirkung von Wasserverlusten beleuchtet. Im Anschluss daran wird die komplexe Struktur von Wasserversorgungssystemen untersucht, um daraus resultierende Konsequenzen für die Wassermengenanalyse zu identifizieren. Das Kapitel endet mit einer Zusammenstellung von Kriterien, anhand derer Wasserversorgungssysteme miteinander vergleichbar gemacht werden können. Dies ist erforderlich, um später die Höhe der Wasserverluste in unterschiedlichen Systemen vergleichen zu können und Rückschlüsse auf deren Ursache zu ziehen.

Kapitel 3 stellt ausführlich den Themenkomplex der Wasserverluste dar. Nach der Festle-

gung der Terminologie werden die Ursachen realer und scheinbarer Wasserverluste aufgezeigt. Dabei findet eine intensive Auseinandersetzung mit den Zusammenhängen zwischen den verschiedenen Ausprägungen von Schadensursache, Schadensart und Schadensstelle und der Höhe der realen Wasserverluste statt. Abschließend werden die unterschiedlichen Auswirkungen von Wasserverlusten erläutert und ein Überblick über die aktuelle Wasserverlustsituation in Deutschland, in der Europäischen Union und weltweit gegeben.

In Kapitel 4 wird der aktuelle Stand der Technik der Wassermengenanalyse aufgezeigt. Dazu werden konventionelle Verfahren und Werkzeuge zur Quantifizierung und Bewertung der Wasserverluste beschrieben. Das Kapitel setzt sich weiterhin damit auseinander, ob und auf welche Weise die bekannten Verfahren und Werkzeuge von den WVU eingesetzt werden. Aufbauend auf diese Analyse werden Defizite und Verbesserungspotenziale der konventionellen Art der Wasserverlustanalyse aufgezeigt, die die Entwicklung neuer Werkzeuge erforderlich machen.

Entwicklung des Werkzeugs zur automatisierten Wassermengenanalyse Im Grundlagenteil der vorliegenden Arbeit wird aufgezeigt, welche Potenziale in der Wasserverlustreduzierung vorhanden sind. Weiterhin werden Defizite bei der gängigen Praxis der Wasserverlustanalyse identifiziert, die eine effiziente Nutzung dieser Potenziale behindern. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5 die angestrebten Funktionen eines neuartigen Werkzeugs zur automatisierten Wassermengenanalyse beschrieben, dessen Entwicklung Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist. Die Konzeption der Systemarchitektur wird ausführlich beschrieben, ebenso die benötigten Eingangsdaten und die Schnittstellen zur Softwareumgebung, die für die Datenbereitstellung genutzt werden sollen. Danach wird die Entwicklung der einzelnen Komponenten des modular aufgebauten Werkzeugs beschrieben, wobei für jede Komponente die im Grundlagenteil gewonnenen Erkenntnisse umgesetzt werden.

Um das neue Werkzeug unter realen Bedingungen zu erproben, wird ein Prototyp an einem Datensatz der SWP implementiert und getestet. Kapitel 6 beschreibt zunächst das Versorgungsgebiet der SWP und die dort anzutreffenden Rahmenbedingungen, die Auswirkungen auf die Wasserverluste haben. Außerdem wird das Wasserversorgungssystem der SWP beschrieben und spezifische Eigenschaften beleuchtet, die den Einsatz des neuen Werkzeugs beeinflussen. Anschließend werden die angebundenen IT-Systeme und die verwendeten Eingangsdaten beschrieben und der Aufbau der Austauschdatenbank für die Testrechnungen erläutert. Das Kapitel endet mit der Beschreibung der vier Pilotgebiete im Versorgungsgebiet der SWP, die für die Erprobung des Werkzeugs ausgewählt wurden.

Auswertung der Ergebnisse In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Testrechnungen in den Pilotgebieten zusammengefasst. Die Funktionalität des entwickelten Werkzeugs wird anhand der Berechnungsergebnisse analysiert und bewertet. Dabei findet die Untersuchung der Funktionalität der Module zur Quantifizierung der Wasserbilanzkomponenten besondere Berücksichtigung. Weiterhin wird in Kapitel 7 anhand der Ergebnisse der automatisierten Wassermengenanalyse die Wasserverlustsituation in den einzelnen Zonen der Pilotgebiete vorgestellt und bewertet. Kapitel 8 enthält die Zusammenfassung der gewonnenen Forschungsergebnisse. Die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie die Einsatzmöglichkeiten und Praxistauglichkeit des neu entwickelten Werkzeugs zur automatisierten Wassermengenanalyse werden diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche vertiefende und weitergehende Arbeiten gegeben.

2 Wasserversorgungssysteme

2.1 Kapitelüberblick

Um die Ursachen für die Entstehung von Wasserverlusten und die Faktoren, die zu ihren verschiedenen Ausprägungen führen, verstehen zu können, ist es notwendig, den Aufbau und die Funktionsweise von Wasserversorgungssystemen und ihre zahlreichen Anlagenteile und Komponenten genau zu kennen. In den folgenden Abschnitten werden daher Wasserversorgungssysteme mit Hinblick auf die Entstehung von Wasserverlusten und deren Bilanzierung eingehend betrachtet.

Um die Höhe und Zusammensetzung der Wasserverluste innerhalb eines Systems mittels einer Wasserbilanz exakt beschreiben zu können, ist zunächst die genaue Kenntnis seiner Komponenten (Anlagenteile) erforderlich. Dazu werden in Abschnitt 2.2 zunächst die Aufgaben von Wasserversorgungssystemen dargelegt und die fünf grundlegenden Anlagenteile eines Wasserversorgungssystems beschrieben: Gewinnung, Aufbereitung, Förderung, Speicherung und Verteilung.

In Abschnitt 2.3 werden Ansätze vorgestellt, wie komplexe Wasserversorgungssysteme in logische Einheiten gegliedert werden können, für die eine separate Bilanzierung der Wasserverluste möglich ist. Im darauffolgenden Abschnitt 2.4 werden Methoden aufgezeigt, die der Charakterisierung von Wasserversorgungssystemen dienen und die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme untereinander ermöglichen. Die Vergleichbarkeit von Wasserversorgungssystemen ist ein wichtiger Aspekt für die Einordnung und Bewertung von Wasserverlusten.

In den Abschnitten 2.5 und 2.6 wird die Bedeutung von Messgeräten, Prozessleitsystemen und der Fernwirktechnik für die Überwachung der Wasserverluste und die Erstellung von Wasserbilanzen erörtert. Charakteristische Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile verschiedener Wasserzähler und Durchflussmessgeräte werden diskutiert.

In Abschnitt 2.7 wird auf verschiedene betriebliche Aspekte eingegangen, die sowohl für die Höhe der Wasserverluste als auch für die erfolgreiche Erstellung von Wasserbilanzen eine Rolle spielen. Dazu gehören unter anderem die kontinuierliche Überwachung der Zuflüsse in der Netzleitstelle aber auch die Arbeitsabläufe bei der Leckortung und -reparatur. Weitere Gesichtspunkte sind die Handhabung der Datenhaltung und des Datenaustauschs, die eine zentrale Rolle bei der Erkennung und Quantifizierung von Wasserverlusten spielen.

2.2 Aufgaben und Anlagenteile

2.2.1 Die Wasserversorgung in Deutschland

Die vorrangige Aufgabe der Wasserwirtschaft ist die Versorgung der Bevölkerung, des Gewerbes und der Industrie mit Trinkwasser. In Deutschland sind die Anforderungen an die Art der Trinkwasserversorgung in der *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch* (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) formuliert (BGBI, 2011). Mutschmann

und Stimmelmayer (2011) beschreiben die grundlegenden Anforderungen an ein Wasserversorgungssystem zusammenfassend als die sichere Bereitstellung von „Trinkwasser in ausreichender Menge, von einwandfreier Beschaffenheit, jederzeit, mit ausreichendem Druck [und] an jeder Stelle“ eines Versorgungsgebiets. In der DIN 2000 wird die zentrale Trinkwasserversorgung als die „Versorgung der Bevölkerung und anderer Abnehmer in einem räumlich abgegrenzten Gebiet mit Trinkwasser aus leitungsgebundenen Systemen“ definiert (DIN, 2000a). Die folgenden Zahlen geben einen Überblick über die Größenordnung der Wasserversorgung in Deutschland. Die deutsche Wasserwirtschaft setzt sich aus wenigen großen und einer Vielzahl mittlerer bis sehr kleiner Versorgungsunternehmen zusammen, die in unterschiedlichen Rechtsformen (Regiebetrieb, Eigenbetrieb, Eigengesellschaft, Betreibermodell) geführt werden: In Deutschland waren im Jahr 2010 laut Statistischem Bundesamt (StBA) insgesamt 6.064 WVU für die Wasserversorgung verantwortlich (StBA, 2013). Das gesamte Wasseraufkommen betrug 2010 insgesamt 5.081 Millionen Kubikmeter. Die 61 größten Unternehmen mit einem jährlichen Wasseraufkommen von mehr als zehn Millionen Kubikmeter trugen dazu 2.422 Millionen Kubikmeter, also circa die Hälfte bei. Die Wasserabgabe an Letztverbraucher und Weiterverteiler betrug deutschlandweit 4.500 Millionen Kubikmeter, der Wasserwerkseigenverbrauch betrug 145 Millionen Kubikmeter und die Wasserverluste summierten sich zu insgesamt 474 Millionen Kubikmeter (StBA, 2013).

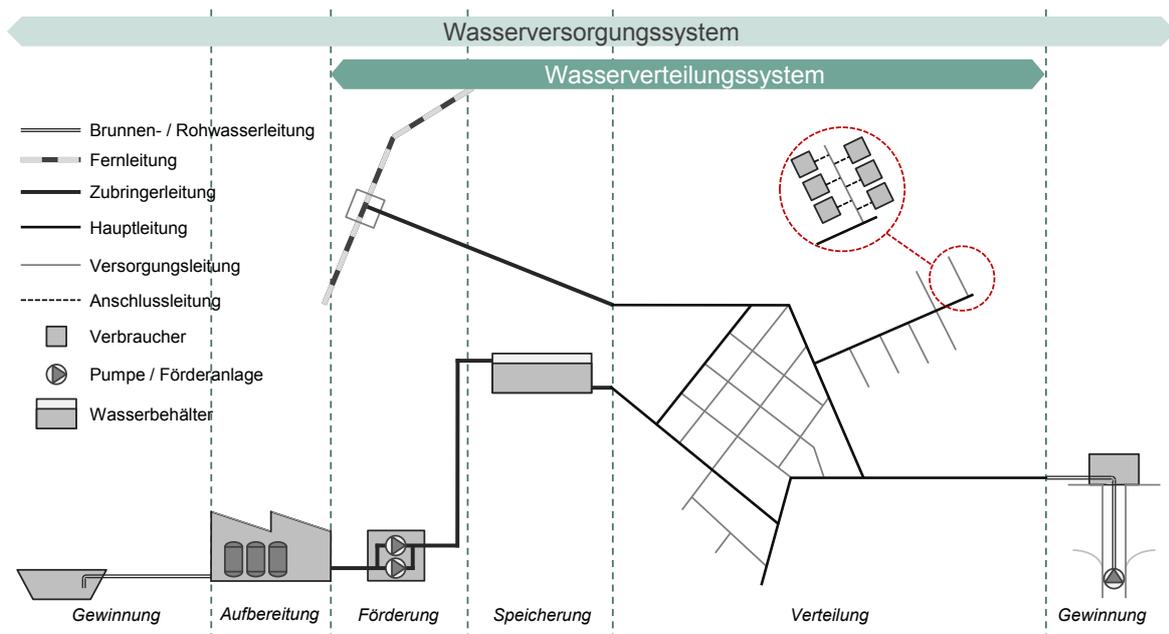
2.2.2 Anlagenteile

2.2.2.1 Allgemeines

Versorgungsanlagen für Trinkwasser sind alle technischen Einrichtungen, die der zentralen Trinkwasserversorgung dienen. Diese gliedern sich in die fünf übergeordneten Anlagenteile der Gewinnung, Aufbereitung, Förderung, Speicherung und Verteilung von Wasser, wie Abbildung 2.1 schematisch illustriert. Wie Abbildung 2.1 zeigt, können die fünf grundlegenden Anlagenteile definitionsgemäß auf verschiedene Arten zusammengefasst werden. Das Wasserversorgungssystem beschreibt die Gesamtheit aller Anlagen von der Quelle bis zur Übergabestelle an den Verbraucher. Eine Teilmenge des Wasserversorgungssystems ist das Wasserverteilungssystem, das in der DIN EN 805 als „Teil eines Wasserversorgungssystems mit Rohrleitungen, Trinkwasserbehältern, Förderanlagen und sonstigen Einrichtungen zum Zweck der Verteilung von Wasser an die Verbraucher“ definiert ist. Demnach beginnt das Wasserverteilungssystem „nach der Wasseraufbereitungsanlage oder, wenn keine Aufbereitung erfolgt, nach der Wassergewinnung und endet an der Übergabestelle zum Verbraucher“ (DIN, 2000b). Die Übergabestelle zum Verbraucher kann je nach Handhabung durch das WVU entweder die Hauptabsperrraum oder der Wasserzähler sein. Hinter der Übergabestelle beginnt der nichtöffentliche Teil der Wasserverteilung mit dem privaten Teil der Anschlussleitung bzw. der Verbrauchsleitung (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

2.2.2.2 Gewinnung

Die für die Wasserversorgung nutzbaren Wasservorkommen lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen unterteilen, nämlich Niederschlagswasser, Oberflächenwasser sowie Unterirdische Wasservorkommen. Der Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Nebel kann mit Hilfe von Zisternen aufgefangen werden, um für die Wasserversorgung genutzt zu werden. Die Versorgung auf Grundlage von Niederschlagswasser hat in Deutschland keine nennenswerte Bedeutung, da die hohe zeitliche Variabilität des Niederschlags große Speichervolumina erfordert und der Niederschlag Schmutz- und Schadstoffe aus der Luft löst, die eine kostenintensive

Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Wasserversorgungssystems¹

Aufbereitung notwendig machen (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

Überall dort wo die vorhandenen Grundwasservorkommen nicht ausreichen oder für die Trinkwasserversorgung nicht nutzbar sind, sind WVU dazu gezwungen, zur Wassergewinnung auf Oberflächengewässer zurückzugreifen. Dazu wird Rohwasser aus Flüssen, Seen oder Talsperren entweder direkt oder nach Durchsickerung einer Bodenpassage (Uferfiltrat) entnommen. Die natürlichen Qualitätsschwankungen von Oberflächengewässern und die anthropogenen Einflüsse durch punktuellen oder diffusen Eintrag von Verunreinigungen erfordern den Einsatz aufwendiger Aufbereitungsverfahren (Karger u. a., 2008). Die Qualität von Uferfiltrat wird wesentlich von der Beschaffenheit des Oberflächenwassers bestimmt, kann aber durch die biologische Reinigung und Sorptionsprozesse auf der Filterstrecke sowie durch die Mischung mit dem anstehenden Grundwasser die Schwankungen der Wasserqualität sowie plötzliche Verunreinigungsspitzen ausgleichen (DVGW, 1996).

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die Bedeutung der Meerwasserentsalzung zur Trinkwassergewinnung aufgrund steigender Wasserknappheit und technologischer Fortschritte in einigen Regionen, insbesondere im Mittleren Osten aber auch in Nordafrika und einigen südeuropäischen Ländern, rapide zugenommen. In Deutschland spielt diese energieintensivste Art der Wassergewinnung bisher keine Rolle.

Die unterirdischen Wasservorkommen lassen sich gliedern in Grundwasser, Quellwasser sowie angereichertes Grundwasser. Nach DIN 4049 ist Grundwasser definiert als unterirdisch anstehendes Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung hauptsächlich von der Schwerkraft bestimmt wird (DIN, 1992). Zur Gewinnung von Grundwasser ist daher immer der Bau von Brunnen mit geeigneten Förderanlagen erforderlich. Aufgrund der großen Sickerwege und der langen Verweilzeiten ist die Beschaffenheit des Grundwassers nur noch von den durchflossenen geologischen Formationen abhängig (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Eine weitere Form der unterirdischen Wasservor-

¹nach DVGW (2004)

kommen ist das Quellwasser, welches durch einen örtlich begrenzten, natürlichen Austritt von Grundwasser an die Erdoberfläche gekennzeichnet ist. Aufgrund der geringeren Überdeckung kann die Wasserqualität von Quellwasser insbesondere durch Starkniederschläge und Schneeschmelze beeinträchtigt werden. Zur Gewinnung von künstlich angereichertem Grundwasser wird Oberflächenwasser oder auch gereinigtes Abwasser über Versickerungsbecken, -gräben oder -brunnen in den Untergrund eingebracht, wo es sich mit echtem Grundwasser und gegebenenfalls Uferfiltrat vermischt (StLA-TH, 2010). Zur Wassergewinnung zählen neben der Gewinnungsanlage auch die Rohwasser- oder Brunnenleitungen, über die das Wasser zur Aufbereitungsanlage oder direkt in das Wasserverteilungssystem gelangt (vgl. Abbildung 2.1).

Die folgenden Aspekte der Wassergewinnung stehen in Wechselwirkung mit den Wasserverlusten eines Wasserversorgungssystems:

- Die Länge der Rohwasserleitungen und Brunnenleitungen innerhalb eines Wasserversorgungssystems ist, gemessen an der Gesamtlänge der Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen, üblicherweise sehr gering. Aus diesem Grund stellen die Wasserverluste innerhalb der Gewinnung in der Regel einen kleinen Anteil an den gesamten Wasserverlusten eines Systems.
- Die Tatsache, dass Rohwasserleitungen im Normalfall keine vermaschten sondern verzweigte Systeme sind, vereinfacht die Überwachung und Leckortung erheblich.
- In vielen Fällen sind die Rohwasserleitungen von der Wassergewinnung zur Wasseraufbereitung nicht oder nur unzureichend mit Durchflussmessgeräten bzw. Wasserzählern ausgestattet. Daher sind oft weder eine kontinuierliche Überwachung noch eine Bilanzierung der Verluste möglich.
- Wenn die Gestehungskosten für das Wasser sehr gering sind, weil weder Kosten für Aufbereitung noch für Pumpenergie anfallen (etwa bei Quellversorgern mit gravitärer Einspeisung ins Versorgungsgebiet) neigen WVU dazu, Maßnahmen des Wasserverlustmanagements zu vernachlässigen (Kölbl, 2008).

Wird Wasser aus unterschiedlicher Gewinnung in ein System eingespeist, kann es zweckmäßig sein, die jeweiligen Verluste separat zu betrachten, um deren finanzielle oder energetische Auswirkungen genauer quantifizieren zu können.

2.2.2.3 Aufbereitung

Ziel der Wasseraufbereitung ist es, aus Rohwasser Trinkwasser herzustellen, das die in der Trinkwasserverordnung festgelegten Grenz- und Richtwerte für bestimmte Inhaltsstoffe nicht überschreitet (BGBI, 2011). Weiterhin kann es erforderlich sein, das Wasser aus technischen oder betrieblichen Gründen zu behandeln, beispielweise um Betonaggressivität, Ablagerungen oder verstärkte Korrosion metallischer Anlagenteile zu verhindern. In Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Rohwasser sind mehr oder weniger aufwendige Verfahren zur Aufbereitung notwendig: Während Quellwasser und Grundwasser in der Regel keine oder nur eine einstufige Aufbereitung benötigen, sind für Oberflächenwasser oft mehrstufige Verfahren notwendig. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch. Tabelle 2.1 gibt Aufschluss über die verschiedenen Einsatzbereiche und den Energiebedarf üblicher Verfahren zur Wasseraufbereitung.

Die folgenden Aspekte der Wasseraufbereitung stehen in Wechselwirkung mit den Wasserverlusten eines Wasserversorgungssystems:

Tabelle 2.1: Aufbereitungsverfahren und ihr spezifischer Energiebedarf

| Verfahren | Einsatzbereich | Energiebedarf [Wh/m ³] |
|---------------------------------|--|--|
| Raum- und Oberflächenfiltration | Elimination der Trübstoffe Reduktion organischer Stoffe Eisen- und Manganelimination | 0,2 bis 0,6 |
| Aktivkohlefiltration | Adsorption organischer Substanzen Biofiltration, Reduktion organischer Stoffe | 0,2 bis 0,6 |
| Membranfiltration | Partikelelimination Elimination gelöster Stoffe mechanische Desinfektion | Mikro 40 bis 120 Ultra 30 bis 300 Nano 300 bis 500 |
| Ozonung | Oxidation und Desinfektion | 7 bis 60 |
| Desinfektion, Netzschutz | Desinfektion Verhinderung von Verkeimung im Leitungsnetz | Cl ₂ 0,1 bis 0,2 ClO ₂ 0,1 bis 0,6 UV 8 bis 20 |
| Belüftung | Geschmacksverbesserung durch höhere Sauerstoffkonzentration Oxidation von Eisen-II-Salzen | 30 bis 60 |
| Umkehrosmose | Meerwasserentsalzung | 2.000 bis 7.500 |
| Brüdenkompression | Meerwasserentsalzung | 7.000 bis 12.000 |

Quellen: nach Kilchmann u. a. (2004) und Teplitz-Sembitzky (2009)

- Mit wachsendem Aufwand für die Wasseraufbereitung erhöhen sich die Kosten der Wasserverluste und es steigt die Wirtschaftlichkeit und Attraktivität von Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung für ein WVU.
- Je aufwendiger und energieintensiver die Aufbereitung ist, desto größer sind auch die negativen ökologischen Auswirkungen von Wasserverlusten.
- Die korrosionschemischen Eigenschaften des aufbereiteten Wassers haben entscheidenden Einfluss auf die Aggressivität gegenüber metallischen Rohrwerkstoffen und zementhaltigen Auskleidungen und können zu Leckagen führen.

Aus den oben genannten Gründen kann es sinnvoll sein, die Wasserverluste innerhalb eines Wasserversorgungssystems separat für Wässer unterschiedlicher Herkunft zu bilanzieren.

2.2.2.4 Förderung

Zweck der Förderung ist es laut DVGW (1981), „dem Wasser so viel Energie zuzuführen, dass alle Verlusthöhen in Gewinnungsanlagen, Aufbereitung und Rohrnetz überwunden, höher gelegene Punkte im Versorgungsgebiet erreicht werden und an allen Stellen ausreichender Druck und ausreichende Menge zur Verfügung stehen“. Man unterscheidet in Förderanlagen mit nachgeschaltetem Wasserbehälter (Wasserturm oder Hochbehälter), Förderanlagen mit Druckbehälter sowie Förderanlagen ohne Behälter, deren Förderstrom sich an den jeweiligen

Wasserverbrauch anpassen muss. In allen Typen von Förderanlagen werden heute überwiegend elektrisch angetriebene Kreiselpumpen eingesetzt (DVGW, 1981). Plath und Wichmann (2011) haben in einer Studie den spezifischen Energieverbrauch von 14 deutschen WVU nach Anlagenteilen getrennt verglichen. In Abbildung 2.2 sind die Ergebnisse für die Anlagenteile Gewinnung (Verbrauch für Wassergewinnung und Betriebsgebäude der Wasserwerke), Aufbereitung und Förderung (Reinwasserförderung und Druckerhöhungsanlagen) dargestellt. Die Untersuchung zeigt, dass der Einsatz von Pumpen bei der Gewinnung und Förderung für den größten Teil des Energieverbrauchs der Trinkwasserversorgung verantwortlich ist und den Energieverbrauch der Wasseraufbereitung deutlich übersteigt. In Deutschland liegt der gesamte mittlere spezifische Energiebedarf laut Mutschmann und Stimmelmayer (2011) bei rund $0,6 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

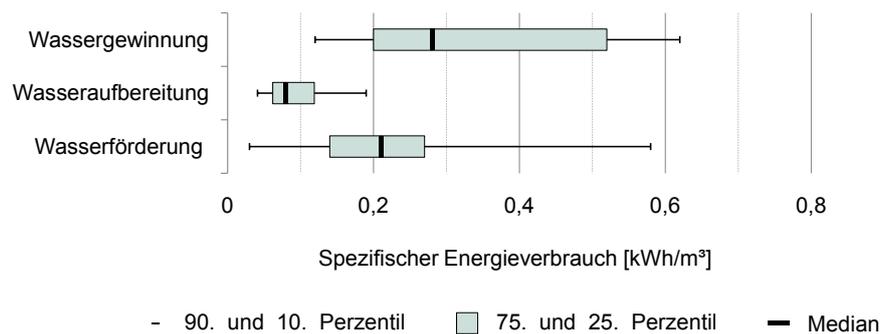


Abbildung 2.2: Spezifischer Energieverbrauch für Gewinnung, Aufbereitung und Förderung²

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen Studien aus Österreich und der Schweiz. So ergab eine Untersuchung von Kilchmann u. a. (2004) bei sechs WVU in der Schweiz, dass im Mittel 90 % des Stromverbrauchs den Förderanlagen zuzuschreiben sind. Demnach werden in der Schweizer Wasserversorgung für Gewinnung, Aufbereitung und Förderung bis zu $0,7 \text{ kWh}$ pro m^3 Wasser eingesetzt. Der Benchmarking-Abschlussbericht der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) kommt zu dem Ergebnis, dass die Netztopographie entscheidend für den Strombedarf ist und konstatiert je nach Hubhöhe einen Strombedarf für die Förderung von bis zu $0,9 \text{ kWh}/\text{m}^3$ (Theuretzbacher-Fritz u. a., 2006).

Die folgenden Aspekte der Wasserförderung stehen in Wechselwirkung mit den Wasserverlusten eines Wasserversorgungssystems:

- Der von einer Förderanlage erzeugte Druck in einer Zubringerleitung oder einem Versorgungsnetz beeinflusst direkt die Leckrate bestehender Leckagen.
- Druckstöße infolge Pumpenausfalls oder unsachgemäßem Anfahren und Abstellen einer Förderanlage können Schäden an Rohrleitungen und Armaturen verursachen, die zu Wasserverlusten führen.
- Aufgrund des hohen spezifischen Energiebedarfs hat die Wasserförderung einen besonders großen Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen der durch reale Verluste verloren gegangenen Wassermenge.

²nach Plath und Wichmann (2011)

2.2.2.5 Speicherung

In nahezu allen Wasserversorgungssystemen werden Speicherbehälter verwendet, um Verbrauchsschwankungen auszugleichen, Druckbereiche in Versorgungszonen festzulegen, Wasser verschiedener Herkunft zu mischen sowie eine Löschwasser- und Betriebsreserve bereitzuhalten (Merkl, 2011). Wasserbehälter werden unterschieden in Hochbehälter und Wassertürme, Wasserbehälter in Tieflage sowie Druckbehälter. Eine deutschlandweite Erhebung, in der insgesamt 5.089 Behälter erfasst wurden, ergab laut Roth (1998), dass circa 94 % der Trinkwasserbehälter in erdüberdeckter und teilweise erdüberdeckter Bauweise ausgeführt sind und Wassertürme nur einen geringen Anteil des Speichervolumens ausmachen. Wasserverluste aus Speicherbehältern scheinen in Deutschland eine untergeordnete Rolle zu spielen. Literatur zu Schäden an Speicherbehältern behandelt in der Regel den Umgang mit hygienischen Problemen, nur sehr selten werden Undichtigkeiten thematisiert.

Die folgenden Aspekte der Wasserspeicherung stehen in Wechselwirkung mit den Wasserverlusten eines Wasserversorgungssystems:

- An Wasserbehältern können Wasserverluste infolge von Undichtheiten oder Überlaufens auftreten.
- Infolge der erdüberdeckten Bauweise sind Undichtheiten an Behältern nur schwierig festzustellen.
- Hochbehälter und Wassertürme bestimmen oft das Druckniveau innerhalb einer Versorgungszone und beeinflussen somit auch die Wasserverlustrate von Leckagen.

2.2.2.6 Verteilung

Die „Hauptbestandteile des Systems zur Wasserverteilung sind die Rohrleitungen“, die innerhalb eines Versorgungsgebiets in Zubringer- (ZW), Haupt- (HW), Versorgungs- (VW) und Anschlussleitungen (AW) unterschieden werden können (Rautenberg, 2011). Weitere Bestandteile sind Verbindungsstücke, Formstücke für Richtungsänderungen und Abzweige sowie Armaturen und Vorrichtungen für den Brandschutz (Hydranten). Während sich Zubringerleitungen durch eine geringe Anzahl an Armaturen und Formstücken und Durchmesser größer DN 500 auszeichnen, finden sich in den Versorgungsnetzen hauptsächlich kleinere Rohrdurchmesser mit hohen Armaturen- und Anschlussdichten (Merkl, 2008). Die Gesamtlänge des deutschen Trinkwassernetzes betrug im Jahr 2011 ohne Berücksichtigung der Hausanschlussleitungen laut ATT u. a. (2011) circa 530.000 km. Die Gesamtlänge der Anschlussleitungen beträgt schätzungsweise weitere 150.000 bis 170.000 km.

Teile des Rohrnetzbestands gehen bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts zurück. Um die Funktionstüchtigkeit der Netze zu erhalten, wurden in Deutschland zwischen 1995 und 2003 jährlich circa 1,6 Milliarden € in die Rohrnetze investiert, davon 93 % in die Erneuerung bestehender Leitungen (Lauruschkus u. a., 2006). Dennoch kritisieren Fachverbände wie z.B. der Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) und der DVGW, dass die aktuelle jährliche Erneuerungsrate von 0,9 % nicht ausreichend ist, um den Zustand der Trinkwassernetze langfristig zu erhalten (Kröfges, 2009). Zu geringe Erneuerungsraten bewirken einen Rehabilitationsstau, der zu einem Anstieg der Schadenshäufigkeit, erhöhten Wasserverlusten und hohen Folgekosten infolge steigenden Reparatur- und Rehabilitationsbedarfs führen kann (Roscher u. a., 2009).

Die Altersstruktur der Netze erklärt auch die Vielfalt verwendeter Rohrmaterialien: Während zu Beginn der neuzeitlichen Wasserversorgung ausschließlich Graugussrohre verwendet wurden, kamen seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts Stahlrohre und wenig später Beton-

und Asbestzementrohre zum Einsatz. Seit etwa 1950 drängten verstärkt Rohre aus Duktileguss und Kunststoff auf den Markt, so dass heutige Rohrnetze immer aus einem Konglomerat unterschiedlicher Rohrmaterialien bestehen (Roscher u. a., 2009). Alle Leitungen unterliegen der Alterung, die im allgemeinen zu einer Zustandsverschlechterung führt. Dennoch sagt das Durchschnittsalter eines Rohrnetzes nicht zwingend etwas über dessen Zustand aus, da sich die verschiedenen Werkstoffe - in Wechselwirkung mit zahlreichen inneren und äußeren Beanspruchungen - in ihrem Alterungsverhalten unterscheiden (Herz, 1996).

Die folgenden Aspekte der Wasserverteilung stehen in Wechselwirkung mit den Wasserverlusten eines Wasserversorgungssystems:

- **Länge:** Je größer die Ausdehnung eines Rohrnetzes, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Schäden, die zu Wasserverlusten führen.
- **Anschlussdichte:** Mit zunehmender Anzahl von Anschlüssen je Leitungskilometer steigt die Anzahl potentieller Schwachstellen und damit das Risiko von Wasserverlusten.
- **Versorgungsdruck:** Höhe und Variabilität des Drucks spielen eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Leckagen und beeinflussen zudem die Leckrate.
- **Rohrdurchmesser:** Laut Roscher u. a. (2009) haben kleinere Rohrdurchmesser - insbesondere bei spröden Werkstoffen - eine höhere Schadensrate als Leitungen größerer Durchmesser.
- **Alters- und Materialstruktur:** Obwohl das zunehmende Alter einer Leitung nicht zwangsläufig zu höheren Verlusten führt, sind altersbedingte Verschleißerscheinungen und materialspezifische Schadensursachen als Ursachen realer Wasserverluste zu berücksichtigen.

2.2.3 Vertikale Ebenen

Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Anlagenteilen verfügt ein Wasserversorgungssystem auch über eine vertikale Struktur, die sich aus unterschiedlichen Ebenen zusammensetzt. Diese fünf Ebenen wurden vom Smart Water Networks Forum (SWAN), einem Interessenverband von Industrieunternehmen aus dem Bereich Wasserversorgung und Datentechnologie, folgendermaßen beschrieben (SWAN, 2012):

Ebene 1 - Physische Komponenten Die physische Ebene setzt sich aus den sogenannten „nassen“ Komponenten zusammen: Rohre, Pumpen, Armaturen, Speicherbehälter und Hausanschlussleitungen. Hierbei handelt es sich um „datenlose“ Komponenten, die mechanische oder hydraulische Aufgaben übernehmen und keine eigenen Datenschnittstellen besitzen. Die Komponenten der physischen Ebene werden mittels Anlagen aus der nächsthöheren Ebene kontrolliert.

Ebene 2 - Messen, regeln und steuern Gemäß SWAN (2012) besteht diese Ebene zum Einen aus Sensoren, die verschiedene Parameter des transportierten Wassers messen (z.B. Durchfluss, Druck, Füllstand, Temperatur, Wassergüteparameter oder akustische Informationen) und zum Anderen aus fernbedienten Instrumenten zur Steuerung und Regelung verschiedener Komponenten wie Pumpen oder Armaturen. Die Elemente dieser Ebene stellen also die Schnittstelle zwischen der Datenhaltung eines WVU und seinem physischen Rohrnetz dar und verfügen typischerweise über ein nasses Ende (Druckaufnehmer) und ein trockenes Ende (Datenausgang eines Sensors bzw. Dateneingang eines Reglers).

Ebene 3 - Datensammlung und -übertragung Die dritte Ebene ist die erste trockene Ebene ohne direkten Kontakt zum transportierten Medium. Die Elemente dieser Ebene sind verantwortlich für die Sammlung, Übertragung und Speicherung von Messdaten sowie die Übermittlung von Steuerungs- und Regelungsbefehlen. Hierzu zählen beispielsweise Datenlogger oder Prozessleitsysteme, die keine eigenen Daten erheben oder diese in nennenswerter Weise aufbereiten. Es ist zu beachten, dass aufgrund der hohen Instrumentierungskosten bei weitem nicht alle Messdaten automatisiert erfasst und übertragen werden. Es kommt häufig vor, dass zum Beispiel die Zählerstände von Durchflussmessgeräten in festen Intervallen von Mitarbeitern vor Ort ausgelesen und manuell in Datenbanken übertragen werden.

Ebene 4 - Datenmanagement und -visualisierung In dieser Ebene werden Daten aus den unterschiedlichsten Quellen abgelegt, aufbereitet und stehen zentralen System sowie den Nutzern zur Verfügung (SWAN, 2012). Es bestehen Schnittstellen sowohl zur Datensammlung auf der einen Seite als auch zu menschlichen Anwendern auf der anderen Seite. In WVU trifft man in dieser Ebene in der Regel eine Mischung aus nicht wasserspezifischer Standardsoftware sowie maßgeschneiderten oder selbstentwickelten Lösungen an. Hierzu gehören neben Datenbanken und Tabellenkalkulationsprogrammen beispielweise Anwendungen zur Visualisierung von Datenströmen in Prozessleitsystemen, Geografische Informationssysteme und Netzkataster. In dieser Ebene gibt es auch Schnittstellen zu Daten, die aus anderen Bereichen eines WVU stammen, etwa aus der Buchhaltung, dem Anlagenmanagement oder dem Auftragszentrum.

Ebene 5 - Datenverknüpfung und -analyse In der obersten Ebene werden verschiedenste Daten miteinander kombiniert um Erkenntnisse zu gewinnen, die aus der reinen Sammlung und Visualisierung der Daten nicht ersichtlich sind. So werden hochwertige Informationen generiert, die beispielsweise automatisierte Reaktionen auf Systemveränderungen, Beurteilungen des Ist-Zustands oder Prognosen für das Rohrnetz ermöglichen. Zu den eingesetzten Methoden und Werkzeugen zählen hydraulische Modelle, Softwarelösungen zur Zustandsbewertung, Infrastrukturmanagement und Rehabilitationsplanung von Rohrnetzen, Werkzeuge zur Optimierung von Pumpensteuerung und Energieeffizienz und andere Entscheidungssupportsysteme. SWAN (2012) stellt fest, dass die Ebene der Datenverknüpfung und -analyse die am wenigsten weit entwickelte Ebene darstellt, da sie am weitesten von den physischen Bestandteilen eines Wasserversorgungssystems entfernt ist und auf die kontinuierliche Versorgung mit zuverlässigen und vollständigen Daten aus den anderen Ebenen angewiesen ist.

Andererseits ist die große Bedeutung aktueller und vollständiger Informationen für die erfolgreiche Bekämpfung von Wasserverlusten unbestritten, wie Laber (2010) zeigt: „Eine unverzichtbare Voraussetzung zur Erkennung und Bekämpfung von Wasserverlusten ist eine sehr gute Kenntnis des bestehenden Wassernetzes. Die Errichtung von Leitungsnetzen erfolgt zumeist über Jahrzehnte und häufig finden sich wichtige Informationen wie etwa die genaue Lage, Material und Alter von Rohrleitungen oder das Vorhandensein von Armaturen erst nach langem Suchen auf mehr oder weniger verstaubten Plänen in den Archiven der Netzbetreiber. Stand der Technik ist ein digitaler, GIS-fähiger Leitungskataster, der es dem Betriebspersonal auf Knopfdruck ermöglicht, sämtliche Informationen über das Leitungsnetz abzufragen und auszuwerten. Der digitale Leitungskataster ist eine wichtige Grundlage für ein erfolgreiches Wasserverlustmanagement.“

2.3 Strukturen realer Wasserversorgungssysteme

2.3.1 Allgemeines

In realen Wasserversorgungssystemen sind die Grenzen zwischen den einzelnen Anlagenteilen nicht immer so einfach zu bestimmen wie in der oben genannten Definition. Dies hat zwei Ursachen: Häufig sind in realen Wasserversorgungssystemen verschiedene Anlagenteile miteinander vermischt, zum Beispiel Gewinnung, Förderung und Verteilung und lassen sich für die Wasserbilanz nicht voneinander trennen. Die zweite Ursache sind fehlende Messgeräte zur Registrierung der Volumenströme zwischen unterschiedlichen Anlagenteilen.

Eindeutig festgelegte Systemgrenzen sind aber Voraussetzung für die Durchführung einer räumlich diskretisierten Wassermengenanalyse. Im Folgenden werden daher die typischen Strukturen realer Wasserversorgungssysteme mit Hinblick auf die Durchführung von Wasserbilanzen beleuchtet.

2.3.2 Rohwassersysteme

Rohwassersysteme befinden sich zwischen dem Ort der Wassergewinnung und der Wasseraufbereitungsanlage. Oftmals können Rohwassersysteme nicht in der Wasserbilanz erfasst werden, da die Einspeisemenge nicht gemessen wird. Dies trifft insbesondere für Quellwasserfassungen zu, während an Tiefbrunnen in der Regel die geförderte Wassermenge gemessen wird.

2.3.3 Transportsysteme

Praktisch jedes Wasserversorgungssystem besteht aus einem Transportsystem sowie einer oder mehreren Versorgungszonen. Im Transportsystem wird das Wasser über Zubringer- oder Fernleitungen (ab mindestens 20 km Länge, (Merkl, 2008)) zu den Versorgungszonen oder zu den Übergabestellen an Weiterverteiler transportiert. Die Übergabe kann an einem Wasserbehälter oder mittels eines Abzweigs stattfinden. Direkte Anschlüsse von Verbrauchern an die Zubringer- und Fernleitungen sind die Ausnahme. Dennoch kann es vorkommen, dass Transportleitungen durch Versorgungszonen hindurchführen und an einer oder mehreren Stellen über offene Abzweige verbunden sind, so dass eine separate Bilanzierung nicht mehr möglich ist.

Die Rohrnetze von Fernwasserversorgern beschränken sich in der Regel auf das Transportsystem, welches „das Wasser über größere Entfernungen einem oder mehreren Wasserversorgungsgebieten“ zuführt (DIN, 1983). In Baden-Württemberg wird beispielsweise ca. ein Drittel des Trinkwassers von den vier großen Fernwasserzweckverbänden Bodensee-Wasserversorgung (BWV), Landeswasserversorgung, Wasserversorgung Nordostwürttemberg und Wasserversorgung Kleine Kinzig bereitgestellt (Haakh, 2006). In diesen reinen Transportsystemen sind Wasserverluste verhältnismäßig einfach zu bilanzieren, da die Abgaben an Weiterverteiler mit (oftmals zwei in Serie installierten) geeichten Wasserzählern registriert werden und nur geringe Mengen für betriebliche oder andere Zwecke ungemessen entnommen werden. Auch bei der Gruppenwasserversorgung (gemeinsame zentrale Wasserversorgung mehrerer Gemeinden, DIN (1983)) und Verbundwasserversorgung (zentrale Wasserversorgungen von Gemeinden, die miteinander verbunden sind, DIN (1983)) können die Transportsysteme in der Regel separat von den Verteilungssystemen bilanziert werden.

2.3.4 Verteilungssysteme

In den Verteilungssystemen wird das Wasser mittels Versorgungs-, Haupt-, und Anschlussleitungen zu den Entnahmestellen der angeschlossenen Verbraucher gebracht. In Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten gliedert sich das Verteilungssystem eines WVU in hydraulisch voneinander getrennte Untereinheiten, die je nach Funktion und Sprachgebrauch als Versorgungszonen, Druckzonen oder Rohrnetzbezirke bezeichnet werden.

Da sich die einzelnen Zonen hinsichtlich der Ursachen und der Höhe der Wasserverluste drastisch voneinander unterscheiden können, ist eine differenzierte Ermittlung der Wasserverluste oftmals sinnvoll. Schwierigkeiten können sich hierbei ergeben, wenn Wasserströme zwischen benachbarten Zonen nicht gemessen werden. Dies kann unterschiedliche Gründe haben, beispielsweise undichte oder versehentlich geöffnete Zonentrennschieber, ungemessene temporäre Notversorgungen oder fehlende Messgeräte.

2.3.5 Einfluss der Struktur auf die Wassermengenanalyse

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass die Gliederung von realen Wasserversorgungssystemen in voneinander unabhängige Anlagenteile eine komplexe Aufgabe darstellen kann. Die Gliederung ist aber notwendig, um eine räumlich differenzierte Betrachtung der Wasserverluste und ihrer Ursachen durchzuführen. Außerdem werden Kennzahlen für die Bewertung der Wasserverluste verfälscht, wenn beispielsweise eine lange Zubringerleitung (mit geringen Wasserverlusten) gemeinsam mit einem relativ kleinen Verteilungssystem mit hohen Wasserverlusten als eine Einheit analysiert wird (Osmancevic, 2010). Daher werden geeignete Konzepte und Methoden benötigt, um jedes zu untersuchende Anlagenteil zu separieren und alle dort eingespeisten und entnommenen Wassermengen zu quantifizieren.

2.4 Kennzahlen zur Beschreibung von Wasserversorgungssystemen

2.4.1 Allgemeines

Um verschiedene Wasserversorgungssysteme miteinander vergleichen zu können, stehen eine Reihe von Kennzahlen zur Verfügung, deren Ermittlung in diesem Abschnitt näher betrachtet werden soll. Beim Vergleich von Wasserverlusten zwischen verschiedenen Versorgungszonen eines Wasserversorgungssystems oder zwischen unterschiedlichen WVU dienen diese Kennzahlen der Positionierung innerhalb der jeweiligen Vergleichsgruppe.

2.4.2 Beschreibung der hydraulischen Komponenten

2.4.2.1 Spezifische Rohrnetzeinspeisung

Die spezifische Rohrnetzeinspeisung q_N [$m^3/km/a$] eines Versorgungsgebiets ist laut DVGW (2003a) ein Maß für die Versorgungsstruktur bzw. Urbanität eines Rohrnetzes und berechnet sich gemäß Gleichung 2.1 wie folgt:

$$q_N = Q_N/L_N \quad (2.1)$$

Darin ist Q_N die Rohrnetzeinspeisung (Definition s. Abschnitt 3.2.2) in [m^3/a] und L_N [km] die Gesamtlänge des Rohrnetzes ohne Berücksichtigung der Anschlussleitungen. Das

DVGW Arbeitsblatt W 392 ordnet Wasserversorgungsnetze anhand der spezifischen Rohrnetzspeisung drei unterschiedlichen Bereichen zu, wie Tabelle 2.2 zeigt.

Tabelle 2.2: Versorgungsstruktur von Rohrnetzen

| Bereich | Versorgungsstruktur | spez. Rohrnetzspeisung [$m^3/km/a$] |
|---------|---------------------|--|
| 1 | großstädtisch | $q_N > 15.000$ |
| 2 | städtisch | $5.000 \leq q_N \leq 15.000$ |
| 3 | ländlich | $q_N < 5.000$ |

Quelle: DVGW (2003a)

Laut DVGW (2003a) bewegt sich die spezifische Rohrnetzspeisung q_N in einer Bandbreite von 2.000 bis 40.000 $m^3/km/a$. Es ist zu beachten, dass innerhalb eines Versorgungsgebiets Versorgungszonen unterschiedlicher Versorgungsstruktur liegen können.

2.4.2.2 Wasserabgabe

Der Begriff der Wasserabgabe wird in der Literatur häufig verwendet, um Wasserversorger nach ihrer Größe zu ordnen. Sie ergibt sich nach Hug und Pielorz (2010) aus der „Wasserabgabe an alle Verbraucher einschließlich Industrie und Landwirtschaft“. Übliche Größenklassen sind:

- Wasserabgabe $< 0,5 \text{ Mio. } m^3/a$
- Wasserabgabe $0,5 - 1,0 \text{ Mio. } m^3/a$
- Wasserabgabe $1,0 - 5,0 \text{ Mio. } m^3/a$
- Wasserabgabe $5,0 - 10,0 \text{ Mio. } m^3/a$
- Wasserabgabe $> 10,0 \text{ Mio. } m^3/a$

Das Statistische Bundesamt unterteilt in seiner Fachserie 19, Reihe 2.1.1 die WVU mit einer Wasserabgabe unter $0,5 \text{ Mio. } m^3/a$ in weitere acht Klassen (StBA, 2013).

2.4.2.3 Metermengenwert

Der Metermengenwert ist ein Indikator für die Auslastung des Leitungsnetzes. Er gibt an, wie viel Wasser jährlich pro Meter Leitungsnetz an Verbraucher geliefert wird und ist somit ein Maß für die Vertriebskosten: Bei einer höheren Abgabe pro Meter Leitungsnetz ist die Versorgung in der Tendenz kostengünstiger als bei einer niedrigeren Menge. Oelmann u. a. (2009) kommen allerdings zu dem Ergebnis, dass der Metermengenwert isoliert betrachtet, „einen nur sehr eingeschränkten Aussagewert“ besitzt. Der Metermengenwert berechnet sich gemäß Gleichung 2.2.

$$q_m = \frac{Q_A}{1000 \times L_N} \quad (2.2)$$

Darin ist q_m der Metermengenwert in [$m^3/m/a$], Q_A die Rohrnetzabgabe in [m^3/a] und L_N die Länge des Rohrnetzes in [km]. Für kleinere Gemeinden liegt q_m in der Regel unter $10 \text{ m}^3/m/a$, Städte und Großstädte liegen üblicherweise im Bereich 10 bis $30 \text{ m}^3/m/a$ während Fern- und Gruppenwasserversorger Werte über $200 \text{ m}^3/m/a$ erreichen können (Merkel u. a., 2011).

2.4.2.4 Spezifische Wasserabgabe je Einwohner und Tag

Diese Kennzahl gibt Auskunft über die durchschnittliche pro-Kopf Wasserabgabe eines Versorgungsgebiets und steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den spezifischen Kosten des abgegebenen Wasser. Eine niedrige spezifische Wasserabgabe „führt aufgrund des hohen Fixkostenanteils in der Wasserversorgung zu einem höheren spezifischen Gesamtaufwand pro m^3 abgegebener Wassermenge“ (Hug und Pielorz, 2010). Die spezifische Wasserabgabe kann entweder für alle Verbraucher einschließlich Industrie und Landwirtschaft oder separat für Haushalte und Kleingewerbe berechnet werden. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die Höhe der spezifischen Wasserabgabe in Deutschland für unterschiedliche Unternehmensgrößen. Tabelle 2.3 zeigt, dass mit steigender Wasserabgabe der Anteil an Großverbrauchern aus Industrie, Landwirtschaft oder Tourismus ebenfalls zunimmt. Während die spezifische Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe bis zu einer Wasserabgabe von 10 Millionen m^3/a stabil bleibt, nimmt sie bei sehr großen WVU zu.

Tabelle 2.3: Spezifische Wasserabgabe in Deutschland 2010

| Wasserabgabe | Anzahl WVU | Spez. Wasserabgabe inkl. Industrie | Spez. Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe |
|-----------------|------------|------------------------------------|--|
| [Mio. m^3/a] | | [l/E/d] | [l/E/d] |
| < 0,5 | 4.125 | 134 | 116 |
| 0,5 – 1,0 | 730 | 139 | 117 |
| 1,0 – 5,0 | 785 | 145 | 117 |
| 5,0 – 10,0 | 104 | 151 | 117 |
| > 10,0 | 78 | 168 | 129 |

Quelle: nach StBA (2013)

2.4.2.5 Versorgungsdruck

Die Druckverhältnisse in einem Wasserversorgungsnetz haben entscheidenden Einfluss auf die Entstehung von Schäden und die Höhe realer Wasserverluste, wie in Abschnitt 3.3.3.8 gezeigt wird. Deshalb empfiehlt unter anderem die *American Water Works Association* (AWWA), dass WVU die Druckverhältnisse in ihren Rohrnetzen genau kennen sollten, um das Potenzial von Druckmanagement beurteilen zu können und um die Höhe der unvermeidbaren Wasserverluste (*UARL*, s. Abschnitt 4.5.3.4) ermitteln zu können (AWWA, 2009). Da der Druck innerhalb eines Wasserversorgungsnetzes sowohl zeitlich als auch räumlich starken Schwankungen unterliegen kann, sollte möglichst ein Durchschnittswert für jede einzelne Zone ermittelt werden. Für die Bestimmung des mittleren Versorgungsdrucks P_m einer Versorgungszone stehen je nach Datenlage mehrere Methoden zur Verfügung.

Verwendung eines hydraulischen Modells Falls ein kalibriertes hydraulisches Modell zur Verfügung steht, können die Drücke an allen Modellknoten des Netzes unter verschiedenen Lastfällen berechnet werden. Der mittlere Versorgungsdruck P_m in [m] kann als Mittelwert der Drücke P_i aller n Modellknoten gemäß Gleichung 2.3 berechnet werden.

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (2.3)$$

Der durchschnittliche Druck an einem beliebigen Modellknoten kann entweder über die Simulation einer Zeitreihe (z.B. über 24 Stunden) oder die stationäre Berechnung der Wasserabgabe zum Zeitpunkt des mittleren Stundenbedarfs berechnet werden. Der mittlere Stundenbedarf wird gemäß DVGW Arbeitsblatt W 410 ermittelt (DVGW, 2007a).

Ermittlung anhand der gewichteten mittleren Geländehöhe Falls kein hydraulisches Modell verfügbar ist, schlagen McKenzie u. a. (2002) und AWWA (2009) vor, zunächst die gewichtete mittlere Geländehöhe der zu betrachtenden Zone zu ermitteln. Sind die Höhen der Hausanschlüsse bekannt, kann die mittlere Geländehöhe H_{Gm} (bezogen auf die Höhen H_n von n Hausanschlüssen) mittels Gleichung 2.4 ermittelt werden.

$$H_{Gm} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (2.4)$$

Ist dies nicht der Fall, können die Hausanschlüsse lagemäßig zwischen jeweils zwei Höhenlinien eingeordnet werden, die Anzahl der Hausanschlüsse zwischen zwei Höhenlinien mit deren Mittelwert multipliziert werden und daraus anschließend die gewichtete mittlere Geländehöhe H_{Gm} gebildet werden. Anschließend wird eine geeignete Messstelle an einem Punkt (so genannter *AZP* für engl. *Average Zone Point*) im Zentrum der untersuchten Versorgungszone gewählt, der sich auf H_{Gm} befindet und dort über einen möglichst langen Zeitraum der Druck gemessen. Der gemessene Druck kann stellvertretend als mittlerer Versorgungsdruck P_m des Untersuchungsgebiets verwendet werden (McKenzie u. a., 2002).

Annahme für flache Versorgungsgebiete In flachen Versorgungsgebieten kann der mittlere Versorgungsdruck P_m anhand von Messungen an einer ausreichend großen Anzahl Hydranten, die gleichmäßig über das zu untersuchende Versorgungsgebiet verteilt sind, berechnet werden (AWWA, 2009).

2.4.3 Beschreibung der physikalischen Komponenten

2.4.3.1 Hausanschlussdichte

Roscher u. a. (2009) stellen fest, dass die Anzahl von Schäden auf Anschlussleitungen wesentlich höher ist, als die Schadensrate von Haupt- und Versorgungsleitungen. Zahlen von Niehues (2006) bestätigen diese Annahme: Im Zeitraum 1997 bis 2004 ergeben sich für Hausanschlussleitungen Werte zwischen 0,6 und 1,0 Schäden pro km und Jahr während bei Haupt- und Versorgungsleitungen durchschnittlich weniger als 0,15 Schäden pro km und Jahr beobachtet wurden.

Folglich haben Hausanschlussleitungen einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der realen Wasserverluste. Als Kennzahl wird die Hausanschlussdichte D_{AL} [$1/km$] verwendet, die als Verhältnis der Anzahl n_{AL} [-] der Anschlüsse zur Rohrnetzlänge L_N [km] ausgedrückt wird (s. Gleichung 2.5).

$$D_{AL} = \frac{n_{AL}}{L_N} \quad (2.5)$$

2.4.3.2 Absperrschieberdichte

Analog zur Hausanschlussdichte kann die Absperrschieberdichte D_{AS} [$1/km$] gebildet werden, die als Verhältnis der Anzahl n_{AS} [-] der Absperrschieber zur Rohrnetzlänge L_N [km] ausgedrückt wird (s. Gleichung 2.6).

$$D_{AS} = \frac{n_{AS}}{L_N} \quad (2.6)$$

Die Schieberdichte kann als Indikator für die Versorgungssicherheit eines Wasserversorgungsnetzes gewertet werden. Je kürzer die Abstände zwischen den Schiebern sind, desto kleiner lässt sich im Falle eines Rohrbruches der betroffene Leitungsabschnitt eingrenzen, um damit die Anzahl der nicht versorgten Hausanschlüsse zu minimieren. Das DVGW Merkblatt W 400-1 empfiehlt bei geschlossener Bebauung den Einbau von drei bis vier Absperrschiebern pro Kilometer Netzlänge (DVGW, 2004).

2.4.3.3 Altersstruktur

Mittleres Rohrnetzalter Um die Entwicklung der Altersstruktur eines Rohrnetzes nachverfolgen zu können, wird in der Regel das mittlere Rohrnetzalter bestimmt. Dabei handelt es sich gemäß Definition der Technischen Mitteilung W401 des DVGW (1997) um das „gewichtete, arithmetische Mittel des Alters einer Leitungsgruppe oder des gesamten Netzes zu einem bestimmten Zeitpunkt“. Das mittlere Rohrnetzalter berechnet sich anhand Gleichung 2.7.

$$A_n = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \times (n - i + 1)}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (2.7)$$

Darin bezeichnet n das Bezugsjahr auf das sich das Alter bezieht, i das Baujahr eines Leitungsjahrgangs und A_n das mittlere Rohrnetzalter zum Zeitpunkt n . Die Gesamtlänge eines Leitungsjahrgangs wird als l_i [km] angegeben. Das nach Leitungslängen gewichtete mittlere Rohrnetzalter reicht als Kennzahl in der Regel nicht aus, da es sich bei der Altersstruktur meist um asymmetrische, schiefe Verteilungen handelt, die durch den Mittelwert nur unzureichend beschrieben werden (Ehrenberg, 1986).

Average Network Age Index (NAX) Zur besseren Beschreibung und Vergleichbarkeit der Alterstruktur unterschiedlicher Rohrnetze haben Neunteufel u. a. (2008) den „Average Network Age Index“ (NAX) entwickelt. Dieser berücksichtigt, dass unterschiedliche Leitungsgruppen (s. Abschnitt 2.4.3.4) auch eine unterschiedliche Lebenserwartung haben. Der NAX beschreibt den aktuell erreichten Anteil in [%] der erwarteten Lebensdauer eines Rohrnetzes oder einer Leitungsgruppe. Für n Leitungsgruppen berechnet sich der NAX mittels Gleichung 2.8.

$$NAX = \sum_{i=1}^n l_i \times \frac{A_{act,i}}{A_{ref,i}} \quad (2.8)$$

Es sind l_i [%] der Längenanteil einer Leitungsgruppe an der Gesamtlänge des Rohrnetzes, $A_{act,i}$ [a] das aktuelle mittlere Alter und $A_{ref,i}$ [a] das Referenzalter einer Leitungsgruppe. Das Referenzalter ist nicht mit der betriebswirtschaftlichen oder technischen Lebensdauer gleichzusetzen, sondern ist eine empirische Größe und entspricht laut Neunteufel u. a. (2008) dem Zeitpunkt, zu dem es in einer bestimmten Leitungsgruppe typischerweise zu Schadenshäufungen kommt. Das Referenzalter ist individuell für den Leitungsbestand eines WVU zu bestimmen, zum Beispiel anhand der altersbezogenen Schadensraten (s. Abschnitt 2.4.3.6). Da neben dem Material auch der Durchmesser die Lebenserwartung einer Leitung beeinflusst, kann das Referenzalter einer Leitungsgruppe auch separat für kleine und große Durchmesser definiert werden.

2.4.3.4 Materialverteilung

Die Materialverteilung von Rohrnetzen ist in der Regel sehr heterogen und individuell für jedes einzelne Versorgungsgebiet. Im Leitungskataster können zudem - in Abhängigkeit von der Unternehmenspolitik und der Arbeitsweise der zuständige Bearbeiter - voneinander abweichende Bezeichnungen für Leitungen gleichen Materials angetroffen werden. Es ist daher sinnvoll, Leitungsgruppen zu bilden, die die wichtigsten Rohrmaterialien zusammenfassen. Bei der Bildung der Leitungsgruppen sollte auch das Baujahr in Betracht gezogen werden, da die Fortschritte bei den verwendeten Materialien (s. auch Abschnitt 3.3.3.2) sowie den Verbindungs- und Verlegetechniken sich auf das Nutzungsdauerverhalten auswirken (DVGW, 1997).

In Anlehnung an die technische Mitteilung W401 des DVGW (1997) wird die folgende Gruppeneinteilung vorgeschlagen:

- Grauguss (GG) bis Baujahr 1930, Sandguss, Stemmmuffen
- Grauguss ab Baujahr 1931, Schleuderguss, Schraubmuffen
- Duktulguss (GGG) bis Baujahr 1975, ohne ausreichende Umhüllung und Auskleidung
- Duktulguss ab Baujahr 1976, ZM-Auskleidung, Verzinkung, Außenschutz n. DIN 30674
- Stahl (St) bis Baujahr 1970, mit oder ohne Bitumentumhüllung, ohne Auskleidung
- Stahl ab Baujahr 1971, mit Umhüllung und Auskleidung und ggf. zusätzlichem kathodischen Korrosionsschutz (KKS)
- Polyethylen (PE) - Leitungsgruppen entsprechend Material, Verbindungsart und ortsspezifischer Kriterien
- Polyvinylchlorid (PVC) - Leitungsgruppen entsprechend Material, Verbindungsart und ortsspezifischer Kriterien
- Asbestzement (AZ) - Leitungen aus Faser- oder Asbestzement
- Beton - Leitungen aus Stahlbeton und Spannbeton
- Blei - Hausanschlussleitungen aus Blei
- Sonstige - sonstige oder unbekannt Materialien

Die vorgeschlagenen Leitungsgruppen sind lediglich als Richtwerte zu sehen, die an die spezifische Situation jedes WVU angepasst werden sollten. Herz (2002) empfiehlt, nur Leitungsgruppen zu berücksichtigen, die mehr als 1 % des gesamten Leitungsbestands umfassen, da sich für kleinere Kategorien die Nutzungsdauer nicht mehr konsistent abschätzen lässt.

2.4.3.5 Schadensrate

Als Maß für den Zustand eines Wasserversorgungsnetzes schlägt der DVGW die Verwendung der Schadensrate vor (DVGW, 2006a). Dabei können separate Schadensraten für Haupt- und Versorgungsleitungen (Kennzahl *Op31*, in *Schäden/km/a*) und für Anschlussleitungen (Kennzahl *Op32*, in *Schäden/1.000 Anschlüsse/a*) ermittelt werden. Als Richtwerte für die Beurteilung schlägt der DVGW drei Klassen vor, die in Tabelle 2.4 wiedergegeben werden.

Die in Tabelle 2.4 angegebenen Richtwerte gelten laut DVGW (2006a) „für Rohrnetze, die über lange Zeiträume gewachsen sind und aus unterschiedlichen Werkstoffen und Rohrklassen bestehen“. Für die Bewertung von Zubringerleitungen schlägt der DVGW (2006a) sehr viel strengere Kriterien vor und empfiehlt Grenzwerte kleiner 10 % der in Tabelle 2.4 genannten Richtwerte.

Der DVGW schlägt keine Richtwerte für Schäden an Armaturen vor. Es ist aber zweckmäßig, diese analog zu den Anschlussleitungen in Schäden je 1.000 Armaturen und Jahr

Tabelle 2.4: Richtwerte für Schadensraten

| Schadensrate | Haupt- und Versorgungsleitungen [Schäden/km/a] | Anschlussleitungen [Schäden/1.000 Anschlüsse/a] |
|--------------|---|--|
| Niedrig | $\leq 0,1$ | ≤ 5 |
| Mittel | $> 0,1$ bis $\leq 0,5$ | > 5 bis ≤ 10 |
| Hoch | $> 0,5$ | > 10 |

Quelle: nach DVGW (2006a)

auszuwerten, wie dies auch Niehues (2006) tut. Die Auswertung der DVGW Schadenstatistik von 1997 bis 2004 zeigt, dass die Schadensrate S_{AR} über alle Armaturen sich zwischen 9 und 14 Schäden pro 1.000 Armaturen und Jahr bewegt (s. auch Abschnitt 3.3.3.11). Bezogen auf die Rohrnetzlänge entspricht dies einem Mittelwert von ca. 0,19 Armaturenschäden pro km und Jahr.

Generell sollen für die Ermittlung der Schadensraten die jährlichen Mittelwerte über einen Zeitraum von mindestens fünf Jahren ausgewertet werden. Ein ansteigender Trend der Schadensrate deutet darauf hin, dass die im Netz durchgeführten Rehabilitationsmaßnahmen nicht ausreichend sind (Fuchs, 2001).

2.4.3.6 Altersabhängige Schadensrate

Rohrleitungen gleicher Bauart und Verlegeperiode, die in einer Leitungsgruppe (s. Abschnitt 2.4.3.4) zusammenfasst sind, weisen üblicherweise ein ähnliches Alterungsverhalten auf. Daher entwickelt sich auch die Schadensrate mit zunehmendem Alter für Leitungen einer Leitungsgruppe ähnlich. Der zeitliche Verlauf der Schadensanfälligkeit kann nach Kropp und Herz (2005) mit der so genannten „Badewannenkurve“ beschrieben werden: Nach einer kurzen Phase mit erhöhter Schadensrate infolge von Verlegefehlern folgt eine längere stabile Phase mit deutlich weniger Schäden. Mit zunehmender Alterung nimmt die Widerstandsfähigkeit der Leitung ab und sie tritt in die kritische Phase ein, in der es verstärkt zu Rohrbrüchen und Leckagen kommt.

Um die Schadensrate in Abhängigkeit vom Alter der Leitung auswerten zu können, müssen laut Herz (1995) zunächst die so genannten „Kohortenlängen“ jeder Leitungsgruppe ermittelt werden. Als Kohortenlänge wird die verlegte Länge einer Leitungsgruppe je Baujahr bezeichnet. Wenn jeder Schaden mit Hilfe des Leitungskatasters eindeutig einer bestimmten Leitung zugeordnet werden kann, kann anhand von Verlegejahr und Schadensjahr das Alter der Leitung bei Schadenseintritt ermittelt werden. Somit lässt sich die leitungsgruppenspezifische Schadensrate in Abhängigkeit vom Alter berechnen.

Verfälscht wird das Ergebnis durch den Austausch bestehender Leitungen, da in der Vergangenheit das Verlegejahr und die Länge der ausgebauten Leitung nicht dokumentiert wurden. Die tatsächliche Länge einer Leitungsgruppe können für lange zurückliegende Verlegejahre daher nur abgeschätzt werden (Fuchs, 2001). In der jüngeren Vergangenheit werden die Informationen über ausgebauten Leitungen in digitalen Leitungskatastern weitergeführt, so dass sich historische Kohortenlängen rekonstruieren lassen.

2.5 Messgeräte in der Wasserversorgung

2.5.1 Allgemeines

Laut Berndt u. a. (2001) ist „ohne messtechnische Einrichtungen [...] der sinnvolle Betrieb einer Wasserversorgungsanlage nicht denkbar“: Messungen dienen der Planung, Steuerung und Überwachung von Wasserversorgungsanlagen sowie der korrekten Abrechnung der Wasserlieferung an Endverbraucher und Weiterverteiler. Für die Ermittlung und Bewertung der Wasserverluste ist neben der Messung von Wasservolumina und momentanen Durchflüssen auch die Messung von Drücken und Behälterfüllständen von Bedeutung. Die hierzu eingesetzten Verfahren und Messgeräte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.5.2 Volumenmessung und Durchflussmessung

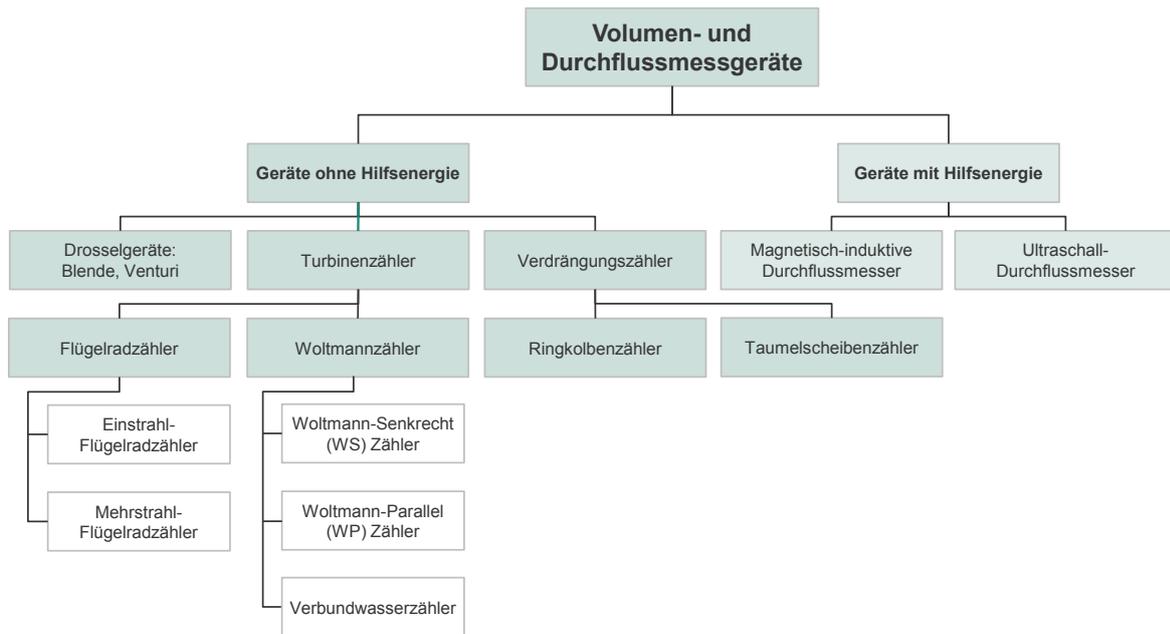
2.5.2.1 Einsatzgebiete

Bei der Volumenmessung wird eine Wassermenge innerhalb eines beliebigen Zeitabschnittes gemessen (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Dazu kommen in der Regel Wasserzähler zum Einsatz, die das durchfließende Wasservolumen fortlaufend messen, speichern und anzeigen. Wasserzähler werden in Wasserversorgungssystemen hauptsächlich zur Erfassung und Abrechnung der Wasserlieferung an Haushalte, Kleingewerbe und Großkunden eingesetzt. Der Kundenwasserzähler (KWZ) befindet sich in der Regel an der Übergabestelle zwischen dem Wasserverteilungsnetz und der privaten Hausinstallation. Weitere Einsatzbereiche sind laut Mutschmann und Stimmelmayer (2011) die Messung der Rohwasserförderung zur Festsetzung von Wasserentnahmeentgelten, die Übergabe an Weiterverteiler und die Volumenmessung an Wasserwerks- und Behälteraustausgängen sowie an Zonentrennstellen zur Betriebsüberwachung. Bei der Durchflussmessung wird eine Wassermenge in einem definierten Zeitabschnitt erfasst (Volumenstrom, Volumendurchfluss). Durchflussmessgeräte werden in der Wasserversorgung zur Überwachung von Aufbereitungsanlagen (z.B. Filterbelastung) und Rohrnetzbezirken (z.B. bei der Nachtmindestverbrauchsmessung, s. Abschnitt 4.3.3) eingesetzt.

2.5.2.2 Bauformen und Messverfahren

Wasserzähler können grundlegend unterschieden werden in Turbinenzähler (Ableitung des Volumens aus der Messung der Fließgeschwindigkeit) und Verdrängungszähler (direkte Messung des Volumens). Die wichtigsten Bauarten der Turbinenzähler sind Flügelradzähler und Woltmannzähler. Verdrängungszähler werden in Abhängigkeit von der Bauart als Ringkolben- oder Taumelscheibenzähler bezeichnet. Als Durchflussmessgeräte können Wasserzähler verwendet werden, die über Zusatzeinrichtungen jeden Zählimpuls einem bestimmten Zeitpunkt zuordnen, so dass daraus eine Durchflussmenge abgeleitet werden kann. Weitere gängige Verfahren sind das magnetisch-induktive Messverfahren und die Ultraschall-Durchflussmessung. Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über die üblichen Verfahren und Bauformen von Wasserzählern und Durchflussmessgeräten. Laut DVGW (2003b) sind Ringkolbenzähler die einzige Bauform der Verdrängungszähler, die in Europa in Gebrauch ist. Taumelscheibenzähler werden daher in den folgenden Ausführungen nicht berücksichtigt.

Flügelradzähler Flügelradzähler messen die Fließgeschwindigkeit des Wassers, die proportional zur Umdrehungsgeschwindigkeit des tangential angeströmten Flügelrads ist. Die Anzahl der Umdrehungen der Flügelradachse wird gezählt um das Volumen in Abhängigkeit

Abbildung 2.3: Verfahren und Bauformen von Volumen- und Durchflussmessgeräten³

vom Fließquerschnitt indirekt zu ermitteln. Bei Einstrahl-Flügelradzählern (EFZ) wird das Wasser in einem einzigen Strahl auf die Paletten des Flügelrads geleitet, was zu einseitiger Belastung des Flügelradachse führt. Bei Mehrstrahl-Flügelradzählern (MFZ) wird das Wasser in mehrere Teilströme aufgeteilt, was zu einer gleichmäßigeren Belastung der Achse und einem besseren Anlaufverhalten führt. Mehrstrahl-Flügelradzähler sind die in Deutschland am häufigsten verwendeten Kundenwasserzähler, da sie als kostengünstig und robust gelten. Sie werden bis zu einem Durchfluss von circa 15 bis 20 m^3/h eingesetzt.

Ringkolbenzähler In einem Ringkolbenzähler (RKZ) rotiert - angetrieben durch das einströmende Wasser - eine zylindrische Messkammer, die abwechselnd die Zufluss- und Abflussöffnung des Zählers freigibt. Das Volumen der Messkammer ist bekannt, so dass über die Anzahl der Füllungen in einem bestimmten Zeitraum der Volumendurchfluss bestimmt werden kann. Nur wenige WVU setzen Ringkolbenzähler als Kundenwasserzähler ein, da sie sich zwar durch eine sehr gute Messgenauigkeit auszeichnen, aber anfällig gegenüber mitgeführten Feststoffen sind, die durch Abrieb der Gleitflächen zu Undichtigkeiten führen oder den Zähler blockieren können (Möhlen, 1999). Sie werden - wie Flügelradzähler - bis zu einem Durchfluss von circa 15 bis 20 m^3/h eingesetzt.

Woltmannzähler Für Durchflüsse über 20 m^3/h werden Woltmannzähler (WMZ) eingesetzt, die die Fließgeschwindigkeit des Wassers mit Hilfe eines axial angeströmten Messflügels messen. Im Gegensatz zu den Flügelradzählern wird der Rohrquerschnitt im Woltmannzähler nicht wesentlich reduziert, so dass sehr viel geringere Druckverluste auftreten (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Je nach Lage der Messflügelachse werden zwei Bauformen unterschieden: Beim Typ WP (Woltmann parallel) ist die Messflügelachse horizontal angeordnet. Die Reibungsverluste bei dieser Art der Lagerung verzögern das Anlaufen des Messflügels,

³Quelle: nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)

so dass minimale Durchflüsse nicht erfasst werden. Die vertikal gelagerte Messflügelachse der Geräte vom Typ WS (Woltmann senkrecht) bewirkt ein besseres Anlaufverhalten, aber aufgrund der mehrfachen Umlenkung des Wassers auch höhere Druckverluste.

Verbundwasserzähler Die Kombination eines Woltmannzählers mit einem Flügelradzähler wird als Verbundwasserzähler bezeichnet. Diese werden bei Verbrauchern mit einem breiten Durchflussspektrum eingesetzt, falls der Messbereich eines Woltmannzählers nicht ausreicht um auftretende geringe Durchflüsse zu registrieren.

Magnetisch-induktive Durchflussmessung Bei der magnetisch-induktiven Durchflussmessung wird ein Magnetfeld senkrecht zur Rohrachse erzeugt und somit eine elektrische Spannung im durchströmenden Wasser induziert. Diese Signalspannung ist direkt proportional zur Durchflussgeschwindigkeit und wird durch Elektroden im Messrohr abgegriffen (Mutschmann und Stimmelmayr, 2011). Die Messung ist weitestgehend unabhängig von Dichte, Viskosität und Strömungsprofil des Mediums und weist geringe Messabweichungen über einen weiten Messbereich (zwischen 10^{-3} und $> 10^5 \text{ m}^3/h$) auf (Brucker u. a., 2008).

Ultraschall-Durchflussmessung Die Ultraschall-Durchflussmessung beruht auf der Messung der Schallgeschwindigkeit in strömendem Wasser mit und entgegen der Strömungsrichtung. Anhand von Laufzeiten, Phasenverschiebung oder Differenzfrequenz lässt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ermitteln, so dass unter Berücksichtigung des Rohrleitungsquerschnitts der Volumendurchfluss berechnet werden kann (Möhlen, 1999). Für Medien mit Feststoffanteilen oder Phasengrenzen kommt als Messprinzip das Doppler-Verfahren zum Einsatz, während für weitgehend homogene Flüssigkeiten wie Wasser das Laufzeitdifferenz-Verfahren besser geeignet ist. Um mit diesem Verfahren eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, sind ein rotationssymmetrisches Strömungsprofil und die genaue Kenntnis von Rohrwerkstoff und Wandstärke Voraussetzung.

Eine Sonderform bilden die Standrohrzähler, die für die Messung der Wasserabgabe an temporäre Verbraucher (z.B. Baustellen, Jahrmärkte etc.) verwendet werden. Eine gute Übersicht über die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Wasserzähler findet sich bei Möhlen (1999), Arregui u. a. (2006) oder Berndt u. a. (2001). Eine detaillierte Beschreibung der magnetisch-induktiven Durchflussmessung und der Ultraschall-Durchflussmessung findet sich bei Brucker u. a. (2008).

2.5.2.3 Rechtsvorschriften

Für die Herstellung, Eichung, Dimensionierung und Inverkehrbringung von Wasserzählern gelten eine Reihe von Rechtsvorschriften:

Eichgesetz Das Gesetz über das Mess- und Eichwesen (Eichgesetz) schreibt allgemein die Verwendung zugelassener und geeichter Messgeräte im geschäftlichen Verkehr vor (BMJ, 2011). Das Eichgesetz regelt weiterhin die Zuständigkeiten für die Sicherung der Einheitlichkeit des gesetzlichen Messwesens: Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) führt die bundesweite Aufsicht über das Messwesen und ist für die Bauartzulassung zuständig. Die Durchführung und Überwachung von Eichungen wird von den Landes-Eichämtern, staatlich anerkannten Prüfstellen oder zugelassenen Versorgungsunternehmen durchgeführt.

Eichordnung Die Eichordnung konkretisiert das Eichgesetz und legt die speziellen Vorschriften für die Beschaffenheit und Kennzeichnung der Messgerätearten fest. Unter anderem werden die Verfahren der Bauartzulassung sowie die Eichfehlergrenzen, Eichgültigkeiten und Nacheichung geregelt. Weiterhin ist vorgeschrieben, Kaltwasserzähler alle sechs Jahre auszutauschen, um eine Zunahme der Messabweichungen durch natürlichen mechanischen Verschleiß zu begrenzen (BMJ, 2011).

AVBWasserV Die Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV) schreibt vor, dass die Messeinrichtungen für Wasserlieferungen an Kunden den eichrechtlichen Vorschriften entsprechen müssen. Laut AVBWasserV hat das WVU dafür Sorge zu tragen, dass eine einwandfreie Messung der verbrauchten Wassermenge gewährleistet ist. Im Rahmen der betrieblichen Überwachung von Wasserversorgungsanlagen sowie für die Ermittlung von staatlichen Wasserentnahmeabgaben ist dagegen keine Eichung notwendig (DVGW, 2003b), wie Abbildung 2.4 zeigt.



* Der Bund-Länder-Ausschuss „Gesetzliches Messwesen“ hat am 19.11.1992 festgestellt, dass es sich bei den Angaben für Wasserentnahmeabgaben nicht um Angaben handelt, die eine Eichpflicht auslösen.

** Ausnahme: gemäß Eichordnung § 8, Anhang A, Nr. 28 a, unterliegen Messgeräte, die zur Abrechnung von Lieferungen ab 2.000 m³/h an gleichbleibende Partner dienen, nicht der Eichpflicht.

Abbildung 2.4: Eichpflicht in der Wassermessung⁴

Measuring Instruments Directive Für das Inverkehrbringen von Messgeräten ist seit Oktober 2006 die neue Europäische Richtlinie 2004/22/EG über Messgeräte (kurz MID, von engl. *Measuring Instruments Directive*) in Kraft. Messgeräte die den Anforderungen dieser Richtlinie entsprechen und entsprechend gekennzeichnet sind, können in allen 27 EU-Mitgliedsstaaten eingesetzt werden. In einer zehnjährigen Übergangsphase bis 2016 ist die bisherige Richtlinie 75/33/EWG (die sogenannte Kaltwasserzähler-Richtlinie) parallel anwendbar. Die wesentlichsten Änderungen der MID gegenüber der Richtlinie 75/33/EWG betreffen die Zählerbezeichnungen und Durchflussverhältnisse: Nach Richtlinie 75/33/EWG

⁴Quelle: DVGW (2003b)

wird die Zählergröße über den Nenndurchfluss Q_n und die metrologische Klasse A, B oder C festgelegt. Anhand dieser Angaben können der kleinste Durchfluss Q_{min} , der Übergangsdurchfluss Q_t und der maximale Durchfluss Q_{max} berechnet werden: Das Verhältnis $Q_{max}:Q_n$ ist auf 2 festgelegt und die übrigen Größen sind über die metrologischen Klassen gemäß Tabelle 2.5 definiert (EWG, 1974).

Tabelle 2.5: Metrologische Klassen gemäß Richtlinie 75/33/EWG

| | Klasse A | | Klasse B | | Klasse C | |
|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| | $Q_n < 15$ | $Q_n \geq 15$ | $Q_n < 15$ | $Q_n \geq 15$ | $Q_n < 15$ | $Q_n \geq 15$ |
| Q_n/Q_{min} | 25 | 12,5 | 50 | 33,3 | 100 | 166,7 |
| Q_n/Q_t | 10 | 3,33 | 12,5 | 5 | 66,67 | 66,67 |

Quelle: nach EWG (1974)

Durch Q_{min} , Q_t , Q_n und Q_{max} wird der Belastungsbereich eines Zählers festgelegt, innerhalb dessen bestimmte Fehlergrenzen eingehalten werden müssen: $\pm 5\%$ im unteren Belastungsbereich zwischen Q_{min} und Q_t , sowie $\pm 2\%$ im oberen Belastungsbereich zwischen Q_t und Q_{max} . Diese Eichfehlergrenzen bestimmen die zulässigen Toleranzen für die Prüfung eines Wasserzählers auf einem staatlich anerkannten Prüfstand. Für Wasserzähler im eingebauten Zustand gilt allerdings die Verkehrsfehlergrenze. Diese beträgt das Doppelte der Eichfehlergrenze, also 10% bzw. 4%.

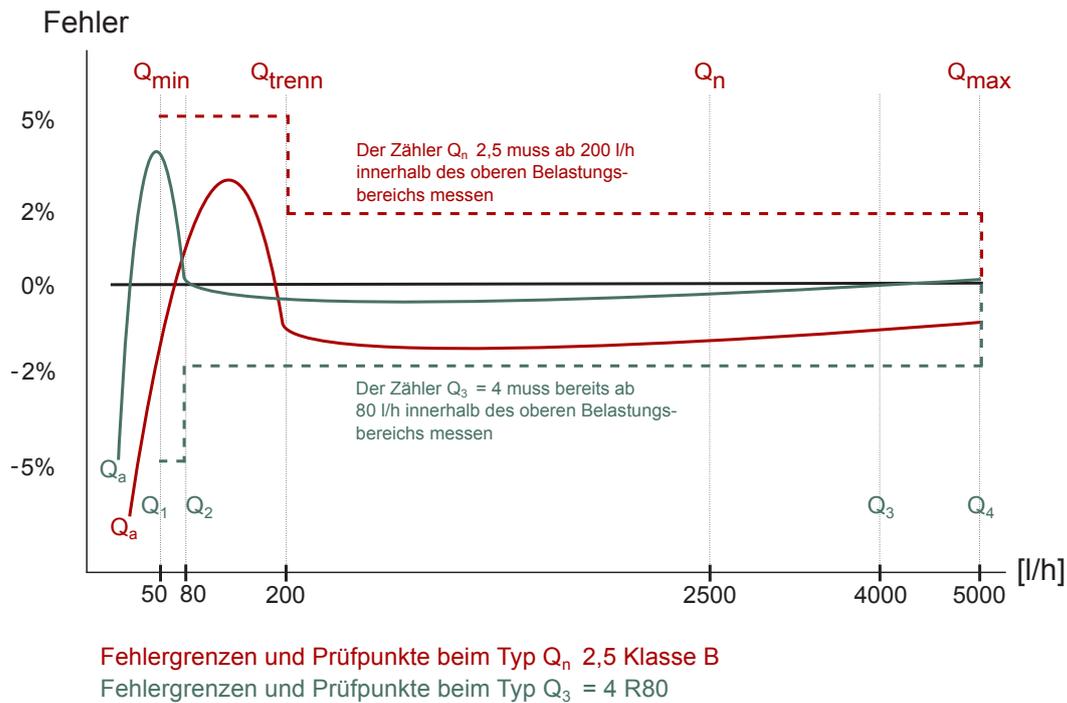
Die Bezeichnungen der Durchflusspunkte werden durch die MID neu festgelegt und heißen jetzt Mindestdurchfluss Q_1 , Übergangsdurchfluss Q_2 , Dauerdurchfluss Q_3 und Überlastdurchfluss Q_4 . Das Verhältnis $Q_4:Q_3$ wurde auf 1,25 verkleinert und für $Q_2:Q_1$ ein fixes Verhältnis von 1,6 festgelegt. Die Einteilung in die metrologischen Klassen A, B und C wird durch das Verhältnis $Q_3:Q_1$ (Ratio R) abgelöst, das aus der Reihe R10 der Normzahlen gemäß ISO 3:1973 gewählt werden kann. Dadurch ergibt sich eine Verschiebung des oberen und unteren Belastungsbereichs, wie Abbildung 2.5 veranschaulicht.

Die Anforderungen der MID gelten ausschließlich für das erste Inverkehrbringen oder die erste Inbetriebnahme von Messgeräten. Alle Anforderungen nach der Inbetriebnahme wie beispielsweise Verkehrsfehlergrenzen oder Nacheichung werden in Deutschland durch das Eichgesetz und die Eichordnung geregelt (Stefanski, 2007).

2.5.2.4 Dimensionierung

Volumen- und Durchflussmessgeräte sind anhand der Spannbreite der tatsächlich auftretenden Durchflüsse (Haupteinsatzbereich) so zu dimensionieren, dass die zu erfassenden Durchflüsse überwiegend innerhalb des Belastungsbereichs des Messgeräts liegen. Laut Eichordnung müssen Messgeräte so installiert, gehandhabt und gewartet werden, dass die Richtigkeit der Messung gewährleistet ist und das Fehlergrenzen nicht planmäßig zum Vorteil des Betreibers ausgenutzt werden. Eine planmäßige Ausnutzung der Fehlergrenzen liegt vor, wenn aufgrund der Dimensionierung der Haupteinsatzbereich des Zählers im unteren Belastungsbereich liegt.

In Deutschland waren bis vor kurzer Zeit mehrere technische Richtlinien in Kraft, die teils widersprüchliche Aussagen zur Dimensionierung von Wasserzählern für Wohngebäude machten, namentlich das DVGW Merkblatt W 410 (Januar 1995), die DIN 1988-3 (Dezember 1998) sowie das DVGW Arbeitsblatt W 406 (Dezember 2003). Im Zuge der Harmonisierung des Regelwerks wurden die ersten beiden Regelwerke reformiert und verweisen in ihrer aktuellen Fassung (DVGW W 410 vom Dezember 2008 bzw. DIN 1988-300 vom Mai 2012) auf das

Abbildung 2.5: Belastungsbereiche nach Richtlinien 75/33/EWG und 2004/22/EG⁵

ebenfalls aktualisierte DVGW Arbeitsblatt W 406, das im Januar 2012 erschienen ist (Stefanski, 2009). Darin werden für die Dimensionierung von Wasserzählern für Wohngebäude die in Tabelle 2.6 angegebenen Richtwerte angegeben. Für Objekte, die keine reinen Wohngebäude sind, verweist DVGW (2012) auf die Durchflussberechnung nach DIN 1988-300. Zu Ursachen und Auswirkungen von Messabweichungen s. Abschnitt 3.4.1.1.

Tabelle 2.6: Dimensionierung von Zählern für Wohngebäude nach DVGW Arbeitsblatt W406 (2012)

| Zahl der Wohneinheiten (WE) | 75/33/EWG | | 2004/22/EG | |
|-----------------------------|-----------|-----------|------------|-------|
| | Q_n | Q_{max} | Q_1 | Q_4 |
| $WE \leq 30$ | 2,5 | 5 | 4 | 5 |
| $30 < WE \leq 200$ | 6 | 12 | 10 | 12,5 |
| $200 < WE \leq 600$ | 10 | 20 | 16 | 20 |

Quelle: nach DVGW (2012)

2.5.3 Druck- und Niveaumessung

2.5.3.1 Allgemeines

Druck- und Niveaumessungen werden im Rahmen der Wasserverlustanalyse für drei Anwendungsfälle benötigt:

⁵Quelle: Zenner (2012)

- Zur Bestimmung des mittleren Versorgungsdrucks eines Untersuchungsgebiets, beispielsweise um das Potenzial von Druckmanagement für die Wasserverlustreduzierung abzuschätzen (s. Abschnitt 2.4.2.5).
- Zur Überprüfung der Messgenauigkeit von Durchflussmessgeräten anhand von akkumulierten Füllstandsmessungen in Hochbehältern (s. Abschnitt 3.4.1.3).
- Zur Berechnung der Wasserentnahme an Hochbehältern über die Füllstandsänderung (s. Abschnitt 5.5.1)

2.5.3.2 Einsatzgebiete

Druckmessgeräte finden in Wasserversorgungssystemen zahlreiche Anwendungen: In Tiefbrunnen und Pumpstationen, Wasseraufbereitungsanlagen, an Druckreduzierventilen und zur Niveaumessung in Hochbehältern. In seltenen Fällen werden Druckmessgeräte auch zur Drucküberwachung in Versorgungszonen installiert, beispielsweise zur Leckagefrüherkennung.

2.5.3.3 Bauformen und Messverfahren

Elektronische Druckmessung erfolgt mit Hilfe von Sensoren, die den zu messenden Druck oder eine Druckänderung aufnehmen. Physikalische Effekte wandeln diese meist in ein analoges Spannungs- oder Stromsignal um. Die gängigsten Ausgangssignale in der Druckmesstechnik sind das analoge Stromsignal 4...20 mA und die Spannungssignale 0...5 V, 0...10 V sowie 1...5 V. Die wichtigsten Messprinzipien in der Wasserversorgung sind laut Gaßmann und Gries (2009) die resistive Druckmessung (Messung der Widerstandsänderung elektrischer Widerstände durch druckabhängige Verformung einer metallischen oder keramischen Membran), piezoresistive Druckmessung (Messung der Änderung des spezifischen Widerstands mittels Halbleitermaterialien) und die kapazitive Druckmessung (Messung der vom Plattenabstand abhängigen Kapazität eines Kondensators).

Gebräuchliche Bauarten sind der Druckmessumformer (wandelt die physikalische Größe Druck in ein Standard-Industriesignal um), die Pegelsonde (Füllstandsbestimmung anhand Messung des hydrostatischen Drucks in Behältern oder Brunnen), der Druckschalter (für einfache Steuerungsaufgaben) und der Drucktransmitter (mit individuell einstellbarem Messbereich). Prinzipiell bestehen diese elektronischen Druckmessgeräte aus einem Druckanschluss, der Drucksensorik, einer Elektronik, einem elektrischen Anschluss und dem Gehäuse. Gaßmann und Gries (2009) geben einen guten Überblick über den Stand der Technik der Bauformen und Messverfahren.

2.5.3.4 Dimensionierung

Bei der Auswahl und Dimensionierung von Druckmessgeräten sind eine ganze Reihe von Kriterien zu beachten. Neben der korrekten Wahl von Messbereich und Messgenauigkeit sind die Art des elektrischen Anschlusses und des Druckanschlusses sowie die Art des Ausgangssignals zu wählen. Darüber hinaus spielen die zu erwartenden Einsatzbedingungen eine große Rolle, wie zum Beispiel Lastwechsel und Druckspitzen (Druckstoß), die Verträglichkeit mit dem Druckmedium und Temperatureinflüsse. Hinweise zur Auswahl des geeigneten Druckmessgeräts geben beispielsweise Gaßmann und Gries (2009).

2.6 Prozessleitsysteme

2.6.1 Aufgaben

Wasserversorgungssysteme mit vielen, räumlich weit voneinander entfernten Anlagenteilen machen den Einsatz von Prozessleitsystemen zur Sicherstellung und Überwachung des Betriebs und der Versorgungssicherheit notwendig. Da die meisten Anlagen nicht durch Bedienpersonal vor Ort betrieben werden, bedarf es der Fernwirktechnik, um den Anlagenzustand zu erfassen, um die gesammelten Daten zu verarbeiten und zu übertragen und um die Anlagen zu steuern bzw. zu regeln. Weiterhin sollen Prozessleitsysteme dazu beitragen, den Personalaufwand zu reduzieren, Kosten für Energie zu senken (Pumpensteuerung) und die Wasserressourcen optimal zu nutzen. Nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011) lassen sich die Funktionen eines Prozessleitsystems wie folgt charakterisieren:

- Grundfunktionen: Prozessüberwachung, Prozesssteuerung, Berichtswesen
- Dialogfunktionen: Anzeigen, bedienen, registrieren, protokollieren, archivieren
- Zusatzfunktionen: Schutzfunktionen, Plausibilitätskontrolle, Prognosen

Das Prozessleitsystem setzt sich aus einer Zentrale (bei großen Systemen evtl. mit untergeordneten Bezirkszentralen), Unterstationen und Außenstellen zusammen. In den Unterstationen und Außenstellen befinden sich die Anlagenteile oder Objekte (Messgeräte, Pumpen, Motoren, Armaturen, Stellantriebe etc.), die einerseits Messwerte und Meldungen an die Zentrale senden und andererseits Stellwerte und Befehle empfangen. In der Zentrale werden die eingehenden Daten mithilfe geeigneter Software visualisiert und archiviert. Das Bedienpersonal hat die Möglichkeit, mittels Schaltbefehlen oder Sollwertvorgaben in die selbstständig laufenden Prozesse einzugreifen. Eingehende Störmeldungen erzeugen einen Alarm und werden nach einer festgelegten Routine an den Bereitschaftsdienst weitergeleitet (DVGW, 2006b).

2.6.2 Fernwirktechnik

Die Fernwirktechnik bezeichnet signalumsetzende Verfahren zur Fernsteuerung und Fernüberwachung räumlich entfernter Objekte. Messwertumformer liefern in der Regel analoge Signale (z.B. 4...20 mA). Da Prozessleitsysteme ausschließlich mit digitalen Informationen arbeiten (binäre Signale), müssen die Eingangssignale durch Digital-Analog-Wandler (D/A-Wandler) umgewandelt werden. Je mehr Binärstellen für die digitale Darstellung verwendet werden, desto höher aufgelöst ist das Ausgangssignal (DVGW, 2009). Gängige D/A-Wandler wandeln mit 8 oder 11 Bit, woraus sich Auflösungen von 256 bzw. 2048 Einzelwerten ergeben. Die Auflösung hat Einfluss auf die Genauigkeit von Messwerten und beeinflusst damit auch die Wasserbilanz (s. Abschnitt 5.4). Als Übertragungswege können praktisch alle Telekommunikationsnetze genutzt werden:

- Betriebseigene Übertragungswege: leitungsgebunden (Kupferadern oder Glasfaser) oder Funknetze
- Analoges Telefonnetz
- Digitales ISDN-Netz
- GSM-Mobilfunknetz
- Satellitenkommunikation

Die Auswahl des geeigneten Übertragungsweges hängt von der Datenmenge, der Distanz, der Übertragungsgeschwindigkeit und -art (permanent oder intermittierend) sowie von Sicherheitsaspekten ab (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

Als Übertragungsverfahren kommen üblicherweise Multiplexverfahren zum Einsatz. Dabei werden mehrere Eingangssignale zusammengefasst und simultan über ein Medium (Leitung, Kabel oder Funkstrecke) übertragen. Bei leitungsgebundener Übertragung werden Signale aus mehreren Quellen gebündelt und gemeinsam über einen statt über mehrere parallele Wege übertragen, um dadurch Leitungsbaukosten zu reduzieren. Bei der Funktechnik können durch Multiplexing mehrere räumlich voneinander getrennte Anlagenteile gleichzeitig mit einer zentralen Funkstation verbunden werden. Inzwischen hat sich die Zeit-Multiplex-Übertragung aufgrund der hohen Übertragungssicherheit und der großen Übertragungsraten (mehrere 1.000 Informationen je Adernpaar) gegenüber älteren Verfahren wie dem Frequenz-Multiplex-Übertragung (ca. 30 Informationen pro Adernpaar) oder dem Raum-Multiplex-Übertragung (eine Information je Adernpaar) weitgehend durchgesetzt (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

2.6.3 Fernablesung von Durchflussmessgeräten

Mit Hinblick auf die Analyse von Wasserverlusten spielen Prozessleitsysteme insbesondere bei der Erfassung und Übertragung von Durchflussmessungen eine Rolle. Während sich die automatische Zählerablesung (engl. *automatic meter reading, AMR*) bei Kundenwasserzählern in Deutschland bisher nicht flächendeckend durchgesetzt hat, gingen die meisten WVU in den letzten zehn Jahren dazu über, ihre Großwasserzähler per Fernwirktechnik auszulesen. Für die Übertragung müssen die Messwerte durch das Messgerät selbst oder ein nachgeschaltetes Gerät in eine elektronisch verarbeitbare Form umgewandelt und an einer Schnittstelle bereitgestellt werden. Generell kann zwischen Impulsschnittstellen und seriellen Schnittstellen unterschieden werden.

Impulsschnittstelle Die Zählwerke moderner Großwasserzähler können durch Einstecken oder Anklemmen mit mechanischen (z.B. Reed-) oder optoelektronischen (z.B. Infrarot-) Impulsgebern ausgerüstet werden. Teilweise sind diese Impulsgeber bereits im Durchflussmessgerät integriert. Diese erzeugen ein zur Durchflussmenge proportionales Signal (z.B. 1 Impuls pro 1 m^3 Wasser), das bei Bedarf durch Signalwandler weiterverarbeitet werden kann, beispielsweise indem aus der Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit die Durchflussmenge ermittelt wird (Meier u. a., 2003). Die Impulsübertragung kommt ohne Hilfsenergie aus und war lange Zeit der Standard in der Fernwirktechnik (Stefanski, 2002).

Serielle Schnittstelle Eine neuere Entwicklung sind Durchflussmessgeräte mit serieller Schnittstelle, die dem in der DIN EN 13757 festgelegten M-Bus-Protokoll folgen. Das M-Bus-Protokoll wurde entwickelt, um Verbrauchszähler zu vernetzen und deren Fernablesung zu ermöglichen. Neben dem Zählerstand können auch aktuelle Durchflussmengen und weitere Daten übertragen werden (Stefanski, 2002). Im Unterschied zu der Impulsschnittstelle entspricht der übertragene Zählerstand immer dem tatsächlichen Zählerstand des Zählwerkes. Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Arten von Schnittstellen beschreibt Stefanski (2002). Als Übertragungswege für die Übermittlung der Messwerte kommen alle in Abschnitt 2.6.2 genannten Verfahren in Frage.

2.7 Betriebliche Aspekte

Um erfolgreiches Wasserverlustmanagement zu betreiben, müssen laut Osmancevic (2010) komplexe Zusammenhänge zwischen der Funktionsweise und dem Aufbau des Wasserversorgungssystems, eingespeisten und verbrauchten Wassermengen und der Rohrnetzhydraulik erkannt und verstanden werden. Um diese Zusammenhänge zu verstehen, müssen Daten aus vielen unterschiedlichen System wie der Netzleitstelle, dem Netzinformationssystem, dem Hydraulischen Modell, der Kunden- und Abrechnungsdatenbank und anderen miteinander verknüpft und gemeinsam analysiert werden. In der Praxis scheitert dies oft an den folgenden Gründen:

- Die Rohrnetzüberwachung ist lückenhaft und die Messgeräte für betriebliche Zwecke sind häufig falsch dimensioniert, nicht geeicht und werden zu selten überprüft. Die gemessenen Einspeisemengen sind daher oft unpräzise.
- Die erhobenen Daten werden in eigenständigen Systemen und Softwareprodukten verwaltet, die nur für die Erfüllung einer spezifischen Aufgabe angeschafft und betrieben werden. Da der Wert der generierten Informationen für die Wassermengenanalyse nicht erkannt wird, verfügen sie nicht über die notwendigen Schnittstellen für einen gemeinsamen Betrieb oder eine weitergehende Nutzung.
- Zahlreiche Daten werden in isolierten, selbstentwickelten Datenbanken gehalten, auf die nur einzelne Nutzer zugreifen können.
- Die erforderlichen Daten sind in verschiedenen Abteilungen des WVU angesiedelt, wie dem Netzbetrieb, den Wasserwerken, der kaufmännischen Abteilung etc. was den administrativen Aufwand der Datenerhebung für die Wasserbilanz signifikant erhöht.

Die oben beschriebenen Schwierigkeiten führen dazu, dass die Wasserverluste häufig nicht vollständig und gemäß Empfehlung des DVGW Arbeitsblatts W392, sondern nur auf stark vereinfachte Weise bilanziert werden. Diese Aussage von Osmancevic (2010) deckt sich mit den Ergebnissen einer unter baden-württembergischen WVU durchgeführten Umfrage (s. Abschnitt 4.8.2). Auch die differenzierte Betrachtung der Wasserverluste nach Versorgungszonen scheitert an dem hohen Aufwand für den Bearbeiter, obwohl bekannt ist, dass der ermittelte mittlere spezifische Wasserverlust des Gesamtnetzes keine Aussage über die Situation in einzelnen Zonen zulässt (Osmancevic, 2010).

Weiterhin spielt die Einstellung der Führung des WVU zu Wasserverlusten eine wichtige Rolle, wie beispielweise Kölbl (2008) berichtet: Da die Erstellung detaillierter Wasserbilanzen, die Einrichtung einer kontinuierlichen Rohrnetzüberwachung und die Ortung und Reparatur von Leckagen zeit- und kostenintensiv sind, sind Maßnahmen des Wasserverlustmanagements wenig attraktiv. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn dem WVU geringe Gestehungskosten für das Wasser anfallen. Aber auch beim Betriebspersonal sind die Identifikation mit den Zielen des Wasserverlustmanagements und große Ausdauer gefragt, weil Wasserverlustmanagement niemals eine einmalige oder kurzfristige Maßnahme sondern dauerhaftes Engagement erfordert.

3 Wasserverluste

3.1 Kapitelüberblick

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik zum Thema Wasserverluste dargelegt. Zunächst wird in Abschnitt 3.2 eine einheitliche Terminologie eingeführt, mit deren Hilfe alle Wasserverlustkomponenten eindeutig definiert und untereinander abgegrenzt werden. Die Verwendung einer einheitlichen Terminologie und Systematik ist unverzichtbar, um Wasserverluste zu verstehen und effizient zu reduzieren und um die Wasserbilanzen unterschiedlicher Wasserversorgungssysteme miteinander vergleichbar zu machen. In diesem Zusammenhang wird gezeigt, dass Wasserverluste grundsätzlich in eine reale und eine scheinbare Komponente unterteilt werden können. Weiterhin wird erläutert, inwiefern Wasserverschwendung Einfluss auf die Höhe der Wasserverluste eines WVU hat.

In den darauffolgenden Abschnitten 3.3 und 3.4 wird ein Überblick über die maßgeblichen Ursachen sowohl realer als auch scheinbarer Wasserverluste gegeben. Die grundlegenden Kenntnisse über die vielfältigen Ursachen bilden die Basis für die korrekte Interpretation der Wassermengenanalyse, auf die in Kapitel 4 näher eingegangen wird. Denn nur die gemeinsame Betrachtung von Wasserverlustursache und Wasserverlustmenge ermöglicht die Identifikation der für die Entstehung von Wasserverlusten relevanten Schwachstellen und die optimale Wahl geeigneter Gegenmaßnahmen.

Aufbauend auf der Systematisierung der Ursachen werden in Abschnitt 3.5 die Auswirkungen der Wasserverluste für das WVU, die Gesellschaft und die Umwelt geschildert. Die Kenntnis der Auswirkungen und deren Bewertung schafft die Voraussetzung, die Wasserverluste eines Wasserversorgungssystems zu evaluieren und gemäß ihrer Relevanz untereinander zu priorisieren. Das Kapitel wird in Abschnitt 3.6 abgeschlossen mit einem kurzen Überblick über das Ausmaß der Wasserverluste in Deutschland, der Europäischen Union und aus globaler Sicht.

3.2 Terminologie

3.2.1 Entwicklung der Terminologie

In diesem Abschnitt werden die aktuell verwendete Terminologie und gültige Definitionen zum Thema Wasserverluste vorgestellt. Der Abschnitt beginnt mit einem kurzen Exkurs, der die historische Entwicklung dieser Terminologie in den vergangenen 50 Jahren beleuchtet.

Im Lauf der Zeit wurde die Terminologie für die einzelnen Wasserverlustkomponenten immer wieder angepasst und weiter präzisiert. In Deutschland wurde gemäß DIN 4046 aus dem Jahr 1960 zunächst zwischen „echten“ und „unechten“ Wasserverlusten unterschieden (Laske, 1978). In der Neufassung der DIN 4046 von 1983 wurde der Wasserverlust definiert als der „in Prozent ausgedrückte Anteil des in das Rohrnetz eingespeisten Wasservolumens, dessen Verbleib im Einzelnen volumenmäßig nicht erfasst werden kann“ (DIN, 1983). Dieser setzt sich gemäß DIN (1983) zusammen aus „tatsächlichen Verlusten, z.B. durch Rohrbrüche, undichte

Rohrverbindungen oder Armaturen, sowie aus scheinbaren Verlusten, z.B. Fehlanzeigen der Messgeräte (und) unkontrollierte Entnahmen“.

Das DVGW Merkblatt W 391 (Oktober 1986) greift die Begriffe „tatsächlicher“ und „scheinbarer“ Wasserverlust auf und beschreibt detailliert die jeweiligen Ursachen. „Tatsächliche“ Wasserverluste entstehen demzufolge durch das „Ausströmen von Wasser bei Mängeln, Schäden oder Bedienungsfehlern“ an Rohrleitungen, Armaturen, Behältern und Druckerhöhungsanlagen (DVGW, 1986). „Scheinbare“ Wasserverluste entstehen dagegen, wenn das Wasser zwar zweckentsprechend verwendet, aber nicht erfasst wird. Dazu zählen laut W 391 Messfehler oder Fehlertoleranzen der Messeinrichtungen, Schleichverluste durch Minderanzeigen im Anlaufbereich von Kundenwasserzählern, ungemessene oder fehlerhaft abgeschätzte Netzabgaben sowie unerlaubte Entnahmen (DVGW, 1986).

Das Merkblatt W 391 empfiehlt auch die Erstellung einer Wasserbilanz in regelmäßigen Abständen. Dazu sollen die „ingespeisten Wasservolumina der Summe der gemessenen und geschätzten Abgabevolumina gegenübergestellt“ und die Differenz als Wasserverluste ausgewiesen werden (DVGW, 1986). Das Merkblatt gibt jedoch keine standardisierte Vorgehensweise für die Differenzierung der gesamten Wasserverluste in ihre tatsächliche und scheinbare Komponente vor.

Um 1997 begann eine Arbeitsgruppe des DVGW mit der Überarbeitung der bestehenden Merkblätter W 390 „Überwachen von Trinkwasserrohrnetzen“, W 391 „Wasserverluste in Wasserverteilungsanlagen“ und W 393 „Verfahren zur Leckortung an Trinkwasserleitungen“. Die Merkblätter wurden im neuen DVGW Arbeitsblatt W 392 „Rohrnetzinspektion und Wasserverluste“ zusammengefasst, das im Mai 2003 erschienen ist. 1999 wurde in einem Entwurf des neuen Arbeitsblatts W 392 von 1999 zum ersten Mal die heute übliche tabellarische Form benutzt, um die Systematik der Wasserbilanz grafisch darzustellen laut (Quelle: Herbert Hein, DVGW Projektkreis W392, persönliche Mitteilung, 21.02.2012).

Parallel dazu veröffentlichten Lambert und Hirner (2000) eine standardisierte Terminologie für Wasserverluste in Wasserversorgungssystemen, die die Erkenntnisse der *Water Loss Task Force* der *International Water Association* (IWA) zusammenfasst. Lambert und Hirner (2000) beklagen in ihrem Artikel den Mangel an international gültigen, einheitlichen Definitionen und geben Empfehlungen für die Erstellung einer Wasserbilanz und die Quantifizierung realer und scheinbarer Wasserverluste. Der Artikel strukturiert die in einem Wasserversorgungssystem eingespeisten und abgegebenen Wassermengen und ordnet die Wasserverluste den jeweiligen Systembestandteilen (Gewinnung, Aufbereitung, Förderung, Speicherung und Verteilung) zu, wie Abbildung 3.1 veranschaulicht.

Eine wichtige Neuerung von Lambert und Hirner (2000) ist eine in fünf Spalten gegliederte Wasserbilanz-Tabelle, die auf den unterschiedlichen Ansätzen nationaler Richtlinien aus Frankreich, Deutschland, Japan, Großbritannien und den USA aufbaut und diese vereinheitlicht. Vermutlich sind auch Erkenntnisse der DVGW-Arbeitsgruppe in diese Wasserbilanz-Tabelle eingeflossen, denn im Mai 2003 erscheint die standardisierte Wasserbilanz in nahezu gleicher Form in der Neufassung des DVGW Arbeitsblatts W 392, welches die Inhalte der zurückgezogenen Merkblätter W 390, W 391 und W 393 zusammenfasst und ersetzt. Diese Wasserbilanz wurde ebenfalls in die im September 2009 erschienene Neufassung der ÖVGW-Richtlinie W 63 aufgenommen und findet sich in ähnlicher Form beispielsweise im Handbuch M36 „Water Audits and Loss Control Programs“ der American Water Works Association (AWWA, 2009) (ÖVGW, 2009). Im Handbuch M36 der AWWA (2009) finden sich darüber hinaus eine ganze Reihe modifizierter und erweiterter Wasserbilanzen in tabellarischer Form, die jeweils unterschiedliche Systemgrenzen (mit/ohne Rohwasser, mit/ohne Wasserressourcen, mit/ohne Wasserverschwendung, etc.) berücksichtigen. Zur Zeit findet die Überarbei-

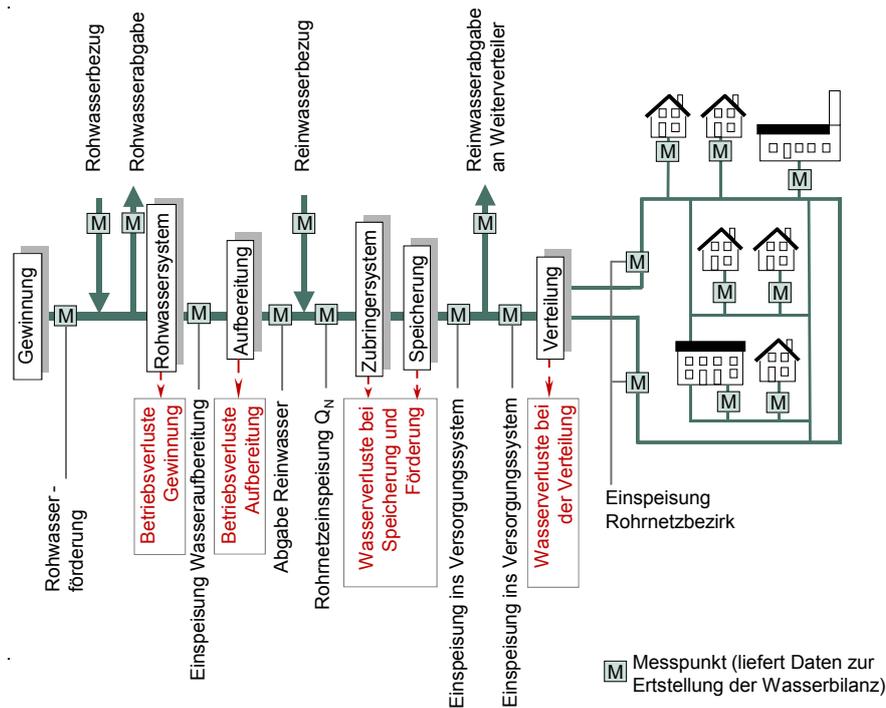


Abbildung 3.1: Definitionen von Einspeise- und Abgabemengen eines Wasserversorgungssystems¹

tung des Arbeitsblatts W 392 statt, ein erster Gelbdruck des Arbeitsblattes erschien im Juli 2013. Zahlreiche Einsprüche machten eine erneute Überarbeitung notwendig, einen zweiten Gelbdruck wird es voraussichtlich im Laufe des Jahres 2014 geben.

3.2.2 Erweiterte Terminologie nach DVGW

Abbildung 3.2 zeigt die Wasserbilanz (weiß hinterlegte Felder) aus dem Arbeitsblatt W 392 des DVGW (2003a). Diese Bilanz wurde ergänzt um Systemeinspeisung, Rohwasserexporte und Betriebsverluste bei der Wasserproduktion (farblich hinterlegt) gemäß Hirner und Merkel (2005), um eine einheitliche Grundlage für die Bildung von Kennzahlen zu ermöglichen (s. Abschnitt 4.5). Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz gemäß der vom DVGW verwendeten Terminologie im Einzelnen erläutert.

Systemeinspeisung Vor der Erstellung einer Wasserbilanz sind die Systemgrenzen eindeutig festzulegen und alle Flüsse in das System hinein und aus dem System heraus zu identifizieren. Wird das gesamte Wasserversorgungssystem betrachtet, sind die Rohwasser- und Zubringersysteme mit einzubeziehen. Die Systemeinspeisung Q_S umfasst die eigene Rohwasserförderung sowie Roh- und Reinerwasserbezug von Lieferanten. Die Bilanzierung der Systemeinspeisung für Rohwassersysteme ist nur dann sinnvoll, wenn die Gewinnungsanlagen mit Messgeräten (z.B. Brunnenwasserzähler) ausgestattet sind. In den meisten Fällen wird in der Wasserbilanz nur der Bereich des Wasserversorgungssystems zwischen Wasserwerksausgang und Kundenwasserzähler betrachtet. Rohwassersysteme sollten in die Wasserbilanz einbezogen werden oder in einer separaten Wasserbilanz betrachtet werden, wenn das Rohwasser

¹Quellen: nach Lambert und Hirner (2000) und Overath und Merkel (2004)

| | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|
| System- einspeisung ¹ Q_S | Rohwasser- Export Q_{RE} | | | | In Rechnung gestellte Wasserabgabe Q_{IR} |
| | Rohrnetz- einspeisung ² Q_N | Rohrnetzabgabe Q_A | In Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe Q_{AI} | In Rechnung gestellte und gemessene Rohrnetzabgabe | |
| | | | Nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe ³ Q_{AN} | In Rechnung gestellte und ungemessene Rohrnetzabgabe | |
| | Wasserverluste Q_V | Scheinbare Wasserverluste Q_{VS} | Nicht in Rechnung gestellte und gemessene Rohrnetzabgabe | Nicht in Rechnung gestellte und ungemessene Rohrnetzabgabe | Nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe Q_{NR} |
| | | | | | |
| | | | Schleichverluste | | |
| | | | Wasserdiebstahl | | |
| | | | Zubringerleitungen | | |
| | | | Behälter | | |
| | Reale Wasserverluste Q_{VR} | Haupt- und Versorgungsleitungen | | | |
| Anschlussleitungen bis Wasserzähler | | | | | |
| Betriebsverluste Wasserproduktion Q_{BV} | | | | | |

¹⁾ Summe aus Wassergewinnung, Rohwasserbezug und Reinwasserbezug

²⁾ Entspricht Systemeinspeisung, wenn das Verteilungssystem separat betrachtet wird

³⁾ z.B. Feuerlöschbedarf, Kanal- und Straßenreinigung, Hydranten- und Leitungsspülung, Frostschutz, Bewässerung öffentlicher Flächen

Abbildung 3.2: Standardisierte DVGW-Wasserbilanz mit Ergänzungen²

über große Entfernungen transportiert wird, wenn es mit hohem Energieaufwand gefördert wird, wenn es von einem Zulieferer gekauft wird oder wenn der Wert des Rohwassers hoch ist, etwa infolge begrenzter Ressourcen oder steigendem Bedarf. Eine spezifische Rohwasserbilanz ist nicht notwendig, wenn das Rohwasser in der Nähe der Aufbereitungsanlage gewonnen wird (AWWA, 2009).

Rohrnetzeinspeisung Die Rohrnetzeinspeisung Q_N bezeichnet die Reinwassermenge, die aus den Aufbereitungsanlagen kommend ins Zubringer- und Verteilsystem eingespeist wird. An den Systemgrenzen sollten sich Messstellen befinden, beispielsweise Großwasserzähler in der Aufbereitungsanlage, in Pumpstationen, Behältern und Zubringerleitungen. Nur bei genauer Messung der Rohrnetzeinspeisung Q_N ist es möglich, die Wasserverluste eines Systems korrekt zu bestimmen. Da Großwasserzähler zur betrieblichen Überwachung nicht eichpflichtig sind und deshalb über lange Zeiträume ohne Nachprüfung betrieben werden, empfiehlt das DVGW Arbeitsblatt W 392, diese auf Abweichungen zu überprüfen und gegebenenfalls Korrekturen vorzunehmen (DVGW, 2003a). Weiterhin sollen laut DVGW (2003a) ungemessene Einspeisungen vermieden werden und wo unvermeidbar möglichst genau geschätzt werden.

²Quelle: nach DVGW (2003a) und Hirner und Merkel (2005)

Rohrnetzabgabe Die Rohrnetzabgabe Q_A ist die Wassermenge, die von registrierten Kunden, dem WVU selbst oder anderen autorisierten Personen und Institutionen dem zu untersuchenden System entnommen wird. Sie gliedert sich in die in Rechnung gestellte Komponente Q_{AI} und in die nicht in Rechnung gestellte Komponente Q_{AN} . Der größte Teil der Rohrnetzeinspeisung sollte sich in Q_{AI} wiederfinden. Dazu gehören die Abgaben an registrierte häusliche, industrielle, kommerzielle, landwirtschaftliche und institutionelle Verbraucher, die über eine permanente Anschlussleitung an das Rohrnetz angeschlossen sind und für ihre Wasserentnahme eine Rechnung erhalten (AWWA, 2009). In Deutschland ist der Großteil der Kunden mit einem Wasserzähler ausgestattet, so dass der exakte Verbrauch gemessen und in Rechnung gestellt werden kann. Wo dies nicht der Fall ist, ist das WVU dazu gezwungen, den Verbrauch abzuschätzen und über eine Pauschale abzurechnen (ungemessene in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe). Auch Exporte an Weiterverteiler zählen zu der gemessenen und in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe (Lambert und Hirner, 2000).

Zur Rohrnetzabgabe Q_A gehören weiterhin Wassermengen, die für eine Vielzahl von Zwecken dem System entnommen werden. Dazu zählen laut DVGW (1986), DVGW (2003a), AWWA (2009) unter anderem:

- Brandbekämpfung und Feuerlöschübungen
- Turnusmäßige Spülung von Rohrleitungen
- Spülung zur Frostsicherung und andere Sonderspülungen
- Spülung der Kanalisation und Straßenreinigung
- Bewässerung von Parks und Grünanlagen, Betrieb öffentlicher Brunnen
- Eigenbedarf des WVU in der Wassergewinnung, -aufbereitung und -förderung
- Druckprüfungen und Behälterreinigungen
- Spülungen nach Neuverlegungen und nach der Behebung von Rohrschäden
- Entleerung von Leitungen
- Abgaben an temporäre Kunden (Baustellen, Zirkusse, o.ä.)
- Notversorgung über Hydranten

Jeder Typus dieser Rohrnetzabgaben kann gemessen und ungemessen erfolgen, in Rechnung gestellt werden oder nicht, je nach gängiger Praxis des WVU. Werden sie nicht gemessen, schlagen sie sich in der Bilanz als Verluste nieder (Feldtmann, 1985). Der ÖVGW (2009) fordert daher in seiner Richtlinie W 63, dass möglichst wenige der oben angeführten Rohrnetzabgaben ungemessen bleiben. Wo möglich sollen fest installierte oder mobile Durchflussmessgeräte (Zählerstandrohre o.ä.) eingesetzt werden um Abgaben an Dritte zu erfassen. Nur dort, wo der Einbau bzw. die Verwendung von Messeinrichtungen nicht möglich oder unwirtschaftlich ist, soll auf qualifizierte Schätzungen zurückgegriffen werden (ÖVGW, 2009).

Scheinbare Wasserverluste Scheinbare Wasserverluste Q_{VS} sind nicht-physische Verluste, die entstehen, wenn Wasser erfolgreich zum Kunden geliefert wird, aber nicht korrekt gemessen oder abgerechnet wird. Sie entstehen durch Abweichungen der Wasserzähler, durch Schleichverluste, Datenhandhabungsfehler und Wasserdiebstahl. Bei der Wasserbilanzierung müssen die scheinbaren Verluste berücksichtigt werden, da anderenfalls die Höhe der realen Wasserverluste Q_{VR} nicht exakt ermittelt werden kann. Da die Komponenten von Q_{VS} nicht gemessen werden können, sind geeignete Verfahren für eine qualifizierte Abschätzung ihrer Höhe anzuwenden (s. Abschnitt 4.3.2). Die Wasser-Fachverbände benutzen verschiedene Ansätze, um die Ursachen der scheinbaren Wasserverluste zu kategorisieren, wie Tabelle 3.1 zeigt.

Tabelle 3.1: Kategorien scheinbarer Wasserverluste

| Kategorie | DVGW | ÖVGW | IWA | AWWA |
|---|------|------|-----|------|
| Zählerabweichungen und Abgrenzungsverluste bei Ablesung | X | | | |
| Zählerabweichungen und Fehler bei der Rechnungslegung | | X | | |
| Kundenwasserzähler-Ungenauigkeit | | | X | X |
| Schleichverluste | X | X | | |
| Wasserdiebstahl bzw. unzulässige Wasserentnahme | X | X | X | X |
| Datenhandhabungsfehler | | | | X |

Quellen: DVGW (2003a), ÖVGW (2009), Lambert und Hirner (2000) und AWWA (2009)

Reale Wasserverluste Die realen Wasserverluste Q_{VR} eines Wasserversorgungssystems entstehen durch Leckagen infolge von Rohrbrüchen und Undichtigkeiten im Rohrnetz und durch das Überlaufen von Behältern. Ihre Höhe kann nur ermittelt werden, wenn zuvor die Rohrnetzeinspeisung, die Rohrnetzabgabe und die scheinbaren Wasserverluste hinreichend genau bestimmt wurden.

Nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe Die Summe aus den gesamten Wasserverlusten Q_V und der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} bildet die so genannte nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe Q_{NR} . Q_{NR} bezeichnet also die Menge an Wasser, für die einem WVU bei der Gewinnung, Aufbereitung und Förderung Kosten entstehen, denen aber keinerlei Einnahmen gegenüberstehen. International hat sich dafür die Bezeichnung Non-revenue water (NRW) durchgesetzt.

3.2.3 Wasserverschwendung

Wasserbilanzen enden in der Regel am Kundenwasserzähler, an dem die Rohrnetzabgabe registriert wird. Wasserverschwendung, die innerhalb der Hausinstallation des Kunden stattfindet, wird daher bei der Erstellung von Wasserbilanzen nicht berücksichtigt. Diese Wasserverschwendung lässt sich in zwei grundlegende Typen unterscheiden: vorsätzliche Verschwendung (z.B. laufende Wasserhähne) und Leckagen aufgrund mangelhafter oder defekter Installationen (z.B. undichte Wasserhähne oder Toilettenspülungen) (Farley, 2001). Insbesondere der zweite Verschwendungstyp kann Einfluss auf die Wasserverluste eines WVU haben: Da diese kleinen Leckagen sehr geringe Durchflussraten haben, die oft unterhalb des Anlaufpunktes Q_a des Wasserzählers liegen (s. Abschnitt 3.4.1.1), werden sie nicht als Rohrnetzabgabe registriert. Abbildung 3.3 illustriert am Beispiel eines tropfenden Wasserhahns, wie hoch die Schleichverluste sein können, die ungemessen den Kundenwasserzähler passieren. Ein tropfender Wasserhahn schadet also in der Regel nicht dem Kunden, sondern verursacht Schleichverluste und damit finanziellen Schaden für das WVU. Die AWWA (2009) schlägt in ihrem Manual M36 eine erweiterte Wasserbilanz vor, in der die Wasserverschwendung im Versorgungsgebiet analysiert und als Teil der Rohrnetzabgabe berücksichtigt wird.

Drastischer wirkt sich Wasserverschwendung in Systemen aus, in denen die Rohrnetzabgabe an die Kunden nicht mit Wasserzählern erfasst wird. Laut Mutschmann und Stimmelmayer (2011) führt das „Fehlen einer Verbrauchskontrolle durch Wasserzähler und Wasserabgabe nur

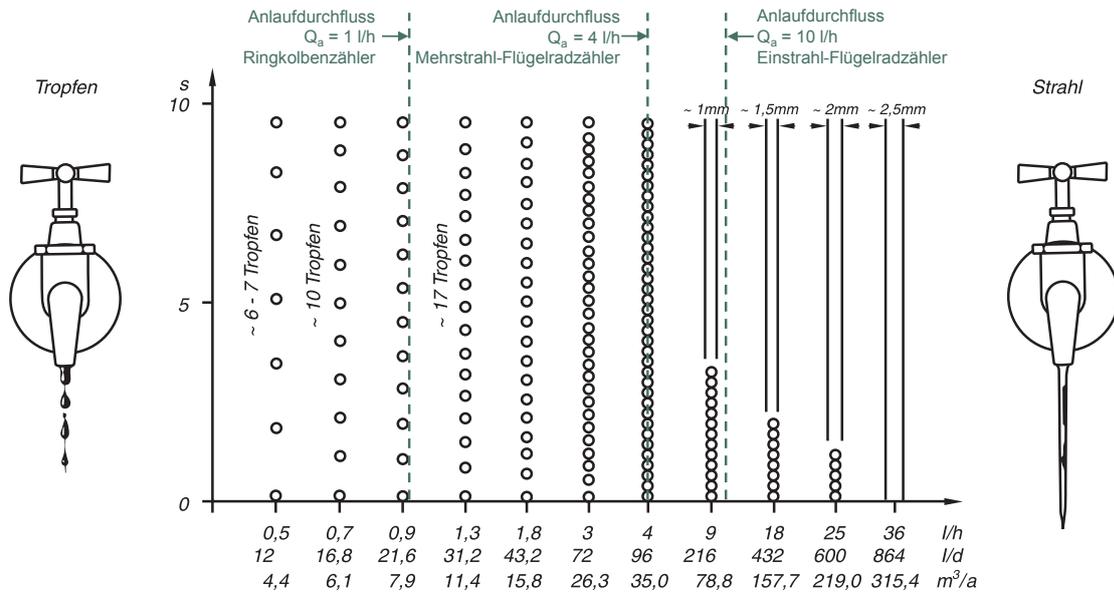


Abbildung 3.3: Tropfverluste am Wasserhahn und Anlaufdurchfluss Q_a verschiedener Wasserzählertypen³

nach Pauschaltarif [...] zu unkontrollierbarer Wasserverschwendung mit großen Spitzenwerten [...] bis zu 100 % und mehr über den normalen Verbrauchswerten“. Pauschaltarife führen also in der Regel zu Wasserverschwendung und zusätzlich zu einer Unterschätzung des realen Verbrauchs durch das WVU. Folgen sind die Zunahme der scheinbaren Wasserverluste und Mindereinnahmen für das WVU.

3.3 Reale Wasserverluste

3.3.1 Zusammenhang zwischen Schäden und Wasserverlusten

Reale Wasserverluste entstehen durch Leckagen, die in der Regel auf Schäden an einzelnen Bestandteilen des Rohrnetzes zurückzuführen sind. Eine Ausnahme davon bilden die Wasserverluste durch überlaufende Wasserbehälter, die häufig durch Bedienungsfehler oder die mangelhafte Regelung der Anlage verursacht werden. Der DVGW (1998a) definiert in seinem Arbeitsblatt W 395 einen Schaden als eine „lokale unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit“ einer Anlage oder eines Anlagenteils, die „in der Regel mit Wasseraustritt verbunden“ ist. Betrachtet man die Zusammenhänge zwischen Schäden und realen Wasserverlusten in einem Wasserversorgungsnetz, lässt sich folgendes Grundmuster erkennen, das in Abbildung 3.4 veranschaulicht wird.

Schadensstelle Ein Schaden tritt immer an einer so genannten Schadensstelle auf. Diese bezeichnet das „Anlagenteil, das in seiner Funktionsfähigkeit unzulässig beeinträchtigt ist“ (DVGW, 1998a). In einem Wasserversorgungssystem lassen sich Schadensstellen in drei Hauptgruppen unterteilen, nämlich in die Gruppe der Rohre und Rohrverbindungen, die Gruppe der Armaturen und Anschlussleitungen sowie in die Gruppe der Wasserbehälter.

³Quelle: nach VDI (2000), ergänzt um Anlaufdurchfluss Q_a verschiedener Zählertypen

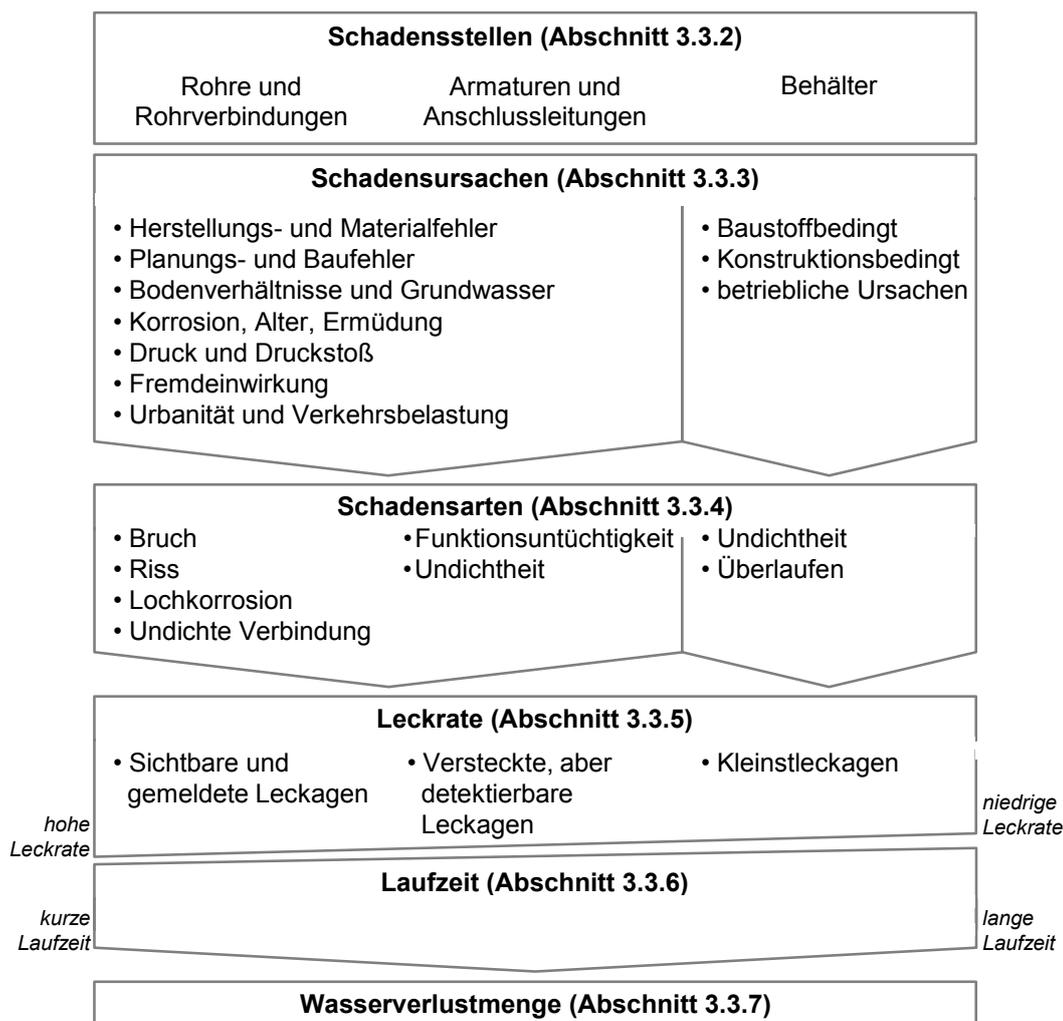


Abbildung 3.4: Zusammenhänge zwischen Schäden und Wasserverlusten

Generell können Wasserverluste auch an Pumpen auftreten, diese sind aber in der Regel so gering, dass sie im Rahmen dieser Arbeit außer Betracht gelassen werden.

Schadensursache Als Schadensursache kommen eine Vielzahl von Einzelfaktoren und deren Zusammenwirken in Frage. Diese sind zum Beispiel Materialfehler, Planungsfehler, Bodenaggressivität, Fremdeinwirkung, Druckstoß etc. Verschiedene Schadensursachen bedingen jeweils unterschiedliche Schadensarten.

Schadensart Für jede Schadensstelle gibt es mehrere mögliche Schadensarten. In der Gruppe der Rohre und Rohrverbindungen lassen sich die Schadensarten unterteilen in Risse, Brüche, Lochkorrosion sowie undichte Verbindungen. In der Gruppe der Armaturen und Anschlussleitungen differenziert der DVGW weiterhin zwischen Undichtheit und Funktionsuntüchtigkeit (DVGW, 1998a).

Leckrate In Abhängigkeit von der Schadensstelle, Schadensart und dem Betriebsdruck ergibt sich die individuelle Leckrate eines Schadens. Anhand der Leckrate lassen sich Schäden

unterteilen in sichtbare und gemeldete Leckagen, nicht sichtbare aber detektierbare Leckagen sowie nicht detektierbare Kleinstleckagen. Die Leckrate kann zeitlichen Veränderungen unterliegen, die beispielsweise von Druckschwankungen oder Veränderungen der Schadensstelle (Vergrößerung, Aufweitung einer Leckage) abhängen.

Laufzeit Die Laufzeit einer Leckage hängt von der Leckrate, aber auch von der Schadensstelle und dem umgebenden Boden und nicht zuletzt vom Wasserverlustmanagement eines WVU ab. Schäden mit hohen Leckraten werden in der Regel schnell lokalisiert und behoben, während Kleinstleckagen sehr lange bis nahezu unbegrenzte Laufzeiten aufweisen und oft nur zufällig entdeckt werden.

Wasserverlustmenge Die entstandene Wasserverlustmenge einer Leckage bzw. eines Schadens ergibt sich aus dem Produkt der Leckrate mit der Laufzeit des Wasseraustritts (DVGW, 2003a). Man geht davon aus, dass die größten Verlustmengen in Wasserversorgungsnetzen an lang laufenden Kleinstleckagen entstehen.

3.3.2 Schadensstellen

3.3.2.1 Rohrleitungen und Rohrverbindungen

Wie in Kapitel 2 gezeigt wird, bestehen Wasserversorgungssysteme aus vielen Kilometern von Rohrleitungen und Formstücken unterschiedlicher Materialien, Durchmesser, Verbindungsarten und Baujahre. Die Rohrleitungen sind zum größten Teil unterirdisch installiert, wo sie einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ausgesetzt sind, die zur Entstehung von Schäden und in der Folge zu Wasserverlusten führen können. Alle Bestandteile eines Rohrnetzes unterliegen einem permanenten physischen Verschleiß, der zu einer Begrenzung der „technischen und betriebswirtschaftlichen Nutzungsdauer“ führt (Roscher u. a., 2000). Aufgrund der schweren Zugänglichkeit sind die regelmäßige Inspektion und Wartung für den Großteil der Rohrleitungen und Rohrverbindungen nicht durchführbar. Eine Zustandsbeurteilung lässt sich nur punktuell und durch Aufgrabungen, etwa zur Schadensbehebung, durchführen (Roscher u. a., 2000). Schäden werden üblicherweise beim Auftreten von Wasserverlusten im Rahmen der Leckortung entdeckt und behoben.

Die Auswertung der DVGW-Schadensstatistik der Jahre 1997 bis 2004 ergab, dass an Haupt- und Versorgungsleitungen in Deutschland die mittlere Schadensrate über alle Rohrwerkstoffe ca. 0,10 bis 0,15 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr beträgt (Niehues, 2006). Nach DVGW Arbeitsblatt W 400-3 liegt die Schadensrate an deutschen Haupt- und Versorgungsleitungen somit im mittleren ($> 0,1$ bis $\leq 0,5$ Schäden je km und Jahr) bis niedrigen ($\leq 0,1$ Schäden je km und Jahr) Bereich (s. Tabelle 2.4). Weiterhin lässt sich beobachten, dass der Rohrdurchmesser eine Rolle beim Auftreten von Schäden spielt: Leitungen kleineren Durchmessers (bis ca. 150 mm) versagen häufiger als Leitungen mit größerem Durchmesser (Rötsch, 1999).

3.3.2.2 Armaturen und Anschlussleitungen

Die Fachverbände DVGW, ÖVGW und IWA sind sich darüber einig, dass die Anzahl der Anschlussleitungen einen bedeutenden Einfluss auf die Höhe der Wasserverluste in einem Wasserversorgungssystem hat. Weimer (2001) schreibt im Bericht des DVGW für den IWA World Water Congress in Berlin im Jahre 2001, dass „Anschlussleitungen als der Schwachpunkt der meisten Wasserverteilungssysteme angesehen werden können, da sie zu hohen Schadensraten

und großen Wasserverlustmengen führen“. Die ÖVGW stellt in der Richtlinie W 63 *Wasserverluste in Trinkwasserversorgungssystemen* fest, dass mit zunehmender Anschlussdichte aufgrund der Anzahl an Anbohrschellen und Armaturen die Wasserverluste in der Regel steigen (ÖVGW, 2009). Lambert u. a. (1999) weisen ebenfalls darauf hin, dass in gut geführten Wasserversorgungssystemen das Gros der Schäden an den Anschlussleitungen auftritt und nicht an den Haupt- und Versorgungsleitungen.

Arenz u. a. (2007) stellen fest, dass auch die Armaturendichte, d.h. die mittlere Anzahl von Schiebern, Klappen, Hydranten und sonstigen Armaturen pro Leitungskilometer, die Höhe der Wasserverluste beeinflusst. Laut (Niehues, 2006) lag im Jahr 2004 die Schadensrate für Hausanschlussleitungen bei ca. sechs Schäden pro 1.000 Hausanschlüsse und Jahr, für Armaturen bei ca. 16 Schäden pro 1.000 Stück und Jahr.

3.3.2.3 Behälter

Die DIN EN 1508 *Anforderungen an Systeme und Bestandteile der Wasserspeicherung* schreibt vor, dass Wasserbehälter für die Trinkwasserversorgung wasserdicht herzustellen sind (DIN, 1998). Wasserdichtheit soll mithilfe wasserundurchlässiger Baumaterialien (wie Stahl- oder Spannbeton) oder mittels einer zusätzlichen Innenbeschichtung so hergestellt werden, dass die „Wasserdurchlässigkeit des Bauwerks über das zulässige Maß hinaus verhindert“ wird (DIN, 1998). Es wird allgemein davon ausgegangen, dass im Verhältnis zu den Wasserverlustmengen an Rohrleitungen, Armaturen und Anschlussleitungen nur ein geringer Teil der realen Wasserverluste durch schadhafte Behälter verursacht wird. In einer deutschlandweiten Umfrage zu Schäden an Trinkwasserbehältern wurden insgesamt 5.098 Behälter erfasst, die zusammen über 6,9 Mio. m^3 Speichervermögen (von insgesamt 13,4 Mio. m^3 in Deutschland) verfügen (Roth, 1998). Die Untersuchung ergab, dass 94 % der untersuchten Trinkwasserbehälter in erdüberdeckter und teilweise erdüberdeckter Bauweise ausgeführt sind (Roth, 1998). Wasserverluste infolge Undichtheiten sind daher visuell schwierig festzustellen, und es existieren keine exakten Zahlen zur Größenordnung der Wasserverluste aus Behältern in Deutschland.

Als Anhaltspunkt für das Wasserverlust-Potenzial von Wasserbehältern kann eine im Jahre 1990 durchgeführte Studie zum Zustand der Wasserbehälter in Frankreich angeführt werden. Beros (1998) berichtet, dass im Rahmen der Untersuchungen an ca. 6.000 Behältern an ca. 30 % der Behälter „Schäden der Wasserdichtheit“ gemeldet wurden. Bei Wassertürmen waren laut Beros (1998) sogar 42 % der untersuchten Behälter undicht, während nur an 16 % der überdeckten Behältern Schäden festgestellt wurden.

3.3.3 Schadensursachen

3.3.3.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt sollen die häufigsten Schadensursachen an den Bestandteilen eines Wasserversorgungssystems aufgezeigt werden. Die ersten sieben Abschnitte widmen sich Schadensursachen an Rohren und Rohrverbindungen. Anschließend folgen Abschnitte zu den Schadensursachen an Armaturen, Anschlussleitungen und an Behältern. Die Auswertung der DVGW-Schadensstatistik der Jahre 1997 bis 2004 zeigt, dass bei den Rohrleitungen am häufigsten Korrosion (34 % bei HW/VW bzw. 32 % bei AW) und Bodenbewegungen (27 % bei HW/VW bzw. 12 % bei AW) als Ursache für Schäden identifiziert wurden, wie Abbildung 3.5 veranschaulicht (Niehues, 2006)

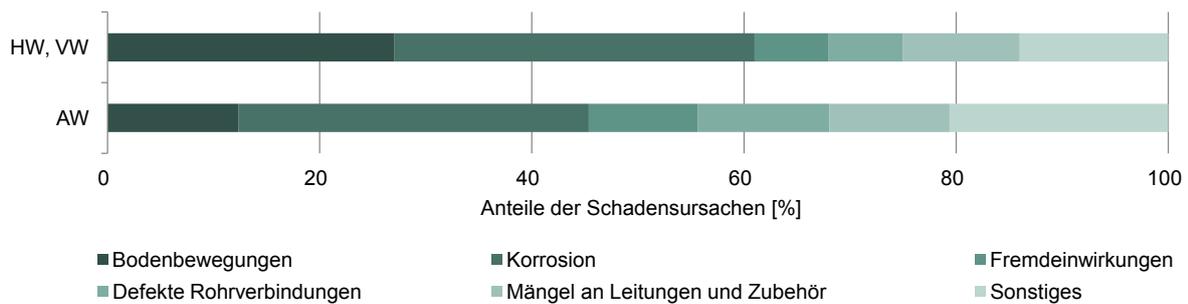


Abbildung 3.5: Prozentuale Anteile verschiedener Schadensursachen an Haupt- (HW), Versorgungs- (VW) und Anschlussleitungen (AW)⁴

3.3.3.2 Herstellungs- und Materialfehler

Oftmals treten bereits bei der Herstellung von Rohren Fehler auf, die später die Entstehung von Schäden begünstigen. Weiterhin sind werkstoffspezifische Eigenschaften bekannt, die die Korrosion oder das Auftreten von Leckagen begünstigen. Dieses Kapitel beschreibt typische Herstellungs- und Materialfehler der am häufigsten anzutreffenden Rohrwerkstoffe.

Graugussrohre (GG) der 1. und 2. Generation Die Graugussrohre der 1. Generation, die teilweise auch heute noch einen gewissen Anteil städtischer Rohrnetze ausmachen, wurden ab Ende des 19. Jahrhunderts im Sandgussverfahren hergestellt. Bei diesem Herstellungsverfahren konnte es zu einem Versatz des Gusskerns kommen, was eine Unterschreitung der Mindestwanddicke zur Folge hatte. Roscher u. a. (2000) beschreiben, dass beim Gießvorgang Lunker und Gasblasen entstehen konnten und häufig „inhomogene Materialverteilung sowie Sand- und Schlackeeinspülungen“ anzutreffen sind. Diese schwächen die Rohrwand und wirken als Rissbildner, indem sie die Querschnittsfläche der Rohrwand reduzieren und Spannungsspitzen verursachen (Makar u. a., 2000).

Ab 1926 wurde die 2. Generation der Graugussleitungen im Schleudergussverfahren hergestellt. Die damals manuell geregelte Zufuhr des flüssigen Gusseisens in die rotierende Kokille führte ebenfalls zu Mindestwanddickenunterschreitungen. Die zunehmende Beimischung von Guss- und Stahlschrott führte zu einer „deutlichen Herabsetzung der Korrosionsresistenz“ (Roscher u. a., 2000).

Eine werkstoffspezifische Schwäche von Grauguss ist seine hohe Sprödigkeit, die darauf zurückzuführen ist, dass der im Gussprozess in Lösung gegangene Kohlenstoff bei der Erstarrung in Form von Graphitlamellen kristallisiert. Der lamellare Graphit unterbricht die metallische Struktur und verursacht somit die relativ geringe Festigkeit und das spröde Bruchverhalten von GG-Rohren (Ertelt u. a., 2009). Das macht Graugussrohre anfällig insbesondere gegen Bodenbewegungen. Bei mechanischer Überbeanspruchung versagen sprödbrechende GG-Rohre mit so genannten Schalenbrüchen, dabei entstehen schlagartig große Öffnungen mit sehr hohem Wasseraustritt (Ertelt u. a., 2009).

Duktile Gussrohre (Grauguss-globular, GGG) der 1. und 2. Generation Als ab ca. 1956 die erste Generation der duktilen Gussrohre in Deutschland eingeführt wurde, wurden die bruchanfälligen GG-Rohre bis 1969 fast gänzlich vom deutschen Markt verdrängt (Gras und

⁴Quelle: Niehues (2006)

Wolf, 1970). Durch den Zusatz einer geringen Menge Magnesium zur flüssigen Gusseisen-schmelze kristallisiert hierbei der Graphit kugelförmig, was eine deutlich höhere Festigkeit und die Fähigkeit zur elastisch-plastischen Verformbarkeit des Werkstoffes zur Folge hat (Ertelt u. a., 2009).

Bei der Einführung der GGG-Rohre ging man davon aus, dass diese ein ähnlich gutes Korrosionsverhalten wie Graugussrohre aufweisen würden (Fischer, 2011). Duktile Gussrohre wurden daher häufig nur mit einer dünnen Bitumenlack-Beschichtung zum Schutz vor Außenkorrosion und gänzlich ohne Innenkorrosionsschutz hergestellt. In der Folge traten „bereits nach 15 bis 20 Jahren erhebliche Anrostungen und punktuelle Durchrostungen an duktilen Gussrohrleitungen“ auf (Fischer, 2011). Ab 1968 wurde als Außenkorrosionsschutz eine Spritzverzinkung auf die unbehandelte Rohroberfläche aufgebracht, der anschließend mit einem bituminösen Überzug gegen Transportschäden und chemische Reaktionen mit aggressiven Böden geschützt wurde (Wolf, 1978).

Duktile Gussrohre der zweiten Generation besitzen eine werksseitige Zementmörtelauskleidung sowie eine kunststoffmodifizierte Zementmörtel-Umhüllung (Faserzement), die Bitumenlacke wurden nach und nach von Epoxidharz-Beschichtungen abgelöst (Ertelt u. a., 2009). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass duktile Gussrohre der ersten Generation um ein vielfaches korrosionsanfälliger waren als die der zweiten Generation und bis heute eine Schwachstelle im Leitungsbestand vieler WVU darstellen.

Stahlrohre der 1. bis 3. Generation Laut Anlage 4 des Arbeitsblattes W 395 zur Erstellung einer Schadensstatistik für Trinkwasserversorgungsnetze des DVGW (2007b) kann die Werkstoffgruppe Stahl in Stahlrohre der ersten Generation (einfacher Korrosionsschutz, bis ca. 1940), der zweiten Generation (verbesserter Korrosionsschutz ohne Faserzementumhüllung, ca. 1940 bis 1980) und der dritten Generation (verbesserter Korrosionsschutz mit Faserzementumhüllung, ab 1980) unterteilt werden. Typische Herstellungsfehler insbesondere bei Stahlrohren der ersten Generation sind das Aufbringen der Bitumenbeschichtung auf rostiger oder ungenügend gesäubert Oberfläche, Verwendung zu weichen Bitumens als Außenkorrosionsschutz sowie die Verwendung von Bitumenkaltanstrich als Innenkorrosionsschutz (Roscher u. a., 2000).

PVC-Rohre Polyvinylchlorid (PVC) gehört zur Gruppe der Thermoplaste, die aus linearen oder verzweigten Molekülfäden aufgebaut sind. Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Werkstoffes ist das Verformungsverhalten von PVC last-, temperatur- und zeitabhängig (Ant und Wehage, 1997). In der Folge kommt es zu Versprödung und damit zunehmender Bruchempfindlichkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Alter der Rohre (Roscher u. a., 2009).

PE-Rohre Roscher u. a. (2000) schreiben, dass herstellungsbedingte Schäden hauptsächlich zu Beginn des Einsatzes von Rohren aus Polyethylen (PE) (PE 40, PE 63) auftraten und auf eine „ungenügend eingestellte Langzeitbeständigkeit des Ausgangsmaterials“ zurückzuführen waren. Auch bei Rohren aus PE 80 kam es mit der Zeit zu einem Festigkeitsverlust von bis zu ca. 60 % innerhalb von 20 Jahren. Diese unmittelbaren Herstellungs- bzw. Materialfehler sind jedoch mit der fortschreitenden Entwicklung dieses Rohrwerkstoffes (PE 80, PE 100, PE-X) weitgehend verschwunden.

Stahlbeton- und Spannbetonrohre Bekannte herstellungsbedingte Schäden an Rohren aus Beton lassen sich in drei Gruppen unterteilen: falsche Betonrezeptur, zu geringe Bewehrungsüberdeckung und unzureichende statische Bemessung. Die ersten beiden Herstellungsfehler führen zu frühzeitiger Alterung des Betons und Korrosion der Bewehrung. Unzureichende statische Bemessung kann noch unterhalb der vorgesehenen Belastung zu Bauteilversagen führen (Roscher u. a., 2000).

Asbestzementrohre Bevor ihre Herstellung und Verwendung am 1. Januar 1995 verboten wurde, wurden Asbestzementrohre circa 60 Jahre lang in der deutschen Wasserversorgung eingesetzt. Bestehende Asbestzementleitungen dürfen aber weiterhin betrieben und repariert werden und stellen in manchen Wasserversorgungsnetzen eine nicht unbedeutende Materialgruppe dar, insbesondere im Bereich der ehemaligen DDR, in der sie häufig anstelle von GGG und PE-Rohren zum Einsatz kamen. Asbestzementrohre sind aufgrund der hohen Biegesteifigkeit des Werkstoffes besonders stoß- und schlagempfindlich und neigen zu Sprödbruch.

3.3.3.3 Planungsfehler

Laut Merkl (2008) ist das erdverlegte Rohrnetz wertmäßig mit circa 60 bis 80 % am Gesamtumfang der Wasserversorgungsanlagen beteiligt und damit der teuerste Teil eines Wasserversorgungssystems. Es ist meist schwer zugänglich und daher aufwendig zu sanieren oder zu ersetzen. Sorgfältige Planung soll dazu beitragen, eine gesicherte Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren zu gewährleisten und das Risiko von Schäden zu minimieren (DVGW, 2004). Dieser Abschnitt beschreibt typische Planungsfehler, die zu vorzeitigem Verschleiß von Rohrleitungen und Anlagenteilen führen können und die Entstehung von Leckagen begünstigen.

Fehler bei der Trassierung Ungünstige Trassierung, beispielweise durch Bergsenkungsgebiete, nicht standsichere Hänge sowie Überflutungsgebiete von Flüssen können zum Auftreten von Brüchen und Verbindungsfehlern führen (DVGW, 2004). Eine weitere Schadensquelle ist die Unterschreitung des empfohlenen Mindestabstands von 2,50 m zu Bäumen (DVGW, 1989). Die Untersuchungsergebnisse von Bosseler u. a. (2001) zeigen, dass Rohrleitungsgräben im urbanen Raum von Baumwurzeln in „Ermangelung anderer schwach verdichteter Bereiche als Raum für weiteres Wachstum erkannt“ werden und in der Folge Wurzelspitzen in Rohrmuffen eindringen können und die Dichtung beschädigen oder verschieben. Die Durchführung einer Baugrunduntersuchung ist zweckmäßig, um Informationen über Grundwasserstand und -beschaffenheit zu gewinnen sowie aggressive Böden zu erkennen, die die Auswahl eines besonderen Außenschutzes notwendig machen (Soiné u. a., 1998) (s. Abschnitt 3.3.3.6). Weiterhin sind Rohrleitungen möglichst nicht unterhalb der Fahrbahn, sondern in Bürgersteigen oder Randstreifen anzuordnen, um zusätzliche Belastungen aus dem Straßenverkehr zu minimieren (DVGW, 2004).

Dimensionierungsfehler Schäden durch Frost und Verkehrsbelastung sind durch die Wahl ausreichender Überdeckungshöhe auszuschließen. Um Schäden durch Druckstöße zu verhindern, sind Rohre, Verbindungen und Armaturen nicht nur auf den Systembetriebsdruck (DP, für engl. Design Pressure), sondern auf den höchsten Systembetriebsdruck (MDP, für engl. Maximum Design Pressure) auszulegen (s. Abschnitt 3.3.3.8). Alle Bauteile sollten über eine Sicherheitsreserve von ca. 2 bar über DP verfügen (Berndt u. a., 2001). Das Entstehen von Unterdrücken kann zu Schäden und im Extremfall zum Kollabieren der Rohrleitung führen

und muss ebenfalls durch korrekte Auslegung der Anlage verhindert werden. Alle Rohrleitungsteile sind auf eine möglichst lange Nutzungsdauer (mindestens 50 Jahre) auszulegen (DVGW, 2004).

Wahl des falschen Werkstoffes Rohrwerkstoffe sind nicht nur in Bezug auf ihre Festigkeit gegenüber innere und äußere Belastungen auszuwählen. Zudem spielt insbesondere bei metallischen Werkstoffen die Wahl des Korrosionsschutzes eine bedeutende Rolle (Rötsch, 1999). Die Wahl des passiven oder aktiven Innen- bzw. Außenschutzes ist sorgfältig auf die umgebenden Bodenverhältnisse, die Grundwassereigenschaften und das zu transportierende Wasser abzustimmen, sonst droht eine vorzeitige Schädigung oder Zerstörung des Werkstoffes (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

3.3.3.4 Fehler bei Bauausführung und Inbetriebnahme

Beim Bau und der Inbetriebnahme von Rohrleitungen können handwerkliche Fehler dazu führen, die Lebenserwartung von Rohren zu senken und die Wahrscheinlichkeit von Schäden und Leckagen zu erhöhen. Regeln für die technisch einwandfreie Verlegung von Rohrleitungssystemen sind in der DIN EN 805 vorgegeben (DIN, 2000b). Undichtheiten werden gewöhnlich im Rahmen der Wasserdruckprüfung festgestellt und behoben, doch manche Fehler führen erst nach einiger Zeit zu Schäden, wenn die Leitung bereits in Betrieb ist.

Unsachgemäßer Transport und Lagerung Bei Transport, Entladung und Lagerung kann es zu Beschädigungen der Rohre kommen. Schleifen der Rohre über den Boden ist zu unterbinden, da hierdurch die Umhüllung metallischer Werkstoffe beschädigt wird und bei Kunststoffrohren Kerben entstehen, die die Schadensanfälligkeit erhöhen. Für die Lagerung sind geeignete Rohrlager zu errichten. Kunststoffrohre sind zusätzlich vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen um Versprödung der Werkstoffe vorzubeugen. Vor dem Einbau sollten Innen- und Außenschutz, Druckstufe, Wandstärke und die Dichtungsflächen der Rohre zumindest stichprobenartig überprüft und beanstandete Rohre von der Verwendung ausgeschlossen werden (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

Verlege- und Verbindungsfehler Rohrleitungsteile sind grundsätzlich in frostfreier Tiefe zu verlegen oder mittels geeigneter Frostschutzmaßnahmen zu schützen (z.B. an Rohrbrücken), um Schäden durch Einfrieren zu verhindern. Roscher u. a. (2009) stellen fest, dass ein Großteil der verlegebedingten Schäden durch mangelhafte Verfüllung und Verdichtung des Rohrauflegers hervorgerufen werden, wodurch Rohrbrüche in Folge vom Auflasteinwirkung oder unkontrollierter Setzung des Bodens auftreten können. Die Auswertung der Ergebnisse der DVGW-Schadensstatistik Wasser der Jahre 1997 bis 2004 ergab, dass 30 % der Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen auf Bodenbewegungen zurückzuführen waren (Niehues, 2006).

Ungeeignetes (grobes, steiniges) Material zur Einbettung, Seitenverfüllung und Abdeckung des Rohres können zur Beschädigung von Umhüllungen und nachfolgenden Korrosionsschäden bei Stahl- und Gussleitungen führen. Insbesondere bei Kunststoffrohren sind Schäden auf mangelhafte Rohrbettung und das Vorhandensein scharfkantiger Steine unter oder über den Rohren zurückzuführen (Roscher u. a., 2009). Die Einbettung in bindige oder aggressive Böden führt zu verstärkter Außenkorrosion an metallischen Rohrleitungen.

Als Schäden infolge mangelhafter Verbindung an Muffenrohren sind im Einzelnen die Verwendung ungeeigneter Dichtungen, zu große Abwinkelung der Rohre in der Muffe sowie unzureichende axiale Fixierung zu nennen. An Schweißverbindungen von Stahlrohren tritt häufig

das Problem auf, dass der auf der Baustelle ausgeführte nachträgliche Innen- und Außenkorrosionsschutz in der Montageschweißzone fehlt oder unsachgemäß durchgeführt wurde. Korrosionsschäden sind die Folge (Roscher u. a., 2009). An PVC-Rohren mit Klebemuffen wurde festgestellt, dass Klebemittelreste das Rohr anlösen und ebenfalls zu Rohrbrüchen führen können (Soiné u. a., 1998). Beim PE-Schweißen sind laut Roscher u. a. (2009) Schäden auf ungenügende Erhitzung der Rohrenden und Nichteinhaltung der Anpresszeiten zurückzuführen. Defekte Rohrverbindungen machen laut DVGW-Schadensstatistik nur 7 % aller Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen aus, an Kunststoffleitungen sind es aber immerhin 17 % (PE) bzw. 23 % (PVC) (Niehues, 2006).

Schäden bei der Inbetriebnahme Bei der Inbetriebnahme von Leitungsabschnitten verdrängt das einströmende Wasser die in der Leitung befindliche Luft. Sie entweicht - teilweise mit hoher Geschwindigkeit - durch Entlüftungsventile. Wird die Leitung zu schnell befüllt und schließt ein Entlüftungsventil schlagartig, so wird die Wassersäule dadurch abrupt gestoppt und es kann zu einem Druckstoß kommen. Auf den Zusammenhang zwischen Druckstößen und Schäden wird im Abschnitt 3.3.3.8 näher eingegangen.

3.3.3.5 Korrosion, Alterung und Ermüdung

Spezifische Materialeigenschaften und die zahlreichen äußeren Einflüsse, denen erdverlegte Rohrleitungen ausgesetzt sind führen zu Veränderungen an den Rohrwandungen und verkürzen die Lebensdauer der Rohre.

Korrosion Als Korrosion bezeichnet man die „Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffs bewirkt“ (Henning und Knöfel, 2002). Korrosion an Rohren wird grundsätzlich in Innen- und Außenkorrosion unterschieden. Beschleunigt wird Außenkorrosion durch das Auftreten von Streuströmen in der Umgebung von gleichstrombetriebenen Bahnen, erdverlegten Mittelspannungsleitungen (20 kV) und Stahlbetonfundamenten (Roscher u. a., 2009). Graphitierung, auch Spongiose genannt, ist eine Sonderform der Korrosion die an Rohren aus Gusseisen auftritt. Dabei werden in sauerstoffarmen, sauren Böden die metallischen Bestandteile aus dem Werkstoff herausgelöst bis nur noch ein Gerüst aus korrosionsbeständigen Graphitlamellen, Phosphiden und Sulfiden zurückbleibt. Dabei nimmt die Festigkeit des Rohrs stark ab (Böhm, 1993). An der Rohrinneenseite entsteht Spongiose häufig als Belagskorrosion, bei der Korrosionsprodukte an der Rohrsohle die Zufuhr von Sauerstoff an die Metalloberfläche verhindern wodurch sich anodische Bereiche ausbilden (Roscher u. a., 2009).

Als Gegenmaßnahme kommen passive Schutzmaßnahmen (hauptsächlich Anstriche und Beschichtungen zur Trennung der Rohroberflächen von den angreifenden Elektrolyten Boden und Wasser) sowie aktive Schutzmaßnahmen (z.B. kathodischer Korrosionsschutz, KKS) zum Einsatz (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

Alterung und Ermüdung Basierend auf einer internationalen Befragung unter WVU konstatiert Weimer (1999b), dass das „Alter der Rohrleitung als Schadensursache nur eine untergeordnete Rolle spielt“. Dem stellt Herz (1996) gegenüber, dass Untersuchungen an zehn europäischen Wasserversorgungsnetzen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Leitungsalter und Schadensrate belegen. Dies lässt sich mit großer Sicherheit für Graugussleitungen und Duktulgussleitungen der 1. Generation sagen, für die ein ausreichend langer Beobachtungszeitraum vorliegt, während das Alterungsverhalten neuerer Werkstoffe (Duktulguss der

2. Generation, PE) noch nicht zuverlässig beschrieben werden kann (Kropp und Herz, 2005). Nach Roscher u. a. (2009) kann bei älteren Kunststoffrohren mit ungenügender Zeitstandfestigkeit Versprödung zu einer erhöhten Schadenshäufigkeit führen.

3.3.3.6 Bodenverhältnisse und Grundwasser

Weimer (1999a) legt dar, dass die im Versorgungsgebiet überwiegend anstehende Bodenart den wichtigsten Einfluss auf die Entstehung von Schäden und die Höhe der Wasserverluste hat. Innerhalb der Bodenarten gibt es laut DVGW Arbeitsblatt W 392 drei wesentliche Parameter, die einzeln oder in Kombination auftreten können (DVGW, 2003a):

Korrosion infolge Bodenaggressivität Allgemein lässt sich sagen, dass die Bodenaggressivität bei bindigen Böden höher ist als bei nichtbindigen Böden. Die Bodenaggressivität beschreibt die Gesamtheit aller Merkmale eines Bodens, die die Außenkorrosion metallischer Rohrleitungen beeinflussen. Merkmale, die die Bodenaggressivität erhöhen sind organische Bestandteile (Torf, Moor), Verunreinigungen (Schlacke, Koks, Asche, Abwässer), niedriger pH-Wert, hoher Wassergehalt, niedriger spezifischer Bodenwiderstand, Bodeninhomogenität, Grundwasserschwankungen und andere. Für die Beurteilung der Bodenaggressivität und somit der Korrosionswahrscheinlichkeit ist im Arbeitsblatt GW 9 des DVGW ein Bewertungsverfahren beschrieben, mit dessen Hilfe Bodenproben in vier Bodenklassen eingeteilt werden können (DVGW, 2011). Tabelle 3.2 zeigt die Einteilung in Bodenklassen und ordnet Bodenarten nach ihrer Aggressivität.

Tabelle 3.2: Bodenklassen und Bodenaggressivität

| Bodenklasse | Aggressivität | Bodenart mit Beispielen |
|-------------|----------------------------------|--|
| <i>Ia</i> | <i>praktisch nicht aggressiv</i> | <i>grober Mineralboden: Sand, Kies, Splitt, Steine</i> |
| <i>Ib</i> | <i>schwach aggressiv</i> | <i>feiner Mineralboden: Schluff, Löß, Kalkboden, Sand mit Ton, Lehm oder Mergel vermengt</i> |
| <i>II</i> | <i>aggressiv</i> | <i>toniger Mineralboden: Ton, Lehm oder Mergel</i> |
| <i>III</i> | <i>stark aggressiv</i> | <i>gemengter Humus : Moorboden reiner Humus: Flach- oder Hochmoortorf Faulschlamm : Mudden, Schlick Aufschüttungen: Asche, Erz, Schutt, Schlacke</i> |

Quellen: nach DVGW (2011) und Wossog u. a. (2008)

Bodenbewegung Bewegungsvorgänge im Boden erzeugen lokale, mechanische Beanspruchungen und rufen Biege- und Scherbelastungen an Rohren hervor, die zu Rohrbrüchen führen können. Bodenbewegungen können zahlreiche Auslöser haben, zum Beispiel zunehmende Verkehrsbelastung, bauliche Maßnahmen in der Nähe der Leitung, Bergsenkungen sowie Temperatur- und Bodenfeuchteänderungen (DVGW, 1998a). Kottmann (1980) stellt fest, dass es am Ende heißer Sommer (September) in Folge von Austrocknung sowie in den

Wintermonaten (Dezember bis Februar) in Folge von Gefriervorgängen an der Erdoberfläche zu einer Häufung von Rohrbrüchen an Rohren aus spröden Werkstoffen kommt. Bindige Böden quellen bei Wasseraufnahme und schrumpfen bei Wasserentzug, wenn z.B. entstehende Eislinsen an der Erdoberfläche das Wasser aus dem Leitungsbereich nach oben abziehen. Durch die Volumenänderung des Bodens heben bzw. senken sich Rohre und Einbauten (z.B. Hydranten) und verursachen Biegemomente an den Einspannstellen. An Rohren, die wechselnde Bodenarten mit unterschiedlichem Schrumpfmaß durchfahren, entstehen zusätzlich Scherbewegungen (Böhm, 1993). In seiner Dissertation zeigt Kottmann (1978), dass die Zahl der Rohrbrüche eines Monats vorwiegend mit der Bodenfeuchtigkeit des vorhergegangenen Monats zusammenhängt: Die Schadenshäufigkeit steigt demnach mit zunehmender Trockenheit im Vormonat.

Besonders bei spröden Rohrwerkstoffen sind Bodenbewegungen eine der Hauptursachen für Schäden, wie die DVGW-Schadensstatistik belegt. Bei GG-Rohren wurden 60 %, bei Faserzementrohren 27 % und bei PVC-Rohren immerhin 21 % der Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen durch Bodenbewegungen verursacht. Bei PE und GGG sind es dagegen nur 14 % bzw. 15 % und bei Stahl lediglich 3 % (Niehues, 2006).

Erkennbarkeit von Leckstellen In kiesigen Böden und klüftigem Fels ist die Erkennbarkeit von Leckagen an der Erdoberfläche deutlich erschwert. Daher ist gegenüber anderen Bodenarten mit längeren Laufzeiten der Leckagen und folglich mit höheren Wasserverlusten zu rechnen (DVGW, 2003a).

Grundwasser Aggressive Grundwässer können zu einer verstärkten Außenkorrosion metallischer Rohrwerkstoffe beitragen. Wechselnde Grundwasserstände und Grundwasserströmungen erhöhen zudem das Risiko von Aus- und Unterspülungen von Rohrleitungen bis hin zu mechanischem Abtrag der Rohraußenseite durch Erosion (Roscher u. a., 2009).

3.3.3.7 Beschaffenheit des transportierten Trinkwassers

Innenkorrosion entsteht hauptsächlich bei metallischen Werkstoffen aufgrund komplexer Wechselwirkungen zwischen der Wasserbeschaffenheit, den Werkstoffeigenschaften und den Betriebsbedingungen. In Folge werden Schichten von Korrosionsprodukten aufgebaut, die, in Abhängigkeit von den vorherrschenden Randbedingungen, vor weiterer Korrosion schützen oder zu einem Korrosionsschaden führen. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen chemischen und physikalischen Eigenschaften lässt sich die Korrosivität eines Wassers nur schwer anhand von Einzelwerten beschreiben sondern ist für die Summe der Einzeleigenschaften für jedes Wasser gesondert zu ermitteln. Im Folgenden werden chemische Parameter der Wasserbeschaffenheit und ihr Einfluss auf Korrosionsschäden kurz beschrieben.

Temperatur Die Veränderung der Wassertemperatur beeinflusst die Geschwindigkeit, mit der chemische Prozesse ablaufen.

pH-Wert Ein pH-Wert $< 7,0$ begünstigt Säurekorrosion, Metalle und Metalloxide werden gelöst. Schützende Deckschichten bilden sich erst ab $\text{pH} > 7,0$. Flächenkorrosion findet sehr langsam statt in Wässern mit $\text{pH} > 8,5$ (DIN, 2005).

Wasserhärte Die Wasserhärte ist vom Anteil gelöster Kalzium- und Magnesiumverbindungen abhängig. Weiches Wasser fördert die Korrosion metallischer Werkstoffe und verhindert die Bildung von Deckschichten (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

Säure- und Basenkapazität Mit der Säure- und Basenkapazität wird das Pufferungsvermögen eines Wassers gemessen. Die Säurekapazität gibt in etwa den Hydrogencarbonatgehalt (gebundene Kohlensäure) eines Wassers wieder (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Die Wahrscheinlichkeit für Lochkorrosion sinkt mit steigendem Gehalt von Hydrogencarbonat-Ionen, die dazu in der Lage sind, die durch Hydrolyse von Eisen-Ionen innerhalb des Loches gebildeten Säuren zu neutralisieren (DIN, 2005). Für die Ausbildung einer schützenden Deckschicht in metallischen Rohrleitungen sollte die Säurekapazität $K_{S4,3}$ größer 1 mmol/l betragen (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Die Basenkapazität $K_{B8,2}$ entspricht etwa dem Gehalt an freier Kohlensäure. Ein hohes Gehalt freier Kohlensäure erhöht die Korrosionsgeschwindigkeit (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011) und begünstigt beispielsweise Spongiose (DIN, 2005) (s. Abschnitt 3.3.3.5). Laut Mutschmann und Stimmelmayer (2011) sind erhöhte Werte für $K_{B8,2}$ ($> 0,5 \text{ mmol/l}$) nur für verzinkte Eisenwerkstoffe und Kupfer problematisch.

Gelöster Sauerstoff Für die Bildung schützender Deckschichten ist ein hoher Sauerstoffgehalt erforderlich, laut Mutschmann und Stimmelmayer (2011) sollte er mehr als $6,0 \text{ mg/l}$ betragen.

Calcium Calcium gehört zu zu den Erdalkalien und ist einer der Härtebildner des Wassers. Ein Calciumgehalt von mindestens 20 mg/l wird laut Mutschmann und Stimmelmayer (2011) für die Ausbildung der Schutzschicht in metallischen Rohrleitungen als erforderlich angesehen.

Chlorid-, Nitrat- und Sulfat-Gehalt Die Wahrscheinlichkeit für Lochkorrosion steigt mit steigenden Gehalten an Chlorid-, Sulfat- und Nitrat-Ionen, da diese die Hydrogencarbonat-Ionen ersetzen, jedoch nicht in der Lage sind, die in Korrosionslöchern gebildete Säure zu puffern (DIN, 2005).

3.3.3.8 Druck und Druckstoß

Bereits 2001 kritisiert Lambert (2001), dass viele WVU den Einfluss des Versorgungsdruckes ignorieren, wenn es um die Untersuchung der Wasserverluste oder den Entwurf einer Strategie für effizienteres Wasserverlustmanagement geht. Dabei zeigen eine Reihe von Studien, dass der Druck signifikanten Einfluss sowohl auf die Entstehung neuer Schäden als auch auf die Höhe der Wasserverluste hat, z.B. Pearson u. a. (2005) oder Thornton und Lambert (2005).

Einfluss des Drucks auf die Schadenshäufigkeit Zahlreiche Veröffentlichungen belegen den Einfluss des Drucks auf die Häufigkeit, mit der neue Leckagen in einem Wasserversorgungsnetz auftreten. So führt Lambert (2001) Untersuchungsergebnisse aus Rohrnetzen in Wales, Australien, Japan, Neuseeland und Brasilien an, die einen direkten Zusammenhang zwischen der Reduktion des Drucks und der Häufigkeit von Rohrbrüchen an Haupt- und Versorgungsleitungen aufzeigen. Laut Roscher u. a. (2009) führt permanent erhöhter Druck in Rohrleitungen „zwangsläufig zu Schäden, insbesondere bei Rohrleitungen, welche nur geringe Festigkeitsreserven aufweisen“. Abbildung 3.6 zeigt anschaulich, wie im Gold Coast District,

Australien durch die Absenkung des Einspeisedrucks von 72 m auf 50 m im August 2003 die Schadenshäufigkeit an Haupt- und Versorgungsleitungen sowie insbesondere an Anschlussleitungen deutlich reduziert werden konnte.

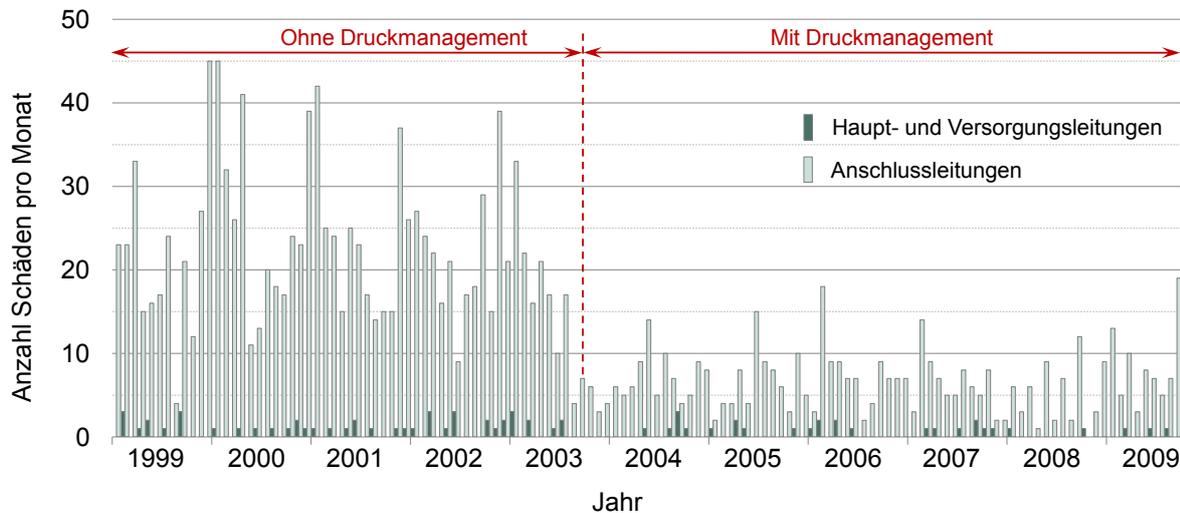


Abbildung 3.6: Einfluss des Versorgungsdrucks auf die Schadenshäufigkeit an Rohrleitungen⁵

Nicht nur permanent hoher Druck wirkt sich negativ auf die Lebensdauer von Rohren aus, sondern auch häufige ausgeprägte Druckschwankungen, wie sie in vielen Netzen infolge des unterschiedlichen Verbrauchsverhaltens in Tages- und Nachtstunden auftreten (Roscher u. a., 2009). So führen beispielsweise wechselnde Zug-Druck-Spannungen bei Kunststoffrohren zu Ermüdungsbrüchen. Lambert (2001) weist deshalb darauf hin, dass Wasserversorgungsnetze mit möglichst gleichmäßigem Versorgungsdruck und nur minimalen Schwankungen zu betreiben sind, um häufige Schäden und hohe Reparaturkosten zu vermeiden.

Ebenfalls an der Entstehung von Schäden beteiligt sind Druckstöße, die zum Beispiel durch Fehler bei der Inbetriebnahme (s. Abschnitt 3.3.3.4), durch das plötzliche öffnen oder schließen eines Schiebers oder Hydranten oder bei Pumpenausfall auftreten können. Druckstöße sind häufig die sekundäre Beeinträchtigung, die eine fehlerhaft ausgeführte Rohrverbindung löst oder nach einer Vorschädigung durch Korrosion zum Versagen der Rohrwand führt.

Einfluss des Drucks auf die Leckrate Die Ausflussgeschwindigkeit v [m/s] einer Flüssigkeit aus einer Leckage lässt sich mithilfe der Blendengleichung herleiten. Die Blendengleichung beschreibt die Umwandlung der gesamten potentiellen Energie in Form von Druck in kinetische Energie beim seitlichen Ausströmen einer Flüssigkeit aus einem Behälter. Dabei hängt v nur von der Erdbeschleunigung g [m/s²] und der Druckdifferenz h [m] über die Blendenöffnung ab und lässt sich anhand Gleichung 3.1 berechnen (Zoebl und Kruschik, 1978).

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.1)$$

Somit lässt sich die Leckrate q [m³/s] in Abhängigkeit von der Querschnittsfläche A der Ausströmöffnung ermitteln. Allerdings ist der tatsächlich wirksame Querschnitt A_0 [m²], der

⁵Quelle: Joshua May, Project Manager for Pressure and Leakage Management, Gold Coast Water, persönliche Mitteilung, 07.06.2010

die Ausflussmenge bestimmt, durch die Kontraktion des Wasserstrahls kleiner als der geometrische Querschnitt A . Dies wird laut Zoehl und Kruschik (1978) mit Hilfe des dimensionslosen Ausflusskoeffizienten μ berücksichtigt:

$$A_0 = \mu A \quad (3.2)$$

Somit berechnet sich die Ausflussmenge durch die Blende gemäß Gleichung 3.3:

$$q = \mu A \sqrt{2gh} \quad (3.3)$$

In Gleichung 3.3 bleibt jedoch unberücksichtigt, dass sich der Ausflusskoeffizient μ in Abhängigkeit vom Fließzustand ändern kann. Der Fließzustand wird durch die dimensionslose Reynoldszahl Re beschrieben, die für eine Blende mit beliebiger Querschnittsfläche folgendermaßen lautet:

$$Re = \frac{vd_H}{\nu} = \frac{4vA}{\nu U} = \frac{4q}{\nu U} \quad (3.4)$$

Darin ist v [m/s] wieder die Ausströmgeschwindigkeit, d_H [m] der hydraulische Durchmesser, A [m^2] die Querschnittsfläche der Öffnung, U [m] der benetzte Umfang des Querschnitts und ν [m^2/s] die kinematische Viskosität von Wasser (Zoehl und Kruschik, 1978).

Untersuchungen an kreisförmigen Öffnungen in metallischen Rohren haben gezeigt, dass μ im laminaren Bereich ($0 < Re \leq 2.000$) mit zunehmender Reynoldszahl steil von ca. 0,40 auf 0,70 ansteigt. Im Übergangsbereich ($2.000 < Re \leq 8.000$) bewegen sich die Werte von μ zwischen 0,70 und 0,85 und stabilisieren sich im vollständig turbulenten Bereich ($Re > 8.000$) bei einem Wert von ca. 0,75 (Lambert, 2001).

In Laborversuchen wurde weiterhin beobachtet, dass sich die Querschnittsfläche der Ausströmöffnung in Abhängigkeit von der Druckhöhe verändert. Dies hat einen besonders großen Einfluss auf Längsrisse an Kunststoffrohren, an denen mit steigendem Druck eine deutliche Aufweitung stattfindet (Lambert, 2001). Bei Längsrissen an Kunststoffrohren kann die Aufdehnung sowohl ein- als auch zweidimensional erfolgen (Greyvenstein und van Zyl, 2005).

Um die oben beschriebenen Einflüsse auf Leckagen von Rohren anzuwenden ist es zweckmäßig, die Querschnittsfläche A , den Ausflusskoeffizienten μ und die Wurzel der Erdbeschleunigung g aus Gleichung 3.3 zu einem dimensionslosen Leckagekoeffizienten c zusammenzufassen. Somit kann die Blendengleichung in verallgemeinerter Form angegeben werden, wie Gleichung 3.5 zeigt:

$$q = ch^\alpha \quad (3.5)$$

Hierin ist c der dimensionslose Leckagekoeffizient und α der dimensionslose Leckageexponent. Der Leckageexponent α wird in anglo-amerikanischen Veröffentlichungen oft auch als $N1$ bezeichnet. In verschiedenen Feldstudien wurde nachgewiesen dass α den Wert von 0,5 aus Gleichung 3.3 deutlich überschreiten kann, wie Tabelle 3.3 zeigt.

Daraus kann geschlossen werden, dass Leckagen in Trinkwasserrohrnetzen sehr viel stärker druckabhängig sind als bisher angenommen und dass ein wichtiger Grund hierfür die oben beschriebene Aufweitung der Ausströmfläche ist (Van Zyl und Clayton, 2007). Für ein komplettes Rohrnetz liegt der Wert für α laut Lambert (2001) zwischen 0,5 und 2,5, je nach vorherrschenden Materialien und Zusammensetzung der Schäden bzw. der dominierenden Schadensart. Für undetektierbare Kleinstleckagen, beispielsweise von defekten Verbindungen und Armaturen liegt α demzufolge im Bereich von 1,5. Eine einfache Formel um den

Tabelle 3.3: Experimentelle Leckagekoeffizienten α unterschiedlicher Werkstoffe und Schadensarten

| Schadensart | uPVC | AZ | St |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|
| <i>Kreisförmiges Loch</i> | 0,52 | | 0,52 |
| <i>Längsriss</i> | 1,38 – 1,85 | 0,79 – 1,04 | |
| <i>Rundriss</i> | 0,41 – 0,53 | | |
| <i>Korrosions-Cluster</i> | | | 0,67 – 2,3 |

Quelle: nach Van Zyl und Clayton (2007)

Zusammenhang zwischen Druck und Leckrate sowie den Einfluss des dimensionslosen Leckageexponenten α zu zeigen, ist in Gleichung 3.6 dargestellt (Lambert, 2001).

$$q_1 = q_0 \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^\alpha \quad (3.6)$$

Obige Gleichung zeigt, wie sich die einem Ausgangsdruck h_0 [m] zugehörige Leckrate q_0 [m^3/s] bei einer Veränderung des Drucks auf h_1 [m] in Abhängigkeit von α zu q_1 [m^3/s] verändert.

Einfluss des Drucks auf die Laufzeit von Leckagen Zur Vor- und Punktortung von Leckagen kommen in den meisten Fällen akustische Ortungsverfahren zum Einsatz. Diese basieren auf der Erfassung und Auswertung von Geräuschen, die beim Austritt des unter Druck stehenden Wassers aus der Lecköffnung entstehen (Heydenreich und Hoch, 2008). Lautstärke, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Leckgeräusche hängen neben dem Rohrwerkstoff, Rohrdurchmesser, Leckgeometrie, Bodenart und Grundwasserstand auch vom Innendruck der Rohrleitung ab: Wie in Gleichung 3.1 gezeigt wurde, steigt die Ausströmgeschwindigkeit mit zunehmender Druckdifferenz über die Leckage. Zur Leckortung ist ein hoher Versorgungsdruck von Vorteil, da hohe Fließgeschwindigkeiten die Rohrwand stärker zu Schwingungen anregen und lautere Leckgeräusche erzeugen (Vallejos Olivares, 2009). Sehr niedrige Versorgungsdrücke können die Ortung von Leckagen erschweren und ihre Laufzeit verlängern.

3.3.3.9 Fremdeinwirkung

Unter öffentlichen Flächen steht nur ein begrenzter Raum zur Verlegung unterirdischer Leitungen für Gas, Wasser, Abwasser, Strom, Telekommunikation oder Fernwärme zur Verfügung. Laut Weckenbrock (2004) kommt es daher durch unsachgemäße Bauausführung immer wieder zu Schadensfällen durch Baumaßnahmen Dritter, obwohl in 93 % der Fälle der „Pflicht zur Erkundigung nach vorhandenen unterirdischen Anlagen vor der Aufnahme von Tiefbauarbeiten“ nachgekommen wurde. Dennoch tritt Fremdeinwirkung mit einem Anteil von 7 % als Schadensursache an Haupt- und Versorgungsleitungen eher untergeordnet auf (Niehues, 2006). Schäden durch mechanische Fremdeinwirkung sind hauptsächlich auf sogenannte „Baggerschäden“ zurückzuführen: 79 % der Schäden durch Fremdeinwirkung werden von Baumaschinen verursacht (Weckenbrock, 2004). In vielen Fällen handelt es sich hierbei nicht um eine direkte Schädigung einer Leitung, sondern um nachträglich entstandene Schäden, etwa in Folge von Setzungen oder fremd verursachter Korrosion.

3.3.3.10 Urbanität

Viele Experten sehen die Urbanität (Siedlungsform) als einen der stärksten Einflussfaktoren auf das Auftreten von Schäden und die Höhe der Wasserverluste an (Neunteufel u. a., 2008). Der Begriff Urbanität beschreibt die Kombination verschiedener Ursachen im städtischen Raum: Einflüsse durch Bau oder Betrieb anderer Medienleitungen (Strom, Gas, Telekommunikation) in unmittelbarer Nähe der Versorgungsleitungen; Dichte von Anschlüssen, Armaturen und Formstücken pro Kilometer Rohrleitung; Setzungen des Untergrunds durch statische (Gebäude) und dynamische Lasten (Verkehr). Glaeser u. a. (2006) merken an, dass beim Straßenverkehr insbesondere die Belastung durch LKW eine kritische Rolle spielt: Die zwischen 1957 und 1961 durchgeführten Tests der *American Association of State Highway Officials* ergaben, dass eine lineare Steigerung der Achslast eine Steigerung des Schädigungspotenzials in der 4. Potenz hervorruft. Daraus ergibt sich, dass das Schädigungspotenzial eines voll beladenen LKW mit 40 t ca. um den Faktor 40.000 höher liegt als das eines PKW mit 1,5 t Gesamtgewicht. Der Urbanität wird bei der Ermittlung von Kennzahlen Rechnung getragen, indem zum Beispiel die Wasserverluste pro Hausanschluss und Tag ermittelt werden (s. Abschnitt 4.5.3.2) bzw. gemäß DVGW (2003a) anhand der spezifischen Rohrnetzeinspeisung verschiedene Versorgungsstrukturen definiert werden (s. Abschnitt 2.4.2.1).

3.3.3.11 Schadensursachen an Armaturen

Angesichts der großen Zahl unterschiedlicher Armaturentypen, die in Wasserversorgungsnetzen verbaut sind, ist es sinnvoll, die wichtigsten Armaturentypen in Gruppen zusammenzufassen und gemeinsam zu betrachten. Der DVGW betrachtet in der Auswertung der Schadensstatistiken aus den Jahren 1997 bis 2004 die folgenden fünf Armaturengruppen (Niehues, 2006):

- Anbohrarmaturen
- Schieber (Absperrschieber)
- Klappen
- Oberflurhydranten
- Unterflurhydranten

Weitere Armaturentypen wie z.B. Regelarmaturen, Druckminderventile, Be- und Entlüftungsventile sind zahlenmäßig in Wasserversorgungsnetzen eher unbedeutend und werden daher in diesem Zusammenhang nicht gesondert betrachtet. Im Folgenden werden die fünf wichtigsten Schadensursachen an Armaturen kurz beschrieben. Die Angaben zur Häufigkeit bestimmter Schäden an einzelnen Armaturentypen stützen sich auf die Ergebnisse der DVGW-Schadensstatistiken der Jahre 1997 bis 2004 (basierend auf rund 162.000 Schäden an über 31 Millionen betrachteten Armaturen). Beim Vergleich der Schadensraten der verschiedenen Armaturentypen fällt auf, dass Ober- und Unterflurhydranten die mit Abstand höchsten Schadensraten und Anbohrarmaturen generell die niedrigsten Schadensraten aufweisen (Niehues, 2006).

Fremdeinwirkung Schäden durch Fremdeinwirkung entstehen beispielweise durch Aufgrabungen bei Bauarbeiten (sogenannte Baggerschäden). Ein für Oberflurhydranten typischer Schaden durch Fremdeinwirkung ist die Beschädigung durch Kraftfahrzeuge. Es überrascht daher nicht, dass die Schadensursache Fremdeinwirkung bei Oberflurhydranten ca. 13 % der Schäden verursacht, während sie an allen anderen Armaturentypen maximal 5 % erreicht (Niehues, 2006).

Bodenbewegung Für Schäden durch Bodenbewegung gelten die gleichen Zusammenhänge wie bereits in Abschnitt 3.3.3.6 für Rohre und Rohrverbindungen festgestellt. Laut DVGW-Schadensstatistik spielt Bodenbewegung als Schadensursache an allen Armaturentypen eine untergeordnete Rolle, die Schadensraten liegen zwischen 1 % und 4 % (Niehues, 2006).

Korrosion Für Schäden durch Korrosion, Alterung und Materialermüdung gelten die gleichen Zusammenhänge wie bereits in Abschnitt 3.3.3.5 für Rohre und Rohrverbindungen festgestellt. Laut DVGW-Schadensstatistik sind allerdings nur ca. 4 % bis 9 % der Schäden an Armaturen auf Korrosion zurückzuführen (Niehues, 2006).

Undichtheit Undichtheiten entstehen entweder durch Schäden am Armaturengehäuse oder durch schadhafte Dichtungen bzw. Verbindungen. Sie sind eine der Hauptursachen für Schäden an Armaturen und machen bei Schiebern und Unterflurhydranten fast ein Drittel (32 %) aller Schäden aus (Niehues, 2006).

Funktionsuntüchtigkeit Funktionsuntüchtigkeit ist die häufigste Schadensursache an allen Armaturentypen, mit einem Anteil zwischen 32 % und 50 % aller Schäden. Bei Schiebern und Klappen können z.B. Sedimente oder Ablagerungen von Korrosionsprodukten dazu führen, dass die Armaturen nicht mehr vollständig schließen. Da für alle Armaturen im mittleren und kleinen Nennweitenbereich der gleiche Bedienungsschlüssel (nach DIN 3223) verwendet wird, sind oft die eingeleiteten Kräfte zu groß und führen zum Bruch von Gehäuseteilen, Verbindungsschrauben oder des Spindeltriebs (Moser, 1999). Funktionsuntüchtigkeit muss nicht zwangsläufig zu Wasserverlusten führen.

3.3.3.12 Schadensursachen an Anschlussleitungen

Die Anschlussleitung ist Bestandteil des öffentlichen Rohrnetzes und verbindet die Versorgungsleitung mit der Kundenanlage (DVGW, 1998b). Anschlussleitungen werden in der Regel mittels einer Anbohrarmatur an die Versorgungsleitung angeschlossen, nur bei Abgängen größeren Durchmessers werden Abzweigformstücke verwendet (Moser, 1999). Aufgrund seiner guten Korrosionsbeständigkeit und leichten Formbarkeit war Blei bis Anfang der 1960er Jahre das Standardmaterial für Anschlussleitungen. Ab 1973 wurde es aber wegen gesundheitlicher Risiken nicht mehr eingesetzt, und wird seitdem planmäßig durch die WVU beseitigt. Die letzten Bleileitungen sollen mit dem in der neuen Trinkwasserverordnung festgesetzten Inkrafttreten des verschärften Blei-Höchstwertes von 0,010 mg/l bis 2013 ausgetauscht werden (UBA, 2008). Weiterhin kamen in der Vergangenheit häufig Gusseisen und Stahl als Material für Anschlussleitungen zum Einsatz. Hierbei kam es in der Vergangenheit verstärkt zu Korrosionsschäden durch Potenzialunterschiede beim Einsatz unterschiedlicher Materialien und wenn metallische Anschlussleitungen zur Erdung elektrischer Anlagen verwendet wurden. Bei Neubau und Sanierung alter Anschlussleitungen kommen heutzutage hauptsächlich Leitungen aus Kunststoff (Polyethylen) zum Einsatz. Während bei metallischen Werkstoffen Korrosion (25 % bis 68 %) und Bodenbewegung (bis 40 %) als Schadensursache überwiegen, ist bei Kunststoffleitungen laut Niehues (2006) ein „relativ hoher Anteil von Fremdeinwirkungen als Ursache auffällig“. Die DVGW-Schadensstatistik zeigt weiterhin, dass an Bleileitungen, auch aufgrund ihres wesentlich höheren Alters, zwei- bis dreimal häufiger Schäden auftreten als an allen anderen Materialien gemeinsam: Die mittlere Schadensrate in Deutschland lag 2004 bei ca. sechs Schäden pro 1.000 Hausanschlüsse und Jahr, bei Herausnahme der Bleileitungen jedoch bei ca. zwei Schäden pro 1.000 Hausanschlüsse und Jahr (Niehues, 2006).

3.3.3.13 Schadensursachen an Behältern

Die bereits in Abschnitt 3.3.2 vorgestellte Untersuchung an Trinkwasserbehältern ergab, dass in Deutschland ca. 80 % der Behälter in Stahlbeton ausgeführt sind, während Spannbeton, Mauerwerk und Stahl als Baustoffe für Sohle und Wände lediglich eine untergeordnete Rolle spielen (Roth, 1998). Die Ausführungen zu Schadensursachen an Behältern werden im Rahmen dieser Arbeit daher auf Behälter aus Stahlbeton beschränkt. Wasserdurchlässigkeit entsteht bei Behältern aus Beton entweder aufgrund baustoffbedingter Mängel (z.B. Porosität des Betons oder Fehlstellen) oder aufgrund konstruktionsbedingter Mängel wie zum Beispiel Rissen, undichten Fugen sowie undichten Rohrdurchführungen (Merkl, 2011). Laut Merkl (2005) können die Schadensursachen planerische, bauliche oder betriebliche Hintergründe haben.

Planerische Mängel Bei der statischen Auslegung von Wasserbehältern aus Stahlbeton reicht es nicht aus, die Standsicherheit des Bauwerks nachzuweisen, sondern es muss zusätzlich durch geeignete Maßnahmen das Entstehen von Undichtheiten durch Zwangsbeanspruchungen infolge Hydratationsvorgängen, Schwinden, Kriechen und Temperaturänderungen verhindert werden (Merkl, 2005). Da die Behälterwände üblicherweise erst nach dem Erhärten der Sohle betoniert werden, treten beim Abkühlen der Wand Verkürzungen auf, die durch die Einspannung in der Sohlplatte behindert werden und es entstehen Risse im Bereich der Arbeitsfuge zwischen Wand und Sohle (Merkl, 2011). Das Entstehen von Rissen kann z.B. durch das Einbringen einer Längsbewehrung im Bereich der Arbeitsfuge, abschnittsweises Betonieren der Wände (ca. 5 bis 8 m) oder kontrolliertes Abkühlen der Wand durch geeignete Betonnachbehandlung minimiert werden (Vogt, 1998). Die Anzahl der Arbeits- und Bewegungsfugen sollte minimiert werden und an statisch wenig beanspruchten Stellen angeordnet werden, um Schäden zu vermeiden. Da Fugen als Schwachstellen bezüglich der Dichtigkeit eines Behälters anzusehen sind, ist wenn immer möglich die fugenlose Bauweise anzustreben (Merkl, 2011).

Schrepfermann (2011) berichtet von hohen Wasserverlusten an einem Stahlbeton-Hochbehälter, die durch das Durchstanzen der Deckenstütze durch die Bodenplatten der Wasserkammern hervorgerufen wurden. Dies kann durch ein Einspannen der Stützen in die Sohle, eine zusätzliche elastische Bettung unter der Sohlplatte rings um die Stütze oder das Ausbilden von Stützenfüßen vermieden werden (Vogt, 1998). Im Rahmen der Planung von Wasserbehältern sollte zudem grundsätzlich eine Baugrunduntersuchung durchgeführt werden, um das Auftreten von Rissen durch Setzungen des Bauwerks auszuschließen.

Bauausführung Mangelhafte Bauausführung ist eine weitere mögliche Ursache für Schäden an Wasserbehältern. So berichtet beispielsweise Merkl (2005) von Undichtheiten infolge von mangelhaft abgedichteten Löchern der Schalungsabstandshalter. Falsche Einbringung und unzureichende Verdichtung des Betons kann zur Bildung von Hohlräumen und Kiesnestern führen, die sowohl Wasserverluste als auch Bewehrungskorrosion nach sich ziehen können (Schulze, 1999). Eine wichtige Rolle kommt der korrekten Einstellung des Wasser-Zement-Werts (w/z -Wert) zu: Je höher der w/z -Wert ist, desto größer ist die Anzahl der Kapillarporen im Beton. Da über die Kapillarporen praktisch alle Transportmechanismen im Zementstein stattfinden, ist die Minimierung des Kapillarporenraums von höchster Bedeutung für die Herstellung eines dichten und dauerhaften Betons (Vogt, 1998). Weiterhin kommen nachlässig hergestellte Fugendichtungen und die Ablösung von Oberflächenbeschichtungen aufgrund unzureichender Untergrundvorbereitung als Ursachen von Schäden in Frage (Schulze, 1999).

Hydrolytische Zersetzung des Zementsteins Beim Erstarren und Erhärten von Zement entsteht neben anderen Hydratationsprodukten auch Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in Form großer Kristalle. Unter Hydrolyse versteht man die Lösung der Hydratationsprodukte des Zementsteins durch das ständig frisch anstehende Trinkwasser im Behälter. Die Hydrolyse beginnt bei dem am leichtesten löslichen Calciumhydroxid und vergrößert durch das Herauslösen des Calciums die Porosität des Zementsteins. Die erhöhte Zugänglichkeit für das anstehende Wasser und die Absenkung des pH-Werts führen zur Hydrolyse der übrigen, schwer löslichen Hydrate bis nur noch unlösliche Silikat- und Eisenverbindungen übrig bleiben (Drescher, 2001). Entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit des beschriebenen Prozesses haben neben dem w/z-Wert des Betons die Wassergüteparameter pH-Wert, Gehalt an freier Kohlensäure CO_2 , Härte sowie der Gehalt an Magnesium, Ammonium, Sulfat und Chlorid (Vogt, 1998). Die periodischen Füllstandshöhenänderungen in Wasserbehältern führen zu Transportvorgängen im Porensystem des Zementsteins und verstärken damit die oben beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Trinkwasser und zementgebundenen Werkstoffen (Breitbach, 2007).

Bewehrungskorrosion Durch das in der Luft und im Wasser enthaltene Kohlendioxid wird Beton karbonatisiert und sein pH-Wert verringert. Durch diesen Prozess wird der schützende Oxidfilm des Bewehrungsstahls zerstört und es kommt zu Korrosion. Da die Korrosion von Stahl mit einer Volumenvergrößerung einhergeht, kommt es zum Abplatzen der Betondeckung und infolgedessen zu einer Beschleunigung des Korrosionsprozesses. Undichtheiten können entstehen. Um den Bewehrungsstahl eines Wasserbehälters langfristig sicher vor Korrosion zu schützen, soll die Betondeckung der Bewehrung daher mindestens 4,0 cm bis 5,0 cm betragen (DIN, 2001).

Bedienungs- und Regelungsfehler Neben den oben genannten konstruktions- und baustoffbedingten Mängeln können auch betriebliche Fehler die Ursache von Wasserverlusten sein. Dazu zählen Fehler des Bedienungspersonals oder Mängel in der automatischen Regelung von Hochbehältern. Beide Fehlerarten führen zu unkontrolliertem Überlaufen von Wasser aus dem Behälter.

3.3.4 Schadensarten

3.3.4.1 Schadensarten an Rohren und Rohrverbindungen

Als Schadensart definiert der DVGW (1998a) die „festgestellte Veränderung des Sollzustandes am Anlagenteil“. Zu einem Schaden kommt es dann, wenn entweder die Widerstandsfähigkeit des Rohres zu klein ist (z.B. infolge falscher Dimensionierung oder Materialauswahl, Ermüdung oder Korrosion) oder die Belastung zu groß wird (z.B. durch Verkehrslasten, Druckstöße, Bodenbewegungen) (Misiunas, 2005). An Rohren und Rohrverbindungen können grundsätzlich vier Schadensarten unterschieden werden: Brüche, Risse, Lochkorrosion sowie undichte Verbindungen. Diese vier Schadensarten werden im Folgenden näher betrachtet.

Brüche Rohre aus Grauguss, Asbestzement oder Beton besitzen eine geringe plastische Verformbarkeit und neigen daher unter mechanischen Belastungen zu Brüchen (Roscher u. a., 2000). Ausgelöst werden Brüche häufig durch die Übertragung von Erschütterungen (Straßenverkehr, Baumaßnahmen), infolge direkter Beschädigung durch Baumaschinen sowie durch

Bodenbewegungen wie zum Beispiel Setzungen, Quell- und Schrumpfvorgänge oder Frosteinwirkung (Morris Jr., 1967). Großflächige Schalenbrüche bei biegesteifen Rohren aus Grauguss oder Asbestzement treten meist schlagartig ohne vorherige Verformung auf. Sie können beispielsweise durch einen Druckstoß ausgelöst werden und entstehen vorzugsweise an Stellen, wo Korrosion oder Graphitierung die Wandstärke des Rohrs bereits reduziert haben. Schalenbrüche zeichnen sich durch hohe Leckageraten aus (Makar, 2000).

Risse Risse entstehen überwiegend an Rohren aus zähen Werkstoffen, wie z.B. Stahl oder duktilem Gusseisen und treten je nach Ursache in verschiedenen Ausprägungen auf, nämlich als Rundrisse (z.B. durch Setzungen, Abscheren des Rohres), Querrisse, Längsrisse oder Spiralarisse. Letztere sind auch an Leitungen aus PVC und PE anzutreffen und sind auf unsachgemäße Bettung in steinigem Material (Kerbwirkung) zurückzuführen (Roscher u. a., 2009). Längsrisse können ebenfalls an Muffenverbindungen von Gussrohren auftreten, ausgelöst z.B. durch ein Abwinkeln des innen liegenden Spitzendes oder durch Spannungen infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten des Rohrs und der Dichtung (Makar, 2000). Rissbildungsprozesse beginnen häufig dort, wo die Widerstandskraft des Rohres zuvor durch Korrosion oder Graphitierung geschwächt wurde (Makar, 2000).

Korrosion Lochschäden infolge von Korrosion sind typische Schäden an metallischen Rohrleitungen. Die Prozesse, die zu Korrosion führen, wurden in Abschnitt 3.3.3.5 ausführlich beschrieben. Korrosionsschäden lassen sich nach ihrer Ausprägung unterscheiden in Flächenkorrosion, Muldenkorrosion und Lochkorrosion (sog. Lochfraß). Flächenkorrosion entsteht bei homogenen Oberflächen, hierbei finden die anodische und die kathodische Teilreaktion am gleichen Ort statt und führen zu einem gleichmäßigen Flächenabtrag. Bei metallischen Rohrleitungen häufiger anzutreffen ist die Muldenkorrosion mit narbiger oder muldenartiger Rohroberfläche, die auf unterschiedliche Abtragungsgeschwindigkeiten auf einzelnen Flächenbereichen der Metalloberfläche zurückzuführen ist. Die höchsten Abtragsraten sind bei der Lochkorrosion anzutreffen, bei der sich Hohlräume von der Rohroberfläche in das Metallinnere ausdehnen. Lochkorrosion tritt auf, wenn die Rohroberfläche lokale Beschädigungen des Korrosionsschutzes aufweist und sich kleinflächige Korrosionselemente bilden, an denen das Metall örtlich begrenzt in hoher Geschwindigkeit in Lösung geht. Es kommt zur Ausbildung kraterförmiger Vertiefungen und im Endzustand zu einer Durchlöcherung der Rohrwand (Becker, 2009). Auch Kunststoffrohre können durch chemische Degradationsprozesse geschädigt werden. Bei Beton- und Asbestzementrohre können verschiedene chemische Prozesse dazu führen, dass die Zementbestandteile ausgewaschen werden oder dass Reaktionsprodukte gebildet werden, die die Werkstoffstruktur schwächen (Misiunas, 2005).

Undichte Verbindungen Hierunter sind Schäden aufzuführen, die auf die Undichtheiten von Muffen-, Gewinde-, Flansch- und Schweißverbindungen zurückzuführen sind (DVGW, 1998a). Nach Roscher u. a. (2009) sind bei alten Stemmuffenverbindungen der Einbau mangelhafter Dichtungsstricke sowie ungenügende Bleiverstimmungen, die durch den Wasserdruck oder Druckstöße heraus gedrückt werden, eine häufig vorkommende Schadensart. Weiterhin können Bodenbewegungen oder eine zu große Abwinkelung der Rohre in der Muffe dazu führen, dass sich Muffenverbindungen lösen oder Dichtungen sich verschieben und Leckagen entstehen. Bei Stahlrohren können fehlerhafte Schweißnähte sowie die mangelhafte baustellenseitige Ausführung des Innen- und Außenkorrosionsschutzes entlang der Schweißnaht zu Korrosionsschäden führen. Schäden bei geschweißten PE-Leitungen sind meist auf die ungenügende

Erhitzung der Rohrenden und die Nichteinhaltung der Anpresszeiten beim Stumpfschweißen zurückzuführen (Roscher u. a., 2009).

3.3.4.2 Schadensarten an Armaturen und Anschlussleitungen

An Armaturen auftretende Schäden lassen sich unterscheiden in „Bruchschäden, Deformationen, Materialschäden an Gehäusen, Schäden an Schließelementen, Dichtungs- und Befestigungsteilen“ (Rötsch, 1999). Nicht alle der genannten Schäden müssen zu Wasserverlusten führen. So führen beispielsweise Schäden an den Schließelementen bei Absperrschiebern und -klappen zu einer Einschränkung der Funktion, die einen Austausch erforderlich machen. Deformationen, Material- und Korrosionsschäden können Probleme beim Öffnen und Schließen von Armaturen verursachen und damit zum Beispiel die Funktionstüchtigkeit von Hydranten beeinträchtigen.

Wasserverluste treten in der Regel bei Bruchschäden und Korrosion am Gehäuse sowie aufgrund defekter Dichtungen am Armaturengehäuse oder an beweglichen Teilen (z.B. Wellendichtring an der Spindel) auf (Moser, 1999). Eine weitere Schadensart sind Undichtheiten an den Verbindungen zwischen der Armatur und den anschließenden Leitungen.

3.3.4.3 Schadensarten an Behältern

Die möglichen Schadensarten an Wasserbehältern, die mit Wasserverlusten verbunden sind, lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: Undichtheit und Überlaufen.

Undichtheit Undichtheiten lassen sich auf drei Ursachen zurückführen, wie in Abschnitt 3.3.3.13 beschrieben. Dies sind zum einen baustoffbedingte Mängel wie beispielweise eine zu hohe Porosität des Betons oder Fehlstellen. Weiterhin gibt es Undichtheiten infolge von Reaktionen der Behälterwände und -sohle mit dem gespeicherten Wasser, zum Beispiel hydrolytische Zersetzung des Zementsteins oder Bewehrungskorrosion. Schließlich gibt es noch Undichtheiten aufgrund planerischer und baulicher Mängel, wie zum Beispiel durch undichte Fugen, mangelhaft abgedichtete Löcher der Schalungsabstandshalter oder durchstanzte Behältersohlen.

Überlaufen Überlaufen und Auslaufen von Wasser aus Behältern ist in der Regel auf Bedienungsfehler oder eine fehlerhafte Regelung des Behälters und der angeschlossenen Pumpen zurückzuführen.

3.3.5 Leckrate

Die Leckrate q [m^3/h] einer Schadensstelle ergibt sich aus der Lage der Schadensstelle, der Schadensart und dem Betriebsdruck und kann aufgrund von Druckschwankungen oder Veränderungen der Schadensstelle zeitlich variieren. Die mögliche Bandbreite der Leckrate reicht von ca. 1 l/h bei einzelnen Tropfen bis zu mehreren 10.000 l/h und mehr bei Rohrbrüchen auf großen Zubringer- oder Hauptleitungen. Anhand der Leckrate und der Erscheinungsform eines Schadens lässt sich folgende Klassifizierung vornehmen (Lambert und Hirner, 2000):

- Sichtbare und gemeldete Leckagen
- Versteckte, detektierbare Leckagen
- (Undetektierbare) Kleinstleckagen

Die erste Kategorie der Leckagen zeichnet sich für gewöhnlich durch eine hohe Leckrate aus. Aufgrund der Bodenbeschaffenheit, des anstehenden Drucks und der großen Durchflussmenge kommt es zu einem Wasseraustritt an der Erdoberfläche, der entweder von Anwohnern oder dem Personal des WVU im Rahmen einer Inspektion entdeckt wird. Im Gegensatz dazu sind sowohl die versteckten Leckagen als auch die Kleinstleckagen nicht an der Oberfläche sichtbar. Die Differenzierung zwischen Kleinstleckagen und versteckten, aber detektierbaren Leckagen erfolgt daher anhand der Leckrate. Die Definition der beiden Kategorien ist in den meisten Fällen unscharf gehalten, so dass eine klare Zuordnung nicht immer möglich ist. Die DVGW (2003a) charakterisiert in ihrem Arbeitsblatt W 392 Kleinstleckagen als solche mit „meist kleiner Leckrate aber langer Laufzeit“, und durch Leckortung detektierbare Leckagen als solche mit „meist mittleren Leckraten und mittleren Laufzeiten“. Ausschlaggebend ist, ob das vom austretenden Wasser erzeugte Geräusch laut genug ist, um mittels akustischer Leckortungsverfahren die Schadensstelle zu identifizieren. Lambert (1994) nennt eine Leckrate von 500 l/h bei 40 m Druck als Grenzwert zwischen Kleinstleckagen (*leaks*) und detektierbaren Leckagen (*bursts*). Aufgrund des technischen Fortschritts der heutigen Leckortungsverfahren liegt dieser Grenzwert inzwischen im Bereich von 250 l/h (Quelle: Allan Lambert, IWA *Water Loss Task Force*, mündliche Mitteilung vom 13.04.2010 und McKenzie (2007)).

In der Praxis bedeutet diese Klassifizierung, das insbesondere undichte Rohrverbindungen und der Wasseraustritt an Armaturen, Formstücken und Anschlussleitungen zu den Kleinstleckagen zu zählen sind (Misiunas, 2005). Mit Hinblick auf Wasserbehälter zählen Undichtheiten üblicherweise zur Kategorie Kleinstleckagen und Überlaufen zu den sichtbaren Leckagen (Lambert, 1994).

3.3.6 Laufzeit

Die Wassermenge, die in einem Wasserversorgungssystem innerhalb eines gewählten Betrachtungszeitraums aus Leckagen verloren geht, hängt neben der Anzahl an Leckstellen und der zugehörigen Leckrate wesentlich von der Laufzeit der Leckagen ab (AWWA, 2009). Dieser Zusammenhang lässt sich anhand Gleichung 3.7 veranschaulichen.

$$Q_{VR} = \sum_1^n (q_n t_n) \quad (3.7)$$

Hierin ist Q_{VR} [m^3/a] die Gesamtmenge der realen Wasserverluste eines Systems, die üblicherweise über einen Zeitraum von einem Jahr betrachtet wird. Weiterhin sind n die Anzahl der Leckagen, q_n [m^3/h] die Leckrate einer beliebigen Leckage und t_n [h] die zugehörige Laufzeit im betrachteten Jahr. Die AWWA (2009) stellt in ihrer Richtlinie M36 *Water Audits and Loss Control Programs* weiterhin fest, dass große, aufsehenerregende Wasserrohrbrüche meist nur einen verhältnismäßig kleinen Wasserverlust verursachen, da ihre Laufzeit üblicherweise auf wenige Stunden begrenzt ist, bis der Leitungsabschnitt abgeschiebert und der Schaden behoben wird. Im Gegensatz dazu ist die Laufzeit der versteckten Leckagen und der zahlreichen Kleinstleckagen oft sehr lang. Hier geht eine kleine aber stetige Wassermenge verloren, bis die Leckage im Rahmen einer Inspektion gefunden wird, der Schaden sich vergrößert und bemerkt wird oder das defekte Anlagenteil zufällig im Zuge von Rehabilitationsmaßnahmen ausgetauscht wird. Deshalb wird davon ausgegangen, dass der mengenmäßig größte Anteil der realen Wasserverluste auf versteckte Leckagen und Kleinstleckagen entfällt.

IWA und AWWA verwenden das in Abbildung 3.7 gezeigte ALR-Konzept, um die Laufzeit von Leckagen näher zu beschreiben. Die Abkürzung ALR steht für die drei Phasen Awareness

(Alarmierung), Location (Ortung) und Repair (Reparatur), in die die Laufzeit einer Leckage unterteilt werden kann.

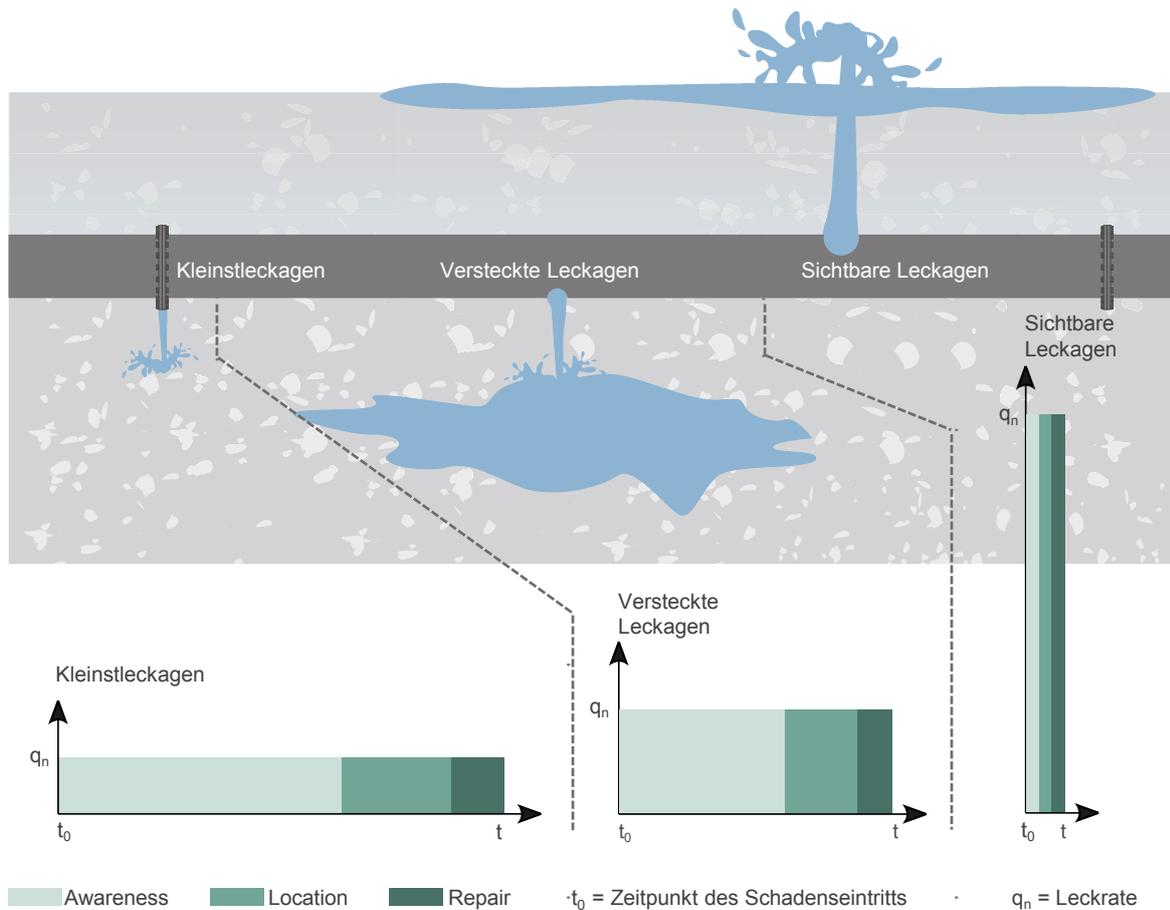


Abbildung 3.7: ALR-Konzept zur Charakterisierung der Laufzeit von Leckagen⁶

Die erste Phase umfasst den Zeitraum, der verstreicht, bis ein WVU auf eine neue Leckage aufmerksam wird. In Systemen ohne kontinuierliche Überwachung der Einspeisemengen und ohne periodische Überprüfung der Dichtigkeit des Rohrnetzes sowie bei Leckagen mit sehr kleinen Leckraten kann dieser Zeitraum sehr lange sein. Die zweite Phase umfasst die Zeit, die für die Vorortung und Punktortung dieser Leckage benötigt werden und hängt sowohl von der technischen Ausrüstung und der Organisation des WVU als auch von Versorgungsdruck, Leckgeräusch und dem vorherrschenden Rohrwerkstoff ab. Die dritte Phase umfasst neben der tatsächlichen Durchführung der Reparatur auch den vorhergehenden Zeitraum für die Reparaturplanung, Auftragserteilung, Bestellung der Materialien, Benachrichtigung der Anwohner und anderer notwendiger Maßnahmen (AWWA, 2009).

Um die Laufzeit von Leckagen zu minimieren, empfehlen der DVGW und weitere Wasser-Fachverbände wie IWA, AWWA oder ÖVGW, die Dichtigkeit von Rohrnetzen kontinuierlich oder in periodischen Abständen zu überwachen. Dazu ist zweckmäßig, das gesamte Versorgungssystem in Rohrnetzbezirke (engl.: *District Metered Area*, DMA) zu unterteilen, in denen „sämtliche Einspeise- und Abgabemengen an die Kunden [...] durch geeignete Messeinrichtungen zu ermitteln“ sind (DVGW, 2003a). Weiterhin sollen gemäß Arbeitsblatt W392 der

⁶Quelle: aus GIZ (2011) nach Tardelli Filho (2004)

DVGW (2003a) der „Eigenverbrauch und weitere nicht in Rechnung gestellte Wasserabgaben“ erfasst werden. Für die Erfassung der eingespeisten Wassermenge sollen die Durchflüsse und Behälterfüllstände kontinuierlich gemessen, gespeichert und an eine zentrale Leitwarte übertragen werden. Dort sollen die Messwerte der Einspeisung mit Kennwerten der jeweiligen Zone verglichen werden. Bei Überschreiten eines Schwellenwertes sind Maßnahmen zur Leckortung und -reparatur einzuleiten.

Wird ein Versorgungssystem oder ein Rohrnetzbezirk nicht kontinuierlich überwacht, schlägt der DVGW im Arbeitsblatt W 392 eine turnusmäßige Inspektion der Dichtheit der Netze vor (DVGW, 2003a). In Abhängigkeit von der Höhe der Wasserverluste empfiehlt der DVGW die folgenden Inspektionszeiträume:

- Geringe Wasserverluste: maximal alle 6 Jahre
- Mittlere Wasserverluste: alle 3 Jahre
- Hohe Wasserverluste: einmal pro Jahr

Bei jährlicher Inspektion beträgt die durchschnittliche Laufzeit einer versteckten Leckage ca. 183 Tage für Erkennung und Lokalisation zuzüglich der benötigten Zeit für die Reparatur. Laut Heydenreich und Hoch (2008) ergab eine Untersuchung in Stuttgart, dass die durchschnittliche Laufzeit einer Leckstelle 115 Tage beträgt, bevor sie durch Zufall oder systematische Untersuchungen entdeckt wird. Lambert u. a. (1999) legen ihrer Abschätzung von Wasserverlustkomponenten für die Berechnung der *Unavoidable Annual Real Losses* (UARL, s. Abschnitt 4.5.3.4) die in Tabelle 3.4 gezeigten Laufzeiten zugrunde.

Tabelle 3.4: Geschätzte Laufzeiten von Leckagen

| Schadensstelle | Laufzeit | Laufzeit |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | sichtbarer Leckagen [d] | versteckter Leckagen [d] |
| Haupt- und Versorgungsleitungen | 3 | 50 |
| Anschlussleitungen | 8 | 100 |

Quelle: Lambert u. a. (1999)

Die Angaben aus Tabelle 3.4 basieren laut Lambert u. a. (1999) auf der Auswertung internationaler Datensätze von Rohrnetzen mit gutem Zustand. Die Laufzeiten versteckter, aber detektierbarer Leckagen sind gültig für stark sektorierte Netze mit mindestens monatlicher Überwachung des Nachtmindestverbrauchs und intensiver aktiver Leckkontrolle (Lambert u. a., 1999).

Infolge der technischen Weiterentwicklung der (akustischen) Leckortungsverfahren kann die Laufzeit mit Hilfe von kontinuierlicher messtechnischer Überwachung der Rohrnetzbezirke auf wenige Tage bis Wochen reduziert werden. Basierend auf einer Untersuchung an 30 Rohrnetzbezirken mit insgesamt 1.200 Datenloggern berichtet Clark (2012), dass die Laufzeiten von Leckagen signifikant verkürzt werden können, wie Tabelle 3.5 zeigt.

Tabelle 3.5: Einfluss messtechnischer Überwachung auf die Laufzeit q_n

| Überwachungsmethode | Auslesefrequenz [d] | Laufzeit [d] |
|--|------------------------|-----------------|
| Drive-by Geräuschlogger | 14 | 30 |
| Drive-by Geräuschlogger (korrelierend) | 14 | 28 |
| SMS Geräuschlogger | 1 | 10 |
| Festinstallierte Geräuschlogger (korrelierend) | 1 | 3 |

Quelle: Clark (2012) (Vortrags-Präsentation)

3.3.7 Wasserverlustmenge

Gleichung 3.7 zeigt, dass die Gesamtmenge der realen Wasserverluste eines Wasserversorgungssystems $Q_{VR} [m^3/a]$ aus der Summe der Produkte von Leckrate q_n und Laufzeit t_n aller Leckstellen gebildet wird. Ziel jedes WVU muss es sein, die Gesamtverlustmenge auf ein aus technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten optimales Niveau zu senken. Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass hierfür drei Ansätze zur Verfügung stehen:

- Die Anzahl der Leckagen minimieren: Hierfür muss einerseits die Entstehung neuer Schäden verhindert werden, beispielsweise durch adäquate Planung, Bauausführung, Verwendung optimaler Werkstoffe aber auch durch die Beseitigung überhöhter Drücke und massiver Druckschwankungen. Andererseits müssen bereits vorhandene Leckagen durch periodische Inspektionen oder kontinuierliche Überwachung erkannt, geortet und repariert werden.
- Die Leckrate reduzieren: Der Wasseraustritt an jeder einzelnen Leckstelle kann reduziert werden, indem der Versorgungsdruck durch Druckmanagement auf ein zulässiges Niveau abgesenkt wird. Einer der Vorteile von Druckmanagement ist, dass es gerade für Kleinstleckagen wirksam ist, die durch andere Maßnahmen nur schwer beherrschbar sind.
- Die Laufzeit verringern: Der Zeitraum zur Erkennung (*awareness*) bestehender Leckagen kann durch regelmäßige Inspektionen und die kontinuierliche Überwachung klein gehalten werden. Die benötigte Zeit für die Ortung und Reparatur (*location* und *repair*) kann durch die Optimierung der Abläufe im WVU minimiert werden. Die Laufzeit nicht erkennbarer Kleinstleckagen kann nur durch langfristiges Infrastrukturmanagement und das planmäßige Ersetzen schadhafter bzw. anfälliger Leitungsabschnitte beeinflusst werden.

3.4 Scheinbare Wasserverluste

3.4.1 Zählerabweichungen

3.4.1.1 Definition der Messabweichung

Unabhängig vom angewandten Messverfahren sind Messungen stets mit Unvollkommenheiten verbunden, die eine Messabweichung, bestehend aus einer zufälligen und einer systematischen Komponente, im Messergebnis M hervorrufen (DIN, 1995b). Die (absolute) Messabweichung $M - x_w$ ist die Abweichung eines aus Messungen gewonnenen Wertes (Messergebnis) vom

wahren Wert x_w der Messgröße (DIN, 1995a). Die Messunsicherheit u ist ein Kennwert, der zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert der Messgröße dient. Dieser Kennwert wird auf Grundlage von Messwerten und Kenntnissen über vorliegende systematische Messabweichungen gewonnen und dient als Maß für die Genauigkeit einer Messung (DIN, 1995a). Der zugehörige Wertebereich für den wahren Wert x_w hat demnach die Obergrenze $M + u$ und die Untergrenze $M - u$.

Messabweichungen können als Folge der Unvollkommenheit des Messgeräts, aufgrund durch das Messverfahren bedingter Einflüsse sowie durch Umwelteinflüsse hervorgerufen werden. Für Messgeräte sind daher in der Regel Fehlergrenzen vereinbart, die innerhalb des Messbereichs des Geräts die zulässige obere und untere Messabweichung vom Wert der Messgröße angeben. Ist der Betrag der Messabweichung eines Messgerätes kleiner oder gleich der oberen und unteren Fehlergrenze G , so entspricht es den Anforderungen (DIN, 1995a).

3.4.1.2 Messabweichungen an Kundenwasserzählern

Zählerabweichungen treten in der Wasserversorgung an Kundenwasserzählern sowie an Großwasserzählern und Durchflussmessgeräten zur Messung der Wasserproduktion und der Rohrnetzeinspeisung auf. Fehlerhafte Messungen der Einspeise- bzw. Abgabemenge können zu einer Über- bzw. Unterschätzung der realen Wasserverluste und in der Folge zu teuren Fehlentscheidungen führen. Daher ist eine Abschätzung der Messunsicherheit bei der Ermittlung der scheinbaren Wasserverluste für die Aussagekraft der Wasserbilanz wichtig. Das Messverfahren bzw. die Bauform des Messgeräts haben signifikanten Einfluss auf Messabweichung und Messunsicherheit. Die folgenden Abschnitte erläutern die unterschiedlichen Ursachen für Messabweichungen.

Zulässige Fehlergrenzen an Kundenwasserzählern Messgeräte, die im geschäftlichen Verkehr eingesetzt werden, beispielsweise bei der Belieferung von Kunden mit Wasser, unterliegen in Deutschland der Eichpflicht (s. Abschnitt 2.5.2). Da für Wasserzähler im eingebauten Zustand die Verkehrsfehlergrenze gilt, die das Doppelte der Eichfehlergrenze beträgt, sind auch an geeichten und korrekt installierten Messgeräten Zählerabweichungen bis 10 % im unteren und bis 4 % im oberen Messbereich möglich und zulässig.

Dimensionierung Damit ein Wasserzähler im optimalen Messbereich arbeitet und die Messabweichung möglichst klein gehalten wird, muss die Zählergröße Q_3 (Dauerdurchfluss, früher: Nenndurchfluss Q_n) möglichst gut dem zu erwartenden Verbrauch angepasst sein. Ein Wasserzähler ist überdimensioniert, wenn „die tatsächlichen Durchflüsse den Übergangsdurchfluss Q_2 kaum oder gar nicht überschreiten“ (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). So führt bei Durchflüssen unterhalb des Mindestdurchflusses Q_1 die niedrige Fließgeschwindigkeit zu einem geringen Drehmoment an der Flügelradachse und damit zu Schleichverlusten und einer Minderanzeige. Weiterhin spielt der Anlaufpunkt des Zählers eine wesentliche Rolle, weil Verbräuche unterhalb dieser Durchflussmenge überhaupt nicht erfasst werden (Feldtmann, 1985). Anlaufdurchfluss Q_a und Mindestdurchfluss Q_1 sind von Bauart und Größe des Wasserzählers abhängig, einige beispielhafte Werte hierfür sind in Tabelle 3.6 angegeben.

Tabelle 3.6 zeigt, dass insbesondere Woltmannzähler, die hauptsächlich bei Großkunden wie zum Beispiel Schwimmbädern oder Industriebetrieben eingesetzt werden, einen sehr hohen Anlaufpunkt haben. Verbundzähler sind daher vorzuziehen um Schleichverluste zu reduzieren.

Untersuchungen von Hofmann und Schubert (2006) an überdimensionierten Wasserzählern in zwei großen Wohnanlagen zeigen, dass der überwiegende Betrieb im unteren Belastungsbe-

Tabelle 3.6: Anlaufdurchfluss Q_a und Mindestdurchfluss Q_1 von EFZ, MFZ, RKZ und WMZ

| Typ | Q_3 | $[m^3/h]$ | 2,5 | 4 | 10 | 16 | 25 | 40 | 50 | 70 | 120 |
|-----|-------|-----------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| EFZ | Q_1 | $[l/h]$ | 30 | 50 | | | | | | | |
| | Q_a | $[l/h]$ | 10 | 14 | | | | | | | |
| MFZ | Q_1 | $[l/h]$ | 15 | 25 | 60 | 100 | 450 | | | | |
| | Q_a | $[l/h]$ | 4 | 5 | 10 | 20 | 25 | | | | |
| RKZ | Q_1 | $[l/h]$ | 4 | 10 | 25 | 40 | | | | | |
| | Q_a | $[l/h]$ | 1 | 2 | 11 | 18 | | | | | |
| WMZ | Q_1 | $[l/h]$ | | | | | | 200 | 150 | 200 | 200 |
| | Q_a | $[l/h]$ | | | | | | 50 | 50 | 70 | 100 |

Quellen: Zenner (2011a), Zenner (2011b), ALLMESS (2006) und EHLERS (2009).

reich (zwischen Q_1 und Q_2) selbst bei „Einhaltung der gesetzlich zugelassenen Fehlergrenzen zur Registrierung von Wassermengen führen, die deutlich größer sind als die tatsächlichen Durchflüsse“. Die Abweichungen wurden demnach nicht durch Schleimgängen unterhalb des Anlaufpunkts kompensiert und betragen im Rahmen der Untersuchungen 5 bis 6 % von der tatsächlichen Wasserentnahme. Zum gleichen Ergebnis kommt die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, die das Messverhalten verschiedener mechanischer Zählerbauarten unter präzise wiederholbaren Prüfstandsbedingungen untersucht hat und dabei insbesondere geringe Wasserentnahmen mit „kurzen Entnahmezeiten (zwischen 2 und 30 Sekunden) und kleinen Durchflüssen (zwischen 300 l/h und 5 m^3/h)“ analysierte (Wendt, 2011). Dabei wurde festgestellt, dass „wechselnde Durchflüsse und die Entnahme kleiner Wassermengen bei mechanischen Wasserzählern in der Regel zu Mehranzeigen auf Grund des Nachlaufens der Zähler führen können“ (Wendt, 2011).

Da Wasserzähler bei der Dimensionierung sowohl nach DIN 1988-3 als auch nach der bis vor kurzem gültigen Fassung des DVGW Arbeitsblattes W 406 vom Dezember 2003 laut Büschel (2010) zu groß ausfallen, muss man davon ausgehen, dass es in vielen WVU zu positiven Messfehlern kommt, die möglicherweise die Berechnungsergebnisse für die realen Wasserverluste verfälschen. Hofmann und Stefanski (2011) und Hofmann (2008) sehen die Ursachen einerseits im rückläufigen pro-Kopf-Trinkwasserverbrauch und der sinkenden Haushaltsgröße, die in der bisherigen Fassung des Arbeitsblattes W 406 nicht berücksichtigt wurden und andererseits darin, dass die rechnerischen Spitzendurchflüsse in Wohngebäuden gemäß DIN 1988-3 deutlich höher sind als die tatsächlich auftretenden Verbrauchsspitzen infolge von Gleichzeitigkeiten der Entnahme (Hofmann und Stefanski, 2011). Daher ist anzunehmen, dass zahlreiche Kundenwasserzähler im unteren und damit ungenauen Belastungsbereich arbeiten, wo Nachlaufeffekte bei kurzen und wechselnden Entnahmen auftreten können. Dem wurde bei der Überarbeitung des Arbeitsblattes W 406 (Fassung vom Januar 2012) Rechnung getragen, indem die Zahl der zulässigen Wohneinheiten für die Zählergrößen $Q_n = 6$ und $Q_n = 10$ bzw. $Q_3 = 10$ und $Q_3 = 16$ deutlich angehoben wurde (s. Tabelle 2.6).

Bauartunterschiede Die in Deutschland am häufigsten verwendeten Kundenwasserzähler sind Einstrahl- und Mehrstrahlflügelradzähler, Ringkolbenzähler sowie Woltmannzähler bzw. Verbundzähler für Großkunden. Die gesetzlichen Fehlergrenzen gemäß Abbildung 2.5 sind unabhängig von der Bauart für alle Wasserzähler gültig. Im vorigen Abschnitt wurde aber gezeigt, dass die Bauart bedeutenden Einfluss auf das Anlaufverhalten eines Wasserzählers

hat. Laut Böhm (1993) verwenden die meisten deutschen WVU Flügelradzähler, da sie robust, kostengünstig und weniger stör anfällig gegenüber Ablagerungen und Fremdkörpern sind als Ringkolbenzähler. Mehrstrahläufer weisen eine höhere Genauigkeit auf als Einstrahlzähler. Weiterhin sind Nassläufer genauer als Trockenläufer, da bei letzteren die Magnetkupplung zu Verzögerungen beim Anlaufen des Flügelrades führen kann (Feldtmann, 1985). Während Hofmann und Schubert (2006) gezeigt haben, dass an überdimensionierten Flügelradzählern in der Summe eine Mehranzeige auftreten kann, sind bei Ringkolbenzählern bauartbedingt nur negative Messabweichungen möglich (Arregui u. a., 2006).

Einbaulage Flügelradzähler sollten idealerweise so eingebaut werden, dass die Flügelradachse senkrecht steht. Arregui u. a. (2006) zeigen, dass es bei geneigter oder liegender Flügelradachse zu Reibungswiderständen kommt, die bei niedrigen Durchflussmengen zu signifikanten Minderanzeigen führen. Außerdem steigt durch den erhöhten Anlaufwiderstand der Anlaufdurchfluss Q_a und es kommt zu stärkeren Verschleißerscheinungen zwischen Flügelrad und Achse. Ringkolbenzähler werden nicht durch die Einbaulage beeinflusst (Arregui u. a., 2006).

Während Woltmannzähler relativ insensitive gegenüber vertikaler oder geneigter Einbaulage sind, reagieren sie sehr empfindlich auf Veränderungen des Strömungsprofils, etwa durch Krümmer oder halbgeöffnete Schieber in der Zulaufstrecke. Zur Vermeidung von Messfehlern ist daher im Zulauf eine gerade, freie und ausreichend lange Rohrstrecke oder ein Strömungsgleichrichter vorzusehen (Bonfig, 2002).

Weiterhin ist beim Einbau zu beachten, dass das „gesamte Leitungssystem einschließlich aller Einbauten vor und hinter dem Messgerät [...] stets vollständig gefüllt bzw. entlüftet“ ist, da mitgeführte Luftblasen das Messergebnis aller Wasserzähler-Bauformen verfälschen (DVGW, 2003b). Durch die Expansion von Luftblasen bei sinkendem Druck in der Versorgungsleitung kann Wasser durch den Wasserzähler zurückströmen, was zu einer positiven Messdifferenz führt. Diese kann bei Ein- bis Zweifamilienhäusern bis zu $60 \text{ m}^3/a$ betragen (Berndt u. a., 2001). Intermittierende Versorgung, teilgefüllte Leitungen und Fließrichtungs-Umkehr sind insbesondere in Entwicklungsländern als Ursache von Messabweichungen anzutreffen (Criminisi u. a., 2009).

Verschleiß Mit zunehmendem Alter nimmt die auftretende Messabweichung in Abhängigkeit von der Wasserbeschaffenheit und der hydraulischen Belastung zu. Laut Hofmann und Schubert (2006) sind keine Richtwerte für die Größenordnung dieser Messabweichungszunahme bekannt. Untersuchungen von Arregui u. a. (2006) haben ergeben, dass sich Veränderungen zuerst bei niedrigen Durchflussmengen bemerkbar machen, und dass durch zunehmende Reibungswiderstände insbesondere der Anlaufpunkt von Flügelradzählern signifikant steigen kann. Verschleiß an beweglichen Teilen führt praktisch bei allen Wasserzählertypen zu erhöhter Reibung und dadurch zu Minderanzeigen.

Kalk-, Eisen- und Manganablagerungen verengen die Einströmkanäle und den Bypass von (Mehrstrahl-)Flügelradzählern, was zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und somit zu Mehranzeigen führt. Mitgeführte abrasive Feststoffe dagegen führen zu Abrieb an beweglichen Verschleißteilen und verursachen Minderanzeigen. Bei Ringkolbenzählern führen Ablagerungen und mitgeführte Feststoffe in der Regel zum Blockieren des Zählers und infolgedessen zu einer Versorgungsunterbrechung der angeschlossenen Verbraucher.

3.4.1.3 Messabweichungen an Betriebswasserzählern

Die Messabweichung der Betriebswasserzähler (BWZ) unterliegt generell den gleichen Einflüssen (Dimensionierung, Einbaulage, Verschleiß etc.) wie bereits für Kundenwasserzähler beschrieben. Betriebswasserzähler unterliegen aber im Gegensatz zu Kundenwasserzählern nicht dem Eichgesetz (s. Abbildung 2.4). Daher sind WVU nicht dazu verpflichtet, diese Durchflussmessgeräte regelmäßig auszutauschen und zu kalibrieren. Gschleiner (2009) empfiehlt, auch diejenigen Messgeräte die nicht unter die Eichpflicht fallen, spätestens nach zehn Betriebsjahren auszutauschen oder durch den Hersteller kalibrieren zu lassen, um eine ausreichende Messgenauigkeit zu gewährleisten.

Um die Plausibilität der gemessenen Einspeisemengen für die Erstellung der Wasserbilanz anhand von Messunsicherheiten bewerten zu können, ist es zweckmäßig die Messungen mittels mobiler Durchflussmessgeräte (z.B. clamp-on Ultraschallmessgeräte) oder über den Vergleich mit Behälterfüllständen zu überprüfen. So berichten Gangl u. a. (2007) von einem Rohrnetzbezirk in Österreich, in dem die Wasserbilanz eine negative Wasserverlustmenge ergeben hatte. Eine Überprüfung des magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräts mithilfe der akkumulierten Füllstandsmessungen einer Drucksonde im Durchlaufbehälter belegte einen negativen Messfehler des Durchflussmessgeräts von ca. 13 %.

3.4.2 Abgrenzungsverluste

Für die Ablesung der Wasserzähler bestehen grundsätzlich drei Methoden: Stichtagsablesung, rollierende Ablesung und automatische Zählerablesung (AMR). Die Stichtagsablesung wird in der Regel nur noch von kleinen und mittleren WVU angewendet. Hierbei findet die Ablesung aller Zähler innerhalb eines kurzen Zeitraums (üblicherweise ein Monat) zum Jahresende hin statt und für alle Kunden erfolgt die Abrechnung bezogen auf das Kalenderjahr. Für große WVU mit mehr als 100.000 Kunden ist die Stichtagsablesung nicht mehr praktikabel, stattdessen erfolgt die Zählerablesung rollierend. Hierbei wird ein Versorgungsgebiet in Bezirke unterteilt, deren Ablesung und Rechnungsstellung zu unterschiedlichen Terminen stattfindet. Bei der automatischen Zählerablesung werden von Sensoren erfasste Verbrauchswerte kabellos per Fernübertragung an eine Zentrale gesendet oder mit Hilfe mobiler Datenerfassungsgeräte von Mitarbeitern des WVU im Vorbeifahren oder Vorbeigehen erfasst. Durch die funkunterstützte Messdatenerfassung müssen die Wasserzähler nicht mehr einzeln aufgesucht werden, die Erfassung ist schneller, flexibler und bei einer zentralen Datenerfassung in beliebig kurzen Zeitabständen möglich.

Insbesondere bei der rollierenden Ablesung können Fehler und Ungenauigkeiten bei der Abgrenzung der von den Kunden verbrauchten Wassermengen entstehen, die zu scheinbaren Verlusten führen. Laut Hirner und Merkel (2005) betragen Abgrenzungsverluste „zwischen 1 und 2 % der Wasserabgabe (meist im Plus-Bereich)“. Laut Osmancevic (2010) kann die Ableseverschiebung um wenige Tage eine Änderung der Wasserverlustwerte um bis zu 4 % ergeben.

3.4.3 Schleichverluste

Mit dem Begriff Schleichverluste werden Durchflussmengen bezeichnet, die unter dem Anlaufpunkt des Wasserzählers liegen und daher nicht registriert werden. Die möglichen Ursachen für Schleichverluste wurden bereits im Abschnitt 3.4.1.1 ausführlich behandelt. Laut DVGW Arbeitsblatt W 392 zeigen „Erfahrungswerte bezüglich Häufigkeit und Dauer von Kleinstabgaben unterhalb des Anlaufverhaltens von Wasserzählern“, dass „Schleichverluste maximal

1 % (ohne Wohnungswasserzähler) der Rohrnetzabgabe Q_A betragen“ (DVGW, 2003a). Laske (1978) verweist auf eine Reihe von Untersuchungen aus Stuttgart, die darauf hindeuten, dass die Schleichverluste in den Hausinstallationen der Abnehmer in vielen Rohrnetzen ca. $2,0 \text{ l/min/km}$ betragen. Dieser Wert ist aber heutzutage aufgrund des technologischen Fortschritts als deutlich zu hoch anzusehen.

3.4.4 Wasserdiebstahl und unzulässige Wasserentnahme

Wasserdiebstahl entsteht durch das Zusammenwirken verschiedener Faktoren wie der ökonomischen Situation der Gesellschaft, der Wasserknappheit sowie dem politischen Willen und der Durchsetzungskraft des WVU zur Verhinderung illegaler Wasserentnahmen. Es gibt zahlreiche Erscheinungsformen, dazu gehören illegale Anschlüsse, überbrückte, zerstörte und manipulierte Wasserzähler, Missbrauch von Hydranten oder illegale Entnahmen aus abgemeldeten Anschlüssen (AWWA, 2009). Im Gegensatz zur Situation in vielen Entwicklungsländern scheint Wasserdiebstahl in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle zu spielen: Es wurden keine Fachbeiträge gefunden, die sich mit diesem Thema beschäftigen, lediglich in der Presse finden sich gelegentlich Artikel zu Swimming Pools die aus Hydranten gefüllt werden sowie über Baufirmen, die eigene Standrohre ohne Zähler verwenden.

Für Wasserversorgungssysteme in denen von einem geringen Wasserdiebstahl ausgegangen wird, schlägt die AWWA vor, einen Ausgangswert von 0,25 % der Wasserabgabe Q_A zu verwenden (AWWA, 2009). Der DVGW gibt in seinem Arbeitsblatt W 392 keine Anhaltswerte für den Wasserdiebstahl vor.

3.4.5 Datenhandhabungsfehler

WVU beliefern üblicherweise viele tausend Kunden mit Wasser und allein aufgrund der großen Datenmenge kann es vorkommen, dass Fehler bei der Datenhandhabung auftreten, die in scheinbaren Wasserverlusten resultieren. Die folgenden Abschnitte erläutern die unterschiedlichen Arten von Datenhandhabungsfehlern.

Fehler beim Datentransfer Wasserzähler werden entweder manuell oder automatisch abgelesen. Bei der manuellen Ablesung, die immer noch die vorherrschende Vorgehensweise ist, können Messwerte falsch abgelesen oder fehlerhaft protokolliert werden. Zudem gibt es immer eine gewisse Menge an Wasserzählern, die aus verschiedenen Gründen nicht aufgesucht werden können und deren Verbrauch entweder anhand des Vorjahresverbrauchs abgeschätzt oder mit „Null“ bewertet werden muss. Weiterhin können Datensätze beim Transfer zum Abrechnungssystem verloren gehen. Die automatische, kabellose Zählerablesung löst die Probleme der Zugänglichkeit und des Transfers zum Abrechnungssystem, allerdings können Zähler aufgrund Funktionsstörungen oder Batterieversagen ausfallen (AWWA, 2009).

Fehler bei der Datenanalyse In der Kundendatenbank oder dem Abrechnungssystem, in dem die Messwerte abgelegt werden, können ebenfalls Fehler auftreten, die die Höhe der scheinbaren Wasserverluste beeinflussen. So kann es beispielsweise vorkommen, dass einzelne Kundenkonten deaktiviert oder verloren sind. Bei der Umrechnung der Zählerablesungen aus rollierender Ablesung werden teilweise Messdaten manipuliert und es kann es zu Abgrenzungsfehlern kommen (AWWA, 2009). Hierzu wurden von Renaud u. a. (2009) Untersuchungen bei fünf französischen WVU durchgeführt, die ergaben, dass die verschiedenen in der Praxis verwendeten Methoden zur Umrechnung von Einspeisemenge und Wasserabgabe

einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Wasserverlustmenge haben. So wichen die ermittelten Abgabemengen je nach Verfahren um bis zu 8 % voneinander ab. Eine mögliche Abweichung von $\pm 8 \%$ bedeutet eine erhebliche Unsicherheit und reduziert signifikant die Aussagekraft der berechneten Wasserverluste, insbesondere bei relativ geringen Wasserverlustraten, wie zum Beispiel in Deutschland. Auf die optimale Methode zur Abgrenzung wird daher in Abschnitt 5.5.2 detailliert eingegangen. Weitere Fehler entstehen durch die Verwendung von Schätzwerten für nicht abgelesene Wasserzähler oder die falsche Zuordnung von Kunden zu einer Zone im Falle einer zonenweisen Wasserbilanz.

Unternehmenspolitik und Arbeitsabläufe Manche WVU führen eine Anzahl von Kunden mit einem Sonderstatus, die zwar mit Wasserzählern ausgestattet sind, deren Verbrauch aber nicht abgelesen oder in Rechnung gestellt wird, beispielsweise öffentliche Gebäude (AWWA, 2009). Abschließend sind Fehler in der Wasserbilanz zu nennen, die aufgrund mangelnder Abstimmung zwischen einzelnen Abteilungen eines WVU entstehen. Üblicherweise werden die Wasserzählerdaten in der Kundendatenbank der Finanzbuchhaltung geführt, während die Analyse der Wasserverluste und die Erstellung der Wasserbilanz im Bereich des technischen Betriebs liegen. So kann es dazu kommen, dass der Verantwortliche für die Ermittlung der Wasserbilanz nichts über die Vorgehensweise zur zeitlichen Diskretisierung der Ablesedaten oder über die räumliche Verteilung des Wasserverbrauchs weiß.

3.5 Auswirkungen von Wasserverlusten

3.5.1 Allgemeines

In vielen Regionen der Welt erreichen die Wasserverluste Dimensionen, in denen sie eine Bedrohung für die kontinuierliche Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser darstellen. Dies ist in Deutschland nicht der Fall, da einerseits nur ca. 17 % des vorhandenen Wasserdargebots genutzt werden und sich andererseits die Wasserverluste insgesamt auf einem niedrigen bis mittleren Niveau befinden. Dennoch gibt es auch hier technische, ökonomische, ökologische und soziale Aspekte, die bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Gegenmaßnahmen in Betracht gezogen werden sollten.

3.5.2 Technische Auswirkungen

Trinkwasser wird mit großem technischem Aufwand produziert und zu den Verbrauchern gefördert. Um den Bedarf der Verbraucher vollständig zu decken, muss die Menge des verlorenen Wassers zusätzlich bereitgestellt werden. Hierfür muss in jedem Fall weiteres Rohwasser gewonnen werden. Darüber hinaus kann es notwendig werden, die Kapazität der Anlagen für Aufbereitung, Förderung und Verteilung zu erhöhen (Weimer, 1999b). Weimer (1999b) stellt weiterhin fest, dass der Aufwand für die „Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung [...] mit zunehmender Inanspruchnahme der verfügbaren Wasserressourcen immer höher“ wird. Weiterhin führen Wasserverluste in Folge von Leckagen zu Betriebsstörungen und Versorgungsunterbrechungen und binden Personal und Ausrüstung eines WVU. Thornton u. a. (2008) vermuten, dass große Teile der Leckverluste ihren Weg in das kommunale Regen- oder Abwasserkanalnetz finden und somit auch zu einer erhöhten Belastung der Anlagen der Siedlungsentwässerung führen.

Das Arbeitsblatt W 392 des DVGW (2003a) hebt hervor, dass Wasserverluste ein Indikator für den Rohrnetzstatus sind. Die Höhe der Wasserverluste steht demnach in direktem

Zusammenhang mit den Anstrengungen eines WVU für die Instandhaltung eines Wasserversorgungsnetzes.

3.5.3 Ökonomische Auswirkungen

Die Bereitstellung und der Transport von Trinkwasser, das auf dem Weg zum Kunden verloren geht, verursacht dem WVU Kosten, denen keine Einnahmen gegenüberstehen. Zusätzlich zu Investitionen für die Erschließung neuer Ressourcen, und der erhöhten Fixkosten für die Steigerung der Anlagenkapazitäten fallen vermeidbare Betriebskosten für Energie, Aufbereitung und Personalaufwand an (AWWA, 2009). „Leckverluste können spürbare Betriebskosten verursachen - insbesondere bei [...] Versorgungsunternehmen, die das Wasser aufwendig gewinnen und aufbereiten müssen“ schreiben Kilchmann u. a. (2004). Daraus folgen eine niedrigere Kosteneffizienz und höhere Produktionskosten, die durch höhere Verbraucherpreise kompensiert werden müssen. Hohe Kosten werden ebenfalls verursacht, wenn extreme Wasserverluste den Bau zusätzlicher Wasserversorgungsanlagen (z.B. eine zusätzliche Wassergewinnungsanlage oder eine Fernleitung) erforderlich machen.

Weiter sollte berücksichtigt werden, dass Leckagen Bodenbewegungen, Unterspülungen und Überschwemmungen verursachen können. Diese Schäden und daraus entstehende Schadensersatzforderungen sind in der Regel nur dann von einer Haftpflichtversicherung gedeckt, solange dem WVU keine Fahrlässigkeit (etwa durch Verzögerung der Schadenserkenkung oder -behebung) nachgewiesen werden kann (Fell und Papp, 2010). Zur Höhe möglicher Folgekosten siehe auch Rieder (2009). Die ökonomischen Folgen scheinbarer Wasserverluste sind nach Thornton u. a. (2008) nicht wie reale Verluste mit den Gestehungskosten sondern mit dem Verkaufspreis anzusetzen, da in diesem Fall das Wasser den Kunden tatsächlich erreicht hat, aber daraus keine Einnahmen entstanden sind.

3.5.4 Ökologische Auswirkungen

Die „Förderung einer nachhaltigen Wassernutzung auf der Grundlage eines langfristigen Schutzes der vorhandenen Ressourcen“ wird daher als zentrales Ziel in Artikel 1 der EG-Wasserrahmenrichtlinie genannt. Um diese Zielsetzung einer nachhaltigen Wassernutzung zu erfüllen, müssen von der Wasserwirtschaft unter anderem die Belastungen auf die vorhandenen Wasserressourcen sowie der direkte und indirekte Energieverbrauch minimiert werden (Tauchmann u.a., 2006). Die vorhergehenden Abschnitte haben bereits gezeigt, dass Wasserverluste automatisch zu erhöhten Entnahmen von Rohwasser führen und damit einen zusätzlichen Stress auf die natürlichen Wasserressourcen erzeugen.

Weitere negative Auswirkungen auf die Umwelt ergeben sich aus dem erhöhten Energieverbrauch für Aufbereitung und Förderung des Wassers. Laut AWWA (2009) sind WVU durchschnittlich für zwei bis zehn Prozent des nationalen Energieverbrauchs eines Staates verantwortlich. In Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Rohwassers, der Topografie, der Länge des Versorgungsnetzes und anderer Rahmenbedingungen liegt der spezifische Stromverbrauch bei 0,4 bis 1,0 kWh/m^3 Trinkwasser (Kilchmann u. a., 2004). Eine Hochrechnung über den spezifischen Wasserverbrauch aller WVU der Schweiz ergab einen Jahresstromverbrauch von ca. 405 Mio. kWh , wovon laut Kilchmann u. a. (2004) ca. 60 Mio. kWh allein durch Wasserverluste verursacht wurden. Noch gravierender verschlechtert sich die Energieeffizienz, wenn lokale Ressourcen erschöpft sind und das Wasser via Fernleitungen über weite Strecken zum Verbraucher gebracht werden muss. Der zusätzliche Energieverbrauch hat gleichzeitig einen vermeidbaren Ausstoß von CO_2 -Emissionen zur Folge, der im Gegensatz

zu den Prinzipien nachhaltigen Wirtschaftens steht. Abschnitt 3.6 belegt die Größenordnung der ökologischen Relevanz.

3.5.5 Soziale Auswirkungen

Trinkwasser ist ein Lebensmittel und muss dem Verbraucher in hygienisch einwandfreiem Zustand geliefert werden. Leckstellen bilden jedoch eine potentielle Gefährdungsquelle für Verunreinigungen durch kontaminiertes Grundwasser, Abwasser und andere Schadstoffe (Fell und Papp, 2010). Eine Studie von LeChevallier u. a. (2003) aus den USA zeigt auf, dass bei den meisten WVU ein Teil der Leitungen zumindest temporär unterhalb des Grundwasserspiegels liegen, und dass gerade im oberflächennahen Grundwasser im urbanen Raum die Belastung mit koliformen Bakterien und anderen mikrobiologischen und chemischen Schadstoffen sehr hoch sein können. Bei ungünstigen Druckverhältnissen, etwa infolge von Druckstößen, können diese Schadstoffe an Leckstellen in das Versorgungssystem hinein gesaugt werden. Wenn Wasserverluste zu lokalem Druckabfall oder zu Versorgungsunterbrechungen führen und sichtbare Leckagen lange Zeit nicht behoben werden, wirkt sich das negativ auf die Kundenzufriedenheit und das Ansehen des WVU aus. Dies sollte insbesondere im Hinblick auf die andauernde Diskussion über die Höhe der Wassertarife vermieden werden. Dank des hohen Wasserdargebots und dem hohen Standard der Versorgungssicherheit sind durch Wasserverluste bedingte, längere Versorgungsunterbrechungen in Deutschland eine Seltenheit. In anderen Staaten der EU, insbesondere im Mittelmeerraum, werden hingegen die Auswirkungen von Dürreperioden und Wasserknappheit durch Wasserverluste verstärkt und viele WVU sehen die Rationierung des Trinkwasser mittels intermittierender Wasserversorgung als letzten Ausweg an, wie Berichte aus Spanien und Zypern zeigen (s. hierzu z.B. Cabrera (2008) und Kelay u. a. (2008)). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass hohe Wasserverluste die Versorgungssicherheit der Kunden mit hygienisch einwandfreiem Trinkwasser in ausreichender Menge und mit ausreichendem Druck gefährden.

3.6 Aktuelle Zahlen zu Wasserverlusten

3.6.1 Wasserverlustsituation in Deutschland

Veröffentlichungen des statistischen Bundesamts Im Rahmen des Umweltstatistikgesetzes (UStatG) führen das Statistische Bundesamt und die Statistischen Ämter der Länder umweltstatistische Erhebungen durch und veröffentlichen die Ergebnisse in sogenannten Fachserien (StBA, 2013). Die Fachserie 19 Reihe 2.1.1 befasst sich mit der Wasserwirtschaft, insbesondere mit der öffentlichen Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Dazu werden bundesweit alle drei Jahre Daten zur öffentlichen Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung erhoben. Zu diesem Zweck werden „Anstalten, Körperschaften, Unternehmen und Einrichtungen, die Anlagen der öffentlichen Wasserversorgung oder Abwasserbeseitigung betreiben bzw. die für die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung zuständigen Gemeinden“ befragt (StBA, 2013). In den zuletzt erschienenen Veröffentlichung für die Bezugsjahre 2007 und 2010 finden sich auch Angaben zu den Jahren 1998, 2001 und 2004, die in Tabelle 3.7 mit Informationen des Umweltbundesamts zu den Jahren 1991 und 1995 zusammengefasst sind.

Anhand der Daten aus StBA (2013) lässt sich weiterhin untersuchen, inwiefern die Unternehmensgröße einen Einfluss auf die Höhe der Wasserverluste hat. Tabelle 3.8 veranschaulicht, dass die prozentualen Wasserverluste mit zunehmender Wasserabgabe (s. Abschnitt 2.4.2.2)

Tabelle 3.7: Wasserverluste in Deutschland, 1991 bis 2010

| Komponente | Einheit | 1991 | 1995 | 1998 | 2001 | 2004 | 2007 | 2010 |
|-------------------|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Eigengewinnung | [$10^6 m^3$] | 6.516 | 5.810 | 5.557 | 5.409 | 5.372 | 5.128 | 5.081 |
| Fremdbezug | [$10^6 m^3$] | <i>k.A.</i> | <i>k.A.</i> | 67 | 50 | 28 | 52 | 67 |
| Wasseraufkommen | [$10^6 m^3$] | 6.516 | 5.810 | 5.624 | 5.459 | 5.400 | 5.180 | 5.148 |
| Wasserabgabe | [$10^6 m^3$] | 5.748 | 5.094 | 4.883 | 4.796 | 4.767 | 4.571 | 4.530 |
| Wasserwerksbedarf | [$10^6 m^3$] | 143 | 124 | 132 | 134 | 145 | 150 | 145 |
| Wasserverluste | [$10^6 m^3$] | 758 | 711 | 600 | 530 | 496 | 462 | 474 |
| Q_V | [%] | 11,6 | 12,2 | 10,7 | 9,7 | 9,2 | 8,9 | 9,2 |
| Q_{NR} | [%] | 13,8 | 14,4 | 13,0 | 12,2 | 11,9 | 11,8 | 12,0 |

Quellen: StBA (2013), StBA (2009) und UBA (2009) Bei den letzten beiden Zeilen handelt es sich um berechnete Werte

Tabelle 3.8: Wasserverluste in Deutschland nach Höhe der Wasserabgabe, Stand 2010

| Wasserabgabe | Anzahl WVU | Wasserverlustrate |
|-----------------------|------------|-------------------|
| < 0,5 Mio. m^3 | 4.125 | 12,2 % |
| 0,5 – 1,0 Mio. m^3 | 730 | 10,7 % |
| 1,0 – 5,0 Mio. m^3 | 785 | 9,7 % |
| 5,0 – 10,0 Mio. m^3 | 104 | 9,1 % |
| > 10,0 Mio. m^3 | 78 | 7,7 % |

Quelle: StBA (2013)

sinken. Daraus lässt sich allerdings nicht automatisch folgern, dass größere WVU ein effektiveres Wasserverlustmanagement betreiben, da auch die unterschiedliche Versorgungsstruktur (s. Tabelle 2.2) und die Hausanschlussdichte großen Einfluss auf die Höhe der Wasserverluste haben.

Von StBA (2013) wird die Leitungslänge der Wasserversorgungssysteme im Gegensatz zur Länge der Abwasserkanalnetze nicht ermittelt, so dass nicht direkt ein landesweiter Wert für die spezifischen realen Wasserverluste berechnet werden kann. Für die Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg sowie für das Saarland konnten Informationen zu den Rohrnetzlängen der Trinkwasserversorgungssysteme ermittelt werden. Für die übrigen Bundesländer wurden die Rohrnetzlängen abgeschätzt, indem die Länge der Schmutz- und Mischwasserkanäle aus StBA (2013) auf die Gesamtlänge der bundesweiten Trinkwassernetze gemäß ATT u. a. (2011) skaliert wurde. Auch wird bei den Wasserverlusten nicht zwischen der realen und der scheinbaren Komponente unterschieden. Unter der Annahme, dass die scheinbaren Wasserverluste in Deutschland sehr gering sind und es sich somit bei den von StBA (2013) genannten Wasserverlusten überwiegend um reale Verluste handelt, können diese mit den geschätzten Leitungslängen der Bundesländer kombiniert werden, um damit landesweite Mittelwerte für die spezifischen realen Wasserverluste zu bilden (s. letzte Spalte von Tabelle 3.9).

Auf den Webseiten der Statistischen Landesämter (StLA), die für die Datenerhebung zuständig sind, können die Werte für Wassergewinnung, Wasserabgabe und Wasserverluste bis in die Gemeindeebene recherchiert werden. Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass Informationen des Statistischen Bundesamts bzw. der Statistischen Landesämter den wohl

Tabelle 3.9: Wasserverluste nach Bundesländern, Stand 2007

| Bundesland | Netzlänge ^a [km] | Rohrnetz- einspeisung [Mio. m ³ /a] | Wasserverluste | | |
|------------|--------------------------------|--|--------------------------|------|------------------------|
| | | | [Mio. m ³ /a] | [%] | [m ³ /km/h] |
| NI | 58.888 | 509,0 | 30,2 | 5,9 | 0,06 |
| SH | 17.543 | 179,2 | 10,2 | 5,7 | 0,07 |
| MV | 13.309 | 94,6 | 7,7 | 8,2 | 0,07 |
| HB | 2.400 ^c | 39,4 | 1,5 | 3,9 | 0,07 |
| BB | 18.580 | 127,6 | 11,7 | 9,2 | 0,07 |
| RP | 33.919 | 250,6 | 24,4 | 9,7 | 0,08 |
| HE | 41.288 | 345,3 | 35,1 | 10,2 | 0,10 |
| SL | 8.000 ^d | 61,8 | 6,8 | 11,1 | 0,10 |
| BE | 7.875 ^b | 203,5 | 7,5 | 3,7 | 0,11 |
| HH | 5.412 ^c | 110,7 | 5,0 | 4,5 | 0,11 |
| ST | 18.237 | 126,4 | 18,3 | 14,5 | 0,11 |
| BY | 98.774 | 843,2 | 98,2 | 11,6 | 0,11 |
| NRW | 90.960 | 1.216,4 | 88,8 | 7,3 | 0,11 |
| BW | 75.064 | 649,3 | 73,1 | 11,3 | 0,11 |
| SN | 24.890 | 225,3 | 29,0 | 12,9 | 0,13 |
| TH | 14.872 | 135,8 | 25,8 | 19,0 | 0,20 |
| Gesamt | 530.000 | 5.118,1 | 473,5 | 9,3 | 0,10 |

Quellen: StBA (2013) Bei den letzten beiden Spalten handelt es sich um berechnete Werte

(a) Rohrnetzlänge anhand Länge der Schmutz- und Mischwasserkanäle aus StBA (2009)

abgeschätzt, außer bei: (b) Berliner Wasserbetriebe (2008); (c) SWB AG (2012);

(d) Wasserversorgungsunternehmen Saarland (2012) und (e) Hamburg Wasser (2012)

umfassendsten Einblick in die Wasserverlustsituation in Deutschland geben.

Veröffentlichungen der deutschen Wasserverbände Als wichtigste Verbände für die deutsche Wasserversorgungswirtschaft sind in erster Linie der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW), der DVGW, der Deutsche Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft e. V. (DBVW) und der Verband der kommunalen Unternehmen e. V. (VKU) zu nennen. Gemeinsam mit der Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e. V. (ATT) und der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) veröffentlichen diese Verbände seit 2005 in einem Dreijahresrhythmus das *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft*. Tabelle 3.10 zeigt eine Übersicht über die veröffentlichten Wasserverlustzahlen im *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft*, denen laut ATT u. a. (2011) die Erhebungen des Statistischen Bundesamts zugrundeliegen.

Tabelle 3.10: Wasserverluste in Deutschland, 1991 bis 2007

| | 1991 | 1995 | 1998 | 2001 | 2004 | 2007 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| Wasserverluste in [%] | 10,9 | 10,7 | 8,0 | 7,3 | 6,8 | 6,5 |

Quellen: ATT u. a. (2005a), ATT u. a. (2008), ATT u. a. (2011)

Der Vergleich zwischen den Originaldaten des Statistischen Bundesamtes (s. Tabelle 3.7) und den Angaben im Branchenbild zeigt, dass letztere deutlich niedriger ausfallen. Der Autor vermutet, dass bei der Berechnung der prozentualen Wasserverluste irrtümlich der Fremdbezug von WVU innerhalb der Bundesländer zu der gesamten Wassergewinnung hinzuaddiert wurde. Dies ist bei der Betrachtung der eingespeisten Wassermenge des einzelnen WVU korrekt, für eine bundesweite Gesamtbilanz wird aber auf diese Weise das Ergebnis verfälscht und führt zu scheinbar niedrigeren Wasserverlusten. Abbildung 3.8 verdeutlicht die Zusammenhänge. Darin sind typischen Konstellationen von Versorgungsunternehmen mit Wassergewinnung aus eigenen Quellen und Fremdbezug schematisiert abgebildet:

- WVU A mit eigener Wassergewinnung
- WVU B mit eigener Wassergewinnung und Fremdbezug
- WVU C, D mit eigener Wassergewinnung und Abgabe an Weiterverteiler
- WVU E ohne eigene Wassergewinnung mit Fremdbezug
- WVU F ohne eigene Wassergewinnung mit Fremdbezug aus dem Ausland

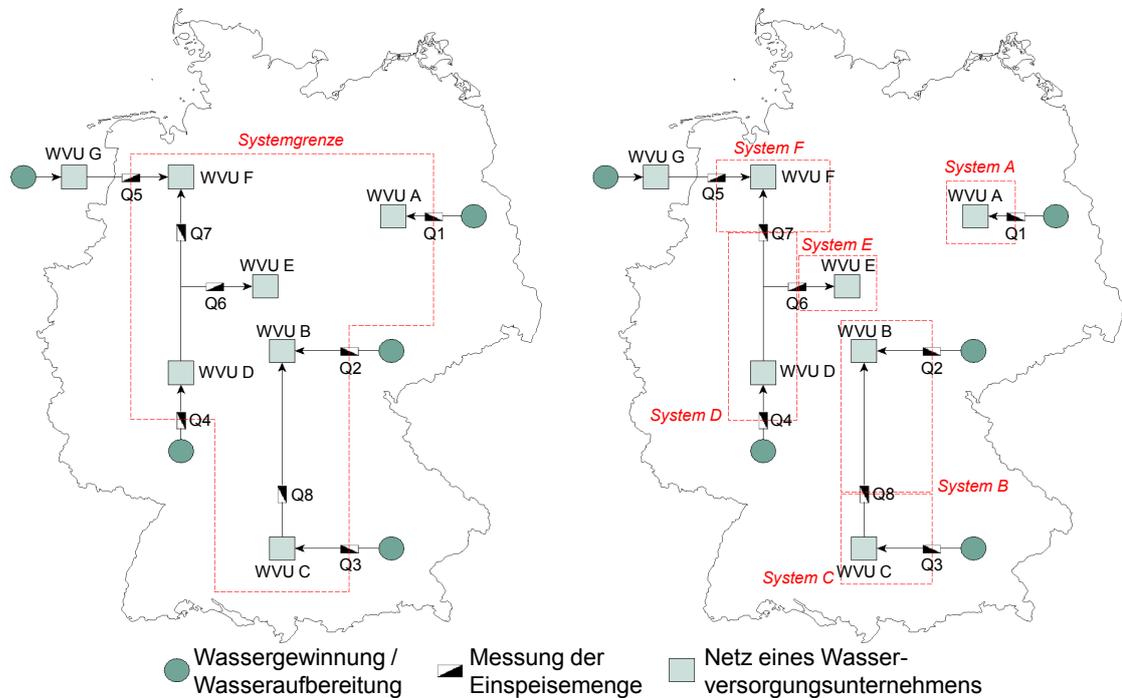


Abbildung 3.8: Systemgrenzen für deutschlandweite (links) sowie WVU-interne Bilanzierung (rechts)

Im *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft* wurde die gesamte deutsche Rohrnetzeinspeisung Q_N gemäß 3.8 ermittelt.

$$Q_N = \sum_{i=1}^5 Q_i + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (3.8)$$

Dies bedeutet, dass Q_6 , Q_7 und Q_8 doppelt gerechnet wurden, da sie bereits in Q_4 bzw. Q_3 enthalten sind, wie Abbildung 3.8 anschaulich zeigt. Die rechte Seite der Abbildung zeigt,

dass die Erfassung der Abgaben an Weiterverteiler bei der Berechnung separater Wasserbilanzen einzelner WVU notwendig und korrekt ist, nicht aber für bundesweite oder landesweite Wasserbilanzen.

Veröffentlichungen des nationalen Benchmarkingprojekts Der Deutsche Bundestag hat im März 2002 den Beschluss *Nachhaltige Wasserwirtschaft in Deutschland* gefasst, dessen Ziel die Modernisierung der Wasserver- und Abwasserentsorgung ist. Darin wurde als ein Kernelement die Einrichtung eines Benchmarking-Verfahrens zum Leistungsvergleich zwischen den Unternehmen der Wasserwirtschaft gefordert (Deutscher Bundestag, 2006). Der Bund, die Länder und die Interessenverbände der Wasserwirtschaft haben sich für ein anonymisiertes Benchmarkingsystem auf freiwilliger Basis auf Grundlage des internationalen Kennzahlensystems der IWA ausgesprochen. Die Verbände erklärten sich in einer gemeinsamen Erklärung bereit „den erforderlichen konzeptionellen Rahmen für ein Benchmarking in der Wasserwirtschaft im Sinne der Selbstverwaltung zu erarbeiten und weiter zu entwickeln“ und den Unternehmen die Teilnahme an Benchmarkingprojekten zu empfehlen (ATT u. a., 2005b). Weiterhin wurde vereinbart, dass die Ergebnisse des Benchmarkings der Öffentlichkeit in aggregierter und anonymisierter Weise bekannt gemacht werden sollten (Deutscher Bundestag, 2006). Dies geschieht zum Einen im *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft* und ausführlicher in länderweiten Benchmarkingberichten. Die Benchmarkingprojekte selbst werden im Auftrag der WVU bzw. der Wirtschafts-, Innen- und Umweltministerien des jeweiligen Bundeslandes von unabhängigen Unternehmensberatungen durchgeführt. Der BDEW (2010) veröffentlichte in einem Statusbericht den Anteil der von Benchmarkings erfassten Trinkwassermengen, gemessen an der gesamten Wassergewinnung der jeweiligen Bundesländer (s. Abbildung 3.9). Bezogen auf Deutschland werden somit ca. 60 % der gewonnenen Wassermenge durch die Benchmarkings erfasst. Da die Berichte von verschiedenen Unternehmensberatungen durchgeführt werden, unterscheiden sich die präsentierten Ergebnisse im Detail.

Die veröffentlichten Berichte, die naturgemäß nur eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigen, während die teilnehmenden WVU ausführliche Analysen erhalten, unterscheiden sich auffallend in der Art der Darstellung. Die ausführlichsten Berichte geben beispielsweise die spezifischen Wasserverluste separat in Abhängigkeit von der Versorgungsstruktur (ländlich, städtisch, großstädtisch) an und enthalten neben dem Mittelwert auch den Median sowie das 10-Perzentil und 90-Perzentil an (z.B. Brandenburg, MUGV-BB (2010)). Andere Berichte verwenden stattdessen das 25-Perzentil und 75-Perzentil. Manche Berichte geben nur einen Mittelwert über alle teilnehmenden WVU an (z.B. Thüringen, FH Schmalkalden und Rödl & Partner (2011)). Wieder andere zeigen die Ergebnisse aller teilnehmenden WVU in Diagrammform, allerdings ohne Einteilung nach Versorgungsstruktur (z.B. Niedersachsen, MUK-NI (2010)). Schließlich gibt es Bundesländer, in denen die Ergebnisse lediglich in einer Fachzeitschrift veröffentlicht wurden (z.B. Schleswig-Holstein, Möller u. a. (2009)) und Bundesländer für die kein öffentlicher Bericht auffindbar war (Mecklenburg-Vorpommern, Hessen). Abbildung 3.10 veranschaulicht die Heterogenität der Ergebnisse für die spezifischen realen Wasserverluste und vergleicht diese mit den Werten, die anhand der Daten des Statistischen Bundesamts ermittelt wurden.

Kiesel (2009) kritisiert, dass die kleinen und mittleren WVU bei Benchmarkingprojekten die quantitativ kleinste Teilnehmergruppe bilden, obwohl diese Unternehmensgruppe die größte Vergleichsgruppe darstellt, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse führt.

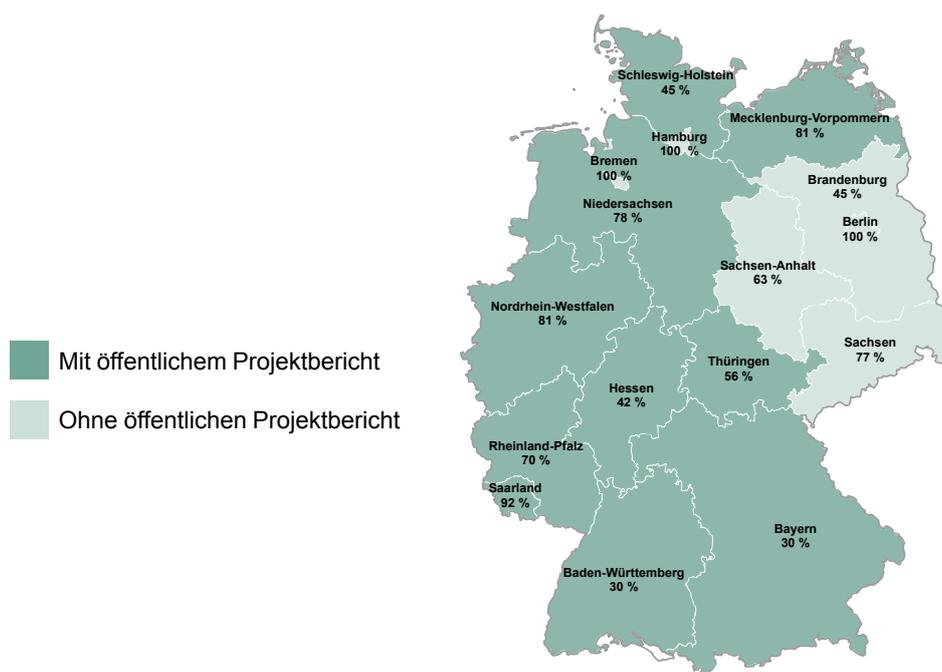


Abbildung 3.9: Prozentualer Anteil der von Benchmarkings erfassten Trinkwassermengen⁷

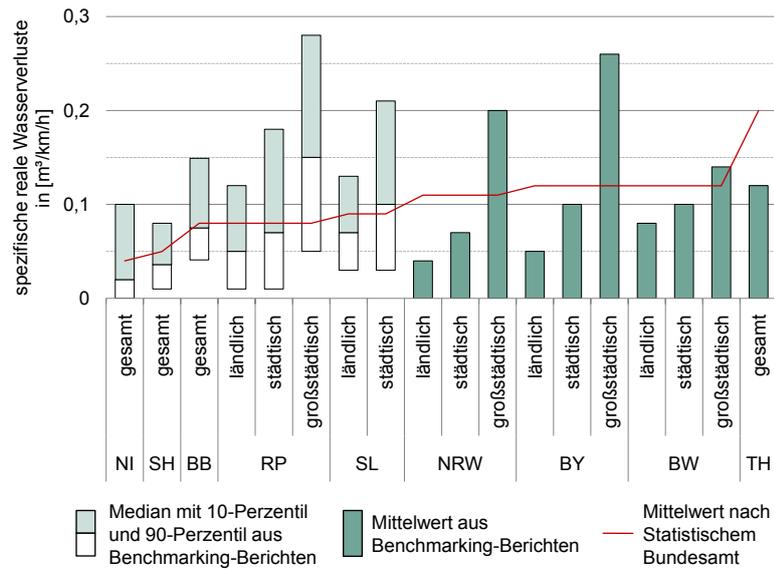
3.6.2 Wasserverlustsituation in der EU

Von offiziellen Stellen der EU gibt es keine umfassenden Berichte oder Statistiken mit konkreten Angaben zu der Wasserverlustsituation in den Mitgliedsländern. In einem Arbeitspapier der Europäischen Kommission wird etwas vage festgestellt, dass es in Europa ein riesiges Potenzial zu Wassereinsparung gibt, da mindestens 20 % des Wassers durch Verluste in der öffentlichen Wasserversorgung verloren gehen (EU, 2007). Die *European Federation of National Associations of Water and Wastewater Services* (EUREAU) konstatiert, dass es innerhalb der EU große Unterschiede in der Wasserverlustsituation gibt, mit durchschnittlichen Verlusten von „weniger als 5 % bis über 50 %“ des gewonnenen Wassers EUREAU (2011). In einem inoffiziellen Arbeitsdokument spricht auch die Europäische Kommission davon, dass „Leckagen aus Wasserverteilungsnetzen von bis zu 50 % in bestimmten Regionen Europas“ vorkommen (EU, 2012).

Eine aktuelle Studie von Dworak u. a. (2007), die Angaben zu nationalen Wasserverlustwerten einiger EU-Mitgliedsstaaten macht, bezieht sich dabei auf ein Datenblatt der Europäischen Umweltagentur aus dem Jahr 2003, das sich wiederum auf zum Teil geschätzte Angaben unterschiedlicher Quellen aus den Jahren 1995 bis 2001 stützt (EEA, 2003). Tabelle 3.11 fasst Zahlen zu Wasserverlusten in 21 von 27 EU-Mitgliedsstaaten zusammen. Für die übrigen sechs Mitgliedsstaaten waren nicht alle Eingangsdaten verfügbar. Es ist zu beachten, dass die Daten aus unterschiedlichen Quellen stammen und sich teilweise auf verschiedene Jahre beziehen.

Aus der einleitenden Beschreibung lässt sich ableiten, dass die in Tabelle 3.11 angegebenen Wasserverluste bestenfalls als Anhaltswert dienen können, da sie auf Daten basieren, deren

⁷Quelle: (BDEW, 2010)

Abbildung 3.10: Spezifische reale Wasserverluste nach Bundesländern⁸

Erhebung teilweise sehr lange zurückliegt bzw. die auf Schätzungen beruhen. Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Vergleichbarkeit der Angaben mangels einheitlicher Nomenklatur eingeschränkt ist. So lässt sich bei vielen Zahlen nicht feststellen, ob sie lediglich die realen Wasserverluste darstellen, oder ob scheinbare Wasserverluste und nicht in Rechnung gestellte Abgaben enthalten sind. Weiterhin ist bei vielen Daten unklar, inwieweit der Wasserverbrauch für betriebliche Zwecke und Löschwasserentnahmen berücksichtigt wurde. In Summe ergeben sich für die 21 analysierbaren Mitgliedsstaaten (mit ca. 94 % der Gesamtbevölkerung der EU) die folgenden Anhaltswerte:

- die Wasserverlustmenge beträgt ca. 10 Milliarden m^3 pro Jahr
- die mittleren Wasserverluste entsprechen ca. 23 % der Einspeisemenge
- die mittlere spezifische Wasserverlustrate beträgt ca. $0,34 m^3/km/h$

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in einigen Ländern vorbildliche Statistiken zum Thema Wasserversorgung und Wasserverlusten veröffentlicht werden - hier sind insbesondere die Niederlande (z.B. VEWIN (2010)) und Deutschland (z.B. StBA (2013)) zu nennen - während es in vielen anderen Ländern der EU sowohl an verlässlichen Zahlen als auch an Transparenz mangelt.

3.6.3 Globale Wasserverlustsituation

Wie die letzten beiden Abschnitte gezeigt haben, ist es selbst für Deutschland und die EU nicht selbstverständlich, über verlässliche Angaben zu Wasserverlusten gemäß international anerkannter Definitionen zu verfügen. Für eine weltweite Analyse nationaler Wasserverluste ist die Datenlage noch unzulänglicher. Gerade in Entwicklungsländern fehlt es den WVU an

⁸Quellen: MUGV-BB (2010), FH Schmalkalden und Rödl & Partner (2011), MUK-NI (2010), Möller u. a. (2009), MUFV-RP (2009), Rödl & Partner (2010), Rödl & Partner (2012)

Tabelle 3.11: Wasserverluste in der EU

| Land | Netzlänge [km] | Wasserabgabe [Mio. m ³ /a] | Wasserverluste | | |
|-------------|----------------------|--|--------------------------|-------------------|------------------------|
| | | | [Mio. m ³ /a] | [%] | [m ³ /km/h] |
| Niederlande | 116.000 ^a | 1.154 ^a | 53 ^a | 4,4 ^a | 0,05 |
| Deutschland | 530.000 ^c | 4.530 ^b | 474 ^b | 9,2 ^b | 0,10 |
| Belgien | 102.331 ^d | 616 ^d | 95 ^d | 13,4 ^d | 0,11 |
| Finnland | 80.000 ^d | 400 ^j | 80 ^j | 16,7 ^d | 0,11 |
| Dänemark | 41.000 ^j | 364 ^j | 40 ^j | 10,0 ^e | 0,14 |
| Österreich | 70.000 ^j | 573 ^j | 86 ^j | 13,0 ^d | 0,14 |
| Slowenien | 44.530 ^f | 116 ^g | 55 ^g | 47,5 ^g | 0,14 |
| Polen | 251.369 ^j | 1.222 ^j | 392 ^h | 32,1 ^j | 0,18 |
| Frankreich | 878.000 ^j | 4.500 ^j | 1.581 ^j | 26,0 ^d | 0,21 |
| Litauen | 10.945 ^j | 100 ^j | 30 ^h | 30,0 ^j | 0,31 |
| Malta | 2.042 ^j | 19 ^j | 6 ^h | 31,6 ^j | 0,34 |
| Zypern | 3.600 ^j | 86 ^j | 11 ^h | 12,8 ^j | 0,35 |
| Slowakei | 26.227 ^j | 225 ^j | 83 ^j | 27,0 ^j | 0,36 |
| Schweden | 67.000 ^j | 905 ^j | 226 ^j | 20,0 ^d | 0,39 |
| Tschechien | 69.435 ^j | 528 ^j | 248 ^j | 32,0 ^j | 0,41 |
| UK | 406.000 ^j | 5.304 ^j | 1.496 ^j | 22,0 ^j | 0,42 |
| Ungarn | 62.622 ^j | 546 ^j | 294 ^j | 35,0 ^j | 0,54 |
| Italien | 322.968 ^j | 5.598 ^j | 2.399 ^j | 30,0 ^j | 0,85 |
| Bulgarien | 70.620 ^j | 385 ^j | 578 ^j | 60,0 ⁱ | 0,93 |
| Rumänien | 50.821 ^j | 1.070 ^j | 481 ^j | 31,0 ^j | 1,08 |
| Spanien | 133.200 ^j | 4.620 ^j | 1.303 ^j | 22,0 ^j | 1,12 |
| Gesamt | 3.338.710 | 32.860 | 10.012 | 23,4 | 0,34 |

Quellen: (a) VEWIN (2010); (b) StBA (2013); (c) ATT u. a. (2011); (d) ProWat (2008);

(e) EEA (2003); (f) SI-STAT (1999); (g) SI-STAT (2012); (h) EUROSTAT (2012);

(i) Nikolova (2011) und (j) EUREAU (2009). Die Werte der letzten Spalte sind berechnet.

technischer Ausrüstung und Know-how, um die Höhe der Wasserverluste korrekt beurteilen zu können. In den meisten Ländern fehlen zudem starke nationale Verbände und ein landesweites Berichtswesen für die Sammlung und Zusammenführung der Daten einzelner WVU. Daher sind Angaben zu Wasserverlusten häufig nicht verfügbar oder nur eingeschränkt vertrauenswürdig. Seit die Themen Wasserverluste und Wasserverlustmanagement weltweit zunehmende Beachtung finden, häufen sich in der Literatur Fallstudien zu diesem Thema aus vielen Ländern dieser Erde. Diese behandeln aber in den meisten Fällen nur eine einzelne Stadt oder Region oder sogar nur eine Pilotzone, während landesweite Studien rar sind.

Aus diesem Grund kann mit Tabelle 3.12 nur eine grobe Abschätzung der Größenordnung der weltweiten Wasserverluste wiedergegeben werden, die Kingdom u. a. (2006) im Auftrag der Weltbank aufstellten. Diesen Zahlen liegt eine ganze Reihe von Annahmen zugrunde, so dass tatsächlich nur von einer groben Schätzung gesprochen werden kann.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Abschnitt 3.6.2 (Wasserverluste in der EU ca. 10 Mrd. m³/a) erscheinen beispielsweise sowohl die Höhe der Rohrnetzeinspeisung als auch die Höhe der Verluste der Industrieländer als deutlich zu niedrig angesetzt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Werte sogar noch höher liegen als die ohnehin

Tabelle 3.12: Schätzung der globalen Wasserverluste

| Gebiet | Rohrnetz- Einspeisung [Mrd. m^3/a] | NRW- Level [%] | Physische Verluste [Mrd. m^3/a] | Kaufm. Verluste [Mrd. m^3/a] |
|--------------------|---|----------------------|--|---------------------------------------|
| Industrieländer | 81,6 | 15 | 9,8 | 2,4 |
| GUS | 32,5 | 30 | 6,8 | 2,9 |
| Entwicklungsländer | 76,4 | 35 | 16,1 | 10,6 |
| Gesamt | 190,5 | | 32,7 | 15,9 |

Quelle: Kingdom u. a. (2006)

dramatischen Angaben von Kingdom u. a. (2006) erscheinen lassen.

3.6.4 Zusammenfassung der Zahlen und Bewertung des Reduktionspotenzials

Als Zusammenfassung der Erkenntnisse von Abschnitt 3.6 lässt sich mit Hinblick auf Wasserverluste und Wasserbilanzen folgendes feststellen:

- In Deutschland bieten die Erhebungen der Statistischen Landesämter eine hervorragende Datengrundlage für die Bestimmung der Wasserverluste. Allerdings werden wichtige Eigenschaften der Rohrnetze nicht erfasst, wie zum Beispiel die Rohrnetzlänge und die Anzahl oder Länge der Anschlussleitungen. Damit können wichtige Kennzahlen, wie die spezifischen realen Wasserverluste, nicht ermittelt werden.
- Der Vergleich der Wasserverluste zwischen einzelnen Staaten innerhalb und außerhalb der EU ist immer noch schwierig, da vielfach zentrale Organe fehlen, die eine einheitliche Erhebung der notwendigen Daten gewährleisten. Die unterschiedliche Interpretation (z.B. der Umgang mit scheinbaren Verluste oder dem Eigenverbrauch der WVU) führt zu Missverständnissen, so dass die Vergleichbarkeit nicht gegeben ist.

In Bezug auf das Potenzial der Wasserverlustreduktion kann festgehalten werden, dass dieses nicht nur in Entwicklungs- und Schwellenländern, sondern auch in den Industrienationen immer noch sehr groß ist. Alleine in Deutschland lag 2010 der Energieverbrauch für Gewinnung, Aufbereitung und Förderung von 474 Millionen m^3 verlorenen Wassers vermutlich bei ca. 242 Millionen kWh (s. StBA (2013) und Plath und Wichmann (2009)). Unter Berücksichtigung des deutschen Strommix setzte nach UBA (2012) jede verbrauchte Kilowattstunde im Jahr 2010 durchschnittlich 562 Gramm Kohlendioxid frei. Demnach lagen die von Wasserverlusten verursachten Kohlendioxid-Emissionen in 2010 bei ca. 137.000 $t CO_2$. Mit dem Gegenwert der Wasserverluste von ca. 280 Millionen Euro ließen sich beispielsweise 700.000 Geräuschlogger installieren oder das gesamte deutsche Versorgungsnetz vier Mal mit elektro-akustischen Verfahren auf Leckagen untersuchen. Die genannten Zahlen verdeutlichen, dass trotz des relativ niedrigen Niveaus der Wasserverluste in Deutschland noch immer ein beträchtliches Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz besteht. Angesichts der Erfordernisse des Klimaschutzes, aber auch des zunehmenden Kostendrucks auf WVU muss dieses Potenzial zukünftig weiter ausgeschöpft werden.

4 Wassermengenanalyse

4.1 Kapitelüberblick

Laut der US-amerikanischen Umweltbehörde (*Environmental Protection Agency*, EPA) ist die Wassermengenanalyse „die Grundlage und der entscheidende erste Schritt für die Schaffung eines effektiven Wasserverlustmanagements“ (US EPA, 2010). Sie liefert dem Wasserversorgungsunternehmen belastbare Aussagen über den Zustand des Wasserversorgungssystems, um daraus eine Strategie abzuleiten, wo und auf welche Weise Gegenmaßnahmen konzentriert werden sollten. Vereinfacht gesagt soll die Wassermengenanalyse Antworten auf die folgenden Fragen geben (Farley und Trow, 2003):

- Wie viel Wasser geht verloren?
- Wo geht das Wasser verloren?
- Warum geht es verloren?
- Mit welcher Strategie können die Verluste am effizientesten reduziert werden?

Die Bedeutung der Wassermengenanalyse für die effiziente Bekämpfung der Wasserverluste und Ihre Rolle bei der Strategieentwicklung für ein erfolgreiches Wasserverlustmanagement wird in Abschnitt 4.2 erläutert. Um eine Wassermengenanalyse durchführen zu können, ist die Höhe der Wasserverluste zu quantifizieren. Um die WVU bei der Ermittlung der Wasserbilanz zu unterstützen, wurden in den vergangenen Jahren bereits eine ganze Reihe von Software-Werkzeugen entwickelt. In Abschnitt 4.3 werden die gängigen Verfahren und Werkzeuge für die Quantifizierung der Wasserverluste beschrieben und Abschnitt 4.4 zeigt auf, welche Abteilungen und Organisationseinheiten eines WVU involviert werden müssen.

In Abschnitt 4.5 wird der Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der Kennzahlen dargestellt, mit deren Hilfe die Wasserverluste eines Wasserversorgungssystems beschrieben, bewertet und vergleichbar gemacht werden können. Diese Kennzahlen bilden die Grundlage für die Entwicklung von Strategien zur optimalen Wasserverlustreduzierung. Abschnitt 4.6 behandelt Aspekte der Datengüte von gemessenen Eingangsdaten und daraus berechneten Kennzahlen. Abschnitt 4.7 zeigt, wie im Rahmen der Strategieentwicklung zunächst Zielwerte formuliert und anschließend optimale Gegenmaßnahmen identifiziert werden können. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung von Defiziten bei der aktuellen Handhabung der Wassermengenanalyse und zeigt auf, wo Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, um den Einsatz von modernem Wasserverlustmanagement in Wasserversorgungsunternehmen weiter zu optimieren (s. Abschnitt 4.8).

4.2 Bedeutung der Wassermengenanalyse für die Wasserverlustbekämpfung

Die Bekämpfung der Wasserverluste ist ein iterativer Prozess, der an die spezifischen Bedürfnisse eines Wasserversorgungsunternehmens angepasst sein muss. Die EPA stellt fest, dass

effektives Wasserverlustmanagement aus der Abfolge der drei Komponenten Wassermengenanalyse (engl.: *water audit*), Gegenmaßnahmen und Evaluierung besteht, wie Abbildung 4.1 veranschaulicht (US EPA, 2010). Dabei ist die Wassermengenanalyse laut US EPA (2010) „die Grundlage und der entscheidende erste Schritt für die Schaffung eines effektiven Wasserverlustmanagements“.

Kölbl und Martinek (2010) konstatieren, dass modernes Wasserverlustmanagement dem WVU enorme Einsparungs- und Ertragspotenziale bietet, die über die Reduzierung der Wasserverluste hinausgehen. Dazu ist es wichtig, Wassermengenanalyse und Wasserverlustbekämpfung nicht als isolierte Maßnahmen zu betrachten, sondern als Teil einer übergeordneten Strategie zur Instandhaltung der Anlagen zur Wasserverteilung: „Wenn Wasserverlustdaten inklusive Informationen darüber welche Rohrleitungen wann und aus welchem Grund versagt haben, gesammelt werden, kann dies helfen, Modelle zu entwickeln, die zukünftige Schadensraten prognostizieren, und sicherzustellen, dass Erneuerungsraten angemessen sind“ (Parker, 2005). Auch Röttsch (1999) weist darauf hin, dass am Anfang einer sinnvollen Wasserverlustbekämpfung für WVU immer die quantitative Ermittlung ihrer Wasserverluste steht.

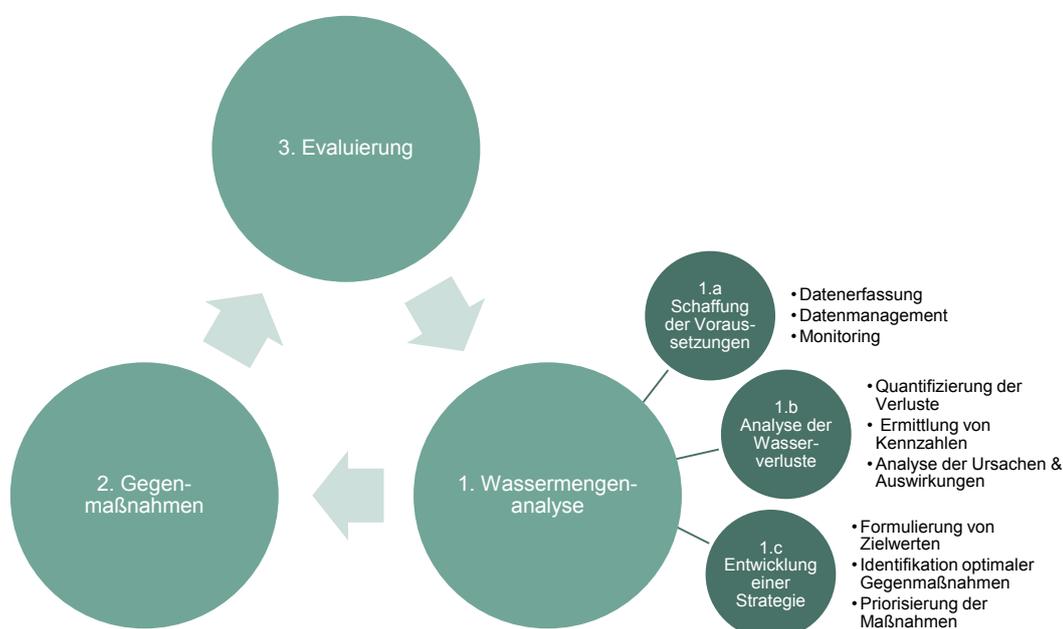


Abbildung 4.1: Komponenten eines Programms zur Wasserverlustbekämpfung¹

Die Wassermengenanalyse soll dem WVU eine belastbare Aussage über den Zustand des Wasserversorgungssystems liefern, um daraus einen Plan abzuleiten, wo und auf welche Weise Gegenmaßnahmen konzentriert werden sollten, um die Wasserverluste zu eliminieren (s. Abschnitt 4.7). Um die Wassermengenanalyse durchführen zu können, sind im ersten Schritt die notwendigen Voraussetzungen zu schaffen. Darunter fällt einerseits die Erfassung von Daten, die direkt für die Erstellung der Wasserbilanz benötigt werden, beispielsweise Messwerte der Betriebswasserzähler und der Kundenwasserzähler, die Erfassung des Eigenverbrauchs in den Wasserwerken und den Leitungsnetzen sowie Anhaltspunkte für die Ermittlung von Löschwasserentnahmen und scheinbaren Wasserverlusten. Andererseits sind auch Daten zu erfassen, die die Komponenten des Rohrnetzes und deren Zustand beschreiben, beispiels-

¹Quelle: abgeändert nach US EPA (2010)

weise das Rohrnetzkataster und die Schadensdatenbank, um daraus mögliche Ursachen der Wasserverluste abzuleiten.

Der zweite Schritt der Wassermengenanalyse beinhaltet die Erstellung der Wasserbilanz, um die Höhe der scheinbaren und realen Wasserverluste quantifizieren zu können. Optimalerweise wird die Wasserbilanz nicht nur für das Gesamtsystem sondern für einzelne Versorgungszonen separat erstellt. Durch eine Überlagerung der ermittelten Verluste mit den entscheidenden Faktoren, die deren Entstehung begünstigen, lassen sich somit zonenweise die wahrscheinlichen Ursachen der Wasserverluste bestimmen. Weiterhin können anhand von Kennzahlen die Auswirkungen der Wasserverluste quantifiziert werden.

Mit diesen Ergebnissen kann das WVU schließlich die passende Strategie aufstellen: Die Ursachenanalyse gibt Aufschluss darüber, welches die idealen Gegenmaßnahmen sind. Und die Analyse der Auswirkungen hilft, die vorhandenen Ressourcen auf die kritischen Stellen des Wasserversorgungssystems zu konzentrieren, die das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis bieten. Dabei sollten neben den ökonomischen Aspekten auch weitere Kriterien berücksichtigt werden (US EPA, 2010).

Nach der Wassermengenanalyse und der Durchführung von Gegenmaßnahmen sollte deren Wirksamkeit evaluiert werden. Auch hierbei kommen Kennzahlen zum Einsatz (s. Abschnitt 4.5).

4.3 Verfahren und Werkzeuge zur Ermittlung der Wasserverluste

4.3.1 Überblick

Osmanovic (2010) macht deutlich, dass die „richtige Ermittlung der Wasserverluste, mit einer klaren Differenzierung nach spezifischen Versorgungsgebieten [...] und unterschiedlichen Arten von Wasserverlusten [...] gezielte und optimale Maßnahmen zur Unterschreitung und Einhaltung der Wasserverlustzielwerte“ ermöglicht. Zur Ermittlung der Wasserverluste lassen sich zwei grundlegende Verfahrensweisen unterscheiden: Deduktive (engl. *Top-down*) Verfahren und Induktive (engl. *Bottom-up*) Verfahren. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die gängigen Verfahren.

Tabelle 4.1: Verfahren zur Wasserverlustermittlung

| Deduktive oder Top-down-Verfahren | Induktive oder Bottom-up-Verfahren |
|--|--|
| (jährliche) Wasserbilanz Komponentenanalyse | Tagesverbrauchsmessung Nachtmindestverbrauchsmessung Nullverbrauchsmessung Absperrentil- (oder <i>Stop-tap</i> -) Verfahren Volumetrischer Test (für Hochbehälter) Kontinuierliche Rohrnetzüberwachung Streubreitenverfahren |

Die Deduktion beschreibt einen gedanklichen Vorgang, bei dem von etwas Allgemeinem (z.B. der gesamten Rohrnetzeinspeisung und dem Wasserverbrauch der Kunden) Rückschlüsse über etwas Konkretes (z.B. die Wasserverluste innerhalb einer Versorgungszone) gezogen

werden. Die Induktion bezeichnet den umgekehrten Vorgang, in diesem Fall die messtechnische Bestimmung der Leckrate an einem kurzen Leitungsabschnitt zur Ableitung der Wasserverluste innerhalb einer Versorgungszone. Nach Röttsch (1999) sind die induktiven Verfahren an Genauigkeit den deduktiven Verfahren überlegen, da sich „aus der Jahresmengenbilanz die tatsächlichen Wasserverluste nur grob und zudem nachträglich“ ableiten lassen, während die Verluste „aus der Nullverbrauchsmessung [...] direkt und momentan ablesbar sind“. Andererseits lassen sich exakte Verfahren wie die Nullverbrauchsmessung nur kleinräumig und mit erheblichem Aufwand durchführen. Eine Kombination unterschiedlicher Verfahren mit minimalem Aufwand für die Erhebung zusätzlicher Daten gilt daher als optimaler Ansatz zur effizienten Ermittlung der Wasserverluste. In den folgenden Abschnitten werden die in Tabelle 4.1 aufgezählten Verfahren beschrieben.

4.3.2 Deduktive Verfahren (oder Top-down Verfahren)

Wasserbilanz Die Wasserverluste können anhand der standardisierten (jährlichen) Wasserbilanz (s. Abbildung 3.2) gemäß DVGW Arbeitsblatt W 392 von oben (Rohrnetzeinspeisung) nach unten (einzelne Verlustkomponenten) ermittelt werden. Dafür sind im Arbeitsblatt W 392 die folgenden sechs Schritte vorgeschrieben (DVGW, 2003a):

1. Ermittlung der Rohrnetzeinspeisung Q_N und der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AI} .
2. Möglichst genaue Schätzung der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} .
3. Die Summe aus Q_{AI} und Q_{AN} ergibt die gesamte Rohrnetzabgabe Q_A .
4. Die Differenz aus Q_N und Q_A ergibt die Wasserverluste Q_V .
5. Möglichst genaue Schätzung der scheinbaren Wasserverluste Q_{VS} .
6. Die Differenz aus Q_V und Q_{VS} ergibt die realen Wasserverluste Q_{VR} .

Bezüglich des ersten Arbeitsschritts betont der DVGW (2003a) die Bedeutung der genauen Messung von Q_N und weist darauf hin, dass Messabweichungen der dafür verwendeten Betriebswasserzähler bei der Bilanzierung zu berücksichtigen sind. Ungemessene Rohrnetzeinspeisung und -abgabe soll möglichst vermieden werden. Die gemessenen Abgabemengen sollen näherungsweise auf den zu bilanzierenden Zeitraum umgerechnet werden und die ungemessenen Abgaben sollen im zweiten Arbeitsschritt möglichst genau geschätzt werden. Das Arbeitsblatt gibt allerdings keine Empfehlungen oder Vorgehensweisen für die Umsetzung vor.

Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die scheinbaren Wasserverluste bei der Mengenzuflussbilanzierung berücksichtigt werden müssen. Es ist jedoch nicht möglich, die tatsächliche Höhe der scheinbaren Wasserverluste direkt zu messen. Daher müssen Erfahrungswerte verwendet werden oder einzelne Kategorien der scheinbaren Verluste anhand von Stichproben näherungsweise bestimmt werden. Die folgenden Referenzwerte sind in den nationalen und internationalen Richtlinien zu finden:

- DVGW W 392: Zur „Ermittlung der realen Wasserverluste Q_{VR} (können) scheinbare Wasserverluste Q_{VS} in der Größenordnung von 1,5 - 2,0 % der Rohrnetzabgabe Q_A angesetzt werden“ (DVGW, 2003a).
- DVGW W 392: „Aus Erfahrungswerten [...] kann abgeleitet werden, dass Schleichverluste max. 1 % (ohne Wohnungswasserzähler) der Rohrnetzabgabe Q_A betragen.“ (DVGW, 2003a).

- ÖVGW W 63: „Bei korrekter Dimensionierung, Einbau und Einhaltung der Eichintervalle für Kundenwasserzähler sind scheinbare Wasserverluste in der Größenordnung bis 0,5 % der Wasserabgabe anzusetzen“ (ÖVGW, 2009).
- IWA Water Loss Specialist Group: Als Referenzwert für scheinbare Wasserverluste sollten 5 % der genehmigten (gemessenen oder abgeschätzten) Wasserabgabe angesetzt werden, sofern keine anderen historischen Erfahrungswerte vorliegen (Johnson und Vermersch, 2011)
- AWWA M 36: „Für die Erstellung der Wasserbilanz ist es zweckmäßig, (für die ungenehmigte Wasserentnahme, Anm. des Autors) einen Ausgangswert von 0,25 % der Einspeisemenge zu wählen.“ (AWWA, 2009)

Die Auflistung zeigt, dass die Referenzwerte international deutlich voneinander abweichen. Dies lässt sich zum Teil auf die unterschiedliche Philosophie der Wassermessung im deutschsprachigen und angelsächsischen Raum zurückführen: Während in Deutschland und Österreich die meisten Kunden mit einem Wasserzähler ausgerüstet sind, wurde beispielsweise in Großbritannien viele Jahre mit sogenannten *District Meter Areas* (DMA) gearbeitet, bei denen der Wasserverbrauch der Kunden pauschal auf Basis der gemessenen Einspeisemenge in einen Rohrnetzbezirk ermittelt wurde. Allerdings gibt es auch in Deutschland Wasserversorgungsunternehmen, die ihren Kunden ein verbrauchsunabhängiges Trinkwasserentgelt berechnen, die auf der Schätzung eines „haushaltsüblichen“ Verbrauchs basieren. In Rheinland-Pfalz beispielsweise trifft dies auf rund 15 % der Gebühren zu (MUFV-RP, 2009). Ein solches Näherungsverfahren führt zwingend zu hohen Abweichungen bei der Ermittlung des tatsächlichen Wasserverbrauchs.

In Anbetracht der Tatsache dass die realen Wasserverluste in Deutschland laut ATT u. a. (2011) nur bei ca. 6,5 % der Einspeisemenge liegen, wird offensichtlich, dass hohe Abweichungen bei der Abschätzung der scheinbaren Wasserverluste zu einer signifikanten Verfälschung der Ergebnisse führen. Es sind daher geeignete Verfahren zur möglichst genauen Bestimmung der Komponenten Zählerabweichungen (Zählerpark analysieren), Abgrenzungsverluste (Annualisierung) und Wasserdiebstahl zu entwickeln und einzusetzen.

Jeder gemessene oder geschätzte Wert unterliegt Fehlern und Ungenauigkeiten, die eine Abweichung von seinem wahren Wert verursachen. Aufgrund der Fehlerfortpflanzung akkumulieren sich diese Einzelfehler bei der Erstellung der Wasserbilanz und bewirken, dass auch die Ergebnisse der berechneten scheinbaren und realen Wasserverluste von ihrem richtigen Wert abweichen (Fanner, 2004). Geeignete Verfahren, um die Abweichung der Ergebnisse zu bestimmen oder abzuschätzen sind in Abschnitt 4.6 beschrieben.

Die Wasserbilanz nach DVGW Arbeitsblatt W 392 ist dafür geeignet, die Gesamtmenge der realen Wasserverluste zu bestimmen. Allerdings können mit diesem Verfahren weder die betroffenen Rohrnetzelemente (z.B. Zubringer-, Haupt- oder Versorgungsleitungen) noch einzelne Verlustkomponenten bestimmt werden, also z.B. der Anteil an detektierbaren Leckagen oder der Anteil an Kleinstleckagen. Dazu muss die Wasserbilanz um Erkenntnisse aus der Komponentenanalyse oder einem der induktiven Verfahren ergänzt werden (Fanner, 2004).

Komponentenanalyse Im Rahmen der britischen *National Leakage Control Initiative* wurde Mitte der 90er Jahre ein Verfahren zur Abschätzung einzelner Komponenten der jährlichen Wasserverluste entwickelt, das unter der Abkürzung *BABE* (engl. für *burst and background estimates*) bekannt wurde. Ziel der Komponentenanalyse ist es, die Höhe der (unvermeidbaren) Kleinstleckagen und die Höhe der Wasserverluste aus detektierten und reparierten Rohrschäden abzuschätzen (Liemberger und Farley, 2004). Dabei wird unterschieden nach

Verlusten an Haupt- und Versorgungsleitungen und an den Anschlussleitungen. Durch Subtraktion von der Gesamtmenge der realen Wasserverluste erhält man somit die Höhe der sogenannten exzessiven Wasserverluste (engl. *excess losses*), die mit der aktuell verwendeten Strategie zur Reduzierung der Wasserverluste nicht erkannt und behoben werden. Bei dieser Komponentenanalyse handelt es sich weniger um eine streng wissenschaftliche Herangehensweise als vielmehr um eine Überschlagsrechnung, die auf einer Reihe von Annahmen und Vereinfachungen basiert (Farley und Trow, 2003).

Zunächst wird die Höhe der aus den Kleinstleckagen resultierenden Wasserverluste im Untersuchungszeitraum abgeschätzt. Sind hierzu keine WVU-spezifischen Erfahrungswerte vorhanden, geschieht dies anhand von Richtwerten für die minimalen Leckraten und Laufzeiten unterschiedlicher Schäden in Rohrnetzen sehr guten Zustands. Diese Richtwerte basieren auf Datensätzen und veröffentlichten Daten von 27 Wasserversorgungssystemen aus 20 Ländern, darunter Australien, Japan, die Niederlande, USA und Deutschland. Die Herleitung dieser in Tabelle 4.2 dargestellten Werte wird in einem Artikel von Lambert u. a. (1999) ausführlich beschrieben.

Tabelle 4.2: Richtwerte für Leckraten von Kleinstleckagen

| Komponente | Leckrate | Einheit |
|------------------------------------|----------|------------------------|
| Haupt- und Versorgungsleitungen | 9,6 | [l/km/d] pro [m] Druck |
| Anschlussleitungen - öffentl. Teil | 0,6 | [l/AL/d] pro [m] Druck |
| Anschlussleitungen - privater Teil | 16,0 | [l/km/d] pro [m] Druck |

Quelle: Lambert u. a. (1999), Liemberger und Farley (2004)

Anschließend werden die Wasserverluste von den im Untersuchungszeitraum entdeckten und reparierten Leckagen abgeschätzt. Stehen keine besseren Angaben zur Verfügung, beispielsweise Auswertungen von Leitstellen-Messwerten oder Schätzungen der Monteure des Bereitschaftsdienstes, können dazu die Richtwerte aus Tabelle 4.3 verwendet werden.

Tabelle 4.3: Richtwerte für Leckraten von sichtbaren und versteckten Schäden

| Komponente | sichtbare Schäden | versteckte Schäden | Einheit |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Haupt- und Versorgungsltg. | 0,240 | 0,120 | [m ³ /h] pro [m] Druck |
| Anschlussleitungen | 0,032 | 0,032 | [m ³ /h] pro [m] Druck |

Quelle: Lambert u. a. (1999), Liemberger und Farley (2004)

Daraufhin bestimmt das WVU die ungefähren Laufzeiten anhand von Erfahrungswerten aus der Praxis unter der Berücksichtigung der drei Phasen Alarmierung, Ortung und Reparatur gemäß Abschnitt 3.3.6. Die Laufzeiten von sichtbaren, gemeldeten Schäden sind in der Regel sehr kurz: der Wasseraustritt aus sichtbaren Schäden an Hauptleitungen wird oft innerhalb eines Tages durch die Erstmaßnahme des Bereitschaftsdienstes gestoppt. Kleinere Leckagen an Hausanschlüssen laufen möglicherweise etwas länger, insbesondere dann, wenn nicht das WVU sondern der Grundstückseigentümer für die Reparatur verantwortlich ist. Bei versteckten Leckagen hängt die Laufzeit hauptsächlich von den Inspektionsintervallen der Leckortungskampagnen ab und ist daher von WVU zu WVU sehr unterschiedlich (Liemberger und Farley, 2004). Die Wasserverluste infolge von Kleinstleckagen $Q_{V.KL}$ lassen sich

mithilfe der Richtwerte aus Tabelle 4.2 und Gleichung 4.1 abschätzen:

$$Q_{V.KL} = (9,6 \times L_N + 0,6 \times n_{AL} + 16,0 \times L_{p.AL}) \times P_m \quad (4.1)$$

Darin sind $Q_{V.KL}$ [m^3] die Wasserverluste infolge von Kleinstleckagen, L_N [km] die Gesamtlänge des Rohrnetzes, n_{AL} [-] die Anzahl der Anschlussleitungen, $L_{p.AL}$ [m] die mittlere Länge der Anschlussleitung auf Privatgrund und P_m [m] der mittlere Versorgungsdruck der untersuchten Zone. Die Wasserverluste $Q_{V.BS}$ infolge von entdeckten und reparierten Schäden lassen sich mithilfe der Richtwerte aus Tabelle 4.3 und Gleichung 4.2 abschätzen:

$$Q_{V.BS} = (240 \times n_{s.SN} \times t_{s.SN} + 120 \times n_{v.SN} \times t_{v.SN} + 32 \times n_{S.AL} \times t_{S.AL}) \times P_m \quad (4.2)$$

Darin sind $Q_{V.BS}$ [m^3] die Wasserverluste, die an entdeckten und behobenen Schäden entstanden sind, $n_{s.SN}$ [-] und $n_{v.SN}$ [-] die Anzahl der sichtbaren und versteckten jährlichen Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen, $n_{S.AL}$ [-] die Anzahl der jährlichen Schäden an Anschlussleitungen, $t_{s.SN}$, $t_{v.SN}$ und $t_{S.AL}$ in [h] die Laufzeiten der jeweiligen Schadensstelle und P_m [m] der mittlere Versorgungsdruck der untersuchten Zone. Somit kann die Höhe der exzessiven Wasserverluste Q_{VE} [m^3] anhand Gleichung 4.3 bestimmt werden.

$$Q_{VE} = Q_{VR} - Q_{V.KL} - Q_{V.BS} \quad (4.3)$$

Falls sich für die exzessiven Wasserverluste ein negativer Wert ergibt, sind die oben genannten Annahmen zu prüfen und gegebenenfalls zu korrigieren.

Eine gut durchgeführte Komponentenanalyse gibt dem Wasserversorger wichtige Hinweise auf mögliche Gegenmaßnahmen. Ist beispielsweise der Anteil der Kleinstleckagen an den realen Wasserverlusten sehr hoch, ist Druckmanagement die einzige wirtschaftliche Maßnahme, da es oft unwirtschaftlich ist, diese sehr kleinen undichten Stellen aufzuspüren und zu beheben. Sind die Verluste aus behobenen Schäden sehr hoch, sind möglicherweise Maßnahmen zur Verringerung der Laufzeit (Verkürzung des Inspektionszeitraums, Verstärkung des Bereitschaftsdienstes o.ä.) angebracht. Weiterhin lässt sich aus dem Ergebnis ablesen, welche Anteile der Wasserverluste auf Hausanschlussleitungen und auf Haupt- und Versorgungsleitungen entfallen. Nachteil der Komponentenanalyse ist, dass diese immer auf Schätzungen beruht. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten sind daher geeignete Methoden zur Quantifizierung von Leckraten und -laufzeiten unerlässlich.

4.3.3 Induktive Verfahren (oder Bottom-up Verfahren)

Im Gegensatz zur Wasserbilanz, mit deren Hilfe nachträglich die Wasserverluste über einen längeren Zeitraum als Differenz zwischen eingespeister und verbrauchter Wassermenge ermittelt werden, dienen die induktiven Verfahren dazu, über einen kurzen Zeitraum die Wasserverluste in einem kleinen Gebiet entweder direkt zu messen oder möglichst genau zu bestimmen. Für alle induktiven Verfahren gilt gleichermaßen, dass Messungen durchgeführt werden müssen, für die in der Messvorplanung die folgenden Vorkehrungen getroffen werden müssen:

- Grenzen des Untersuchungsgebiets und geeignete Absperrschieber bestimmen;
- Absperrschieber schließen und auf Dichtheit prüfen;
- angeschlossene Kunden und deren Verbrauchsverhalten analysieren;
- (industrielle) Groß- und Dauerverbraucher identifizieren und messen;

- Wasserabgaben an Weiterverteiler oder Nachbarzonen berücksichtigen;
- Einspeisemenge über eine oder mehrere mobile oder fest installierte Messvorrichtungen in möglichst kleinen Intervallen und mit ausreichender Messgenauigkeit messen;
- Messungen in den verbrauchsarmen Nachtstunden durchführen, um störende Einflüsse zu eliminieren.

Je kleiner das Untersuchungsgebiet gewählt wird, desto exakter können die Wasserverluste ermittelt werden. Die Einspeisung kann wahlweise direkt aus dem Versorgungssystem, über Schlauchbrücken aus einer benachbarten Zone oder aus einem speziell ausgerüsteten Tankfahrzeug erfolgen. Es kann in momentane und kontinuierliche Zuflussmessungen unterschieden werden. Nachfolgend werden die gebräuchlichsten Verfahren beschrieben:

Tagesverbrauchsmessung Einige Wasserversorgungsunternehmen messen die täglich ins Gesamtsystem oder in einzelne Rohrnetzbezirke eingespeiste Wassermenge und halten diese in Tagesberichten fest. Während diese Werte für betriebliche, planerische und statistische Zwecke wertvoll sind, sind sie für die Feststellung der Wasserverluste nicht geeignet. Da die täglichen Einspeisemengen infolge des dynamischen Verbrauchsverhaltens, des Einflusses der Witterung und anderer Faktoren sehr variabel sind, lassen sich mit diesem Verfahren allenfalls größere Schäden entdecken und quantifizieren (Laske, 1978).

Nachtmindestverbrauchsmessung Ist eine Versorgungszone zu groß, um darin erfolgreich eine Nullverbrauchsmessung durchzuführen, kann stattdessen die Nachtmindestverbrauchsmessung eingesetzt werden. Dafür wird mindestens eine Stunde lang die Einspeisung in den Nachtstunden zwischen 02:00 Uhr und 05:00 Uhr gemessen, wenn die Restverbrauchsmenge der angeschlossenen Kunden minimal ist. Der Nachtmindestverbrauch ist gemäß Heydenreich und Hoch (2008) definiert als „durchschnittliche Verbrauchsmenge inklusive eventueller Tropf- und Schleichverluste ohne Leckstellenanteile“. Die gemessene minimale Einspeisemenge Q_{NMV} [m^3/h] gliedert sich gemäß DVGW (2003a) in die Restverbrauchsmenge Q_{RV} [m^3/h] und die Wasserverlustmenge $Q_{VR.NMV}$ [m^3/h], wie Gleichung 4.4 veranschaulicht.

$$Q_{NMV} = Q_{RV} + Q_{VR.NMV} \quad (4.4)$$

Die Höhe der Restverbrauchsmenge Q_{RV} lässt sich anhand der Einwohnerzahl n_{EW} [–] des Untersuchungsgebiets abschätzen, wie Gleichung 4.5 zeigt.

$$Q_{RV} = \frac{f_{RV} \times n_{EW}}{1000} \quad (4.5)$$

Darin ist f_{RV} [m^3/h] ein Richtwert für die nächtliche Restverbrauchsmenge je 1.000 Einwohner und liegt laut DVGW (2003a) zwischen 0,4 und 0,8 m^3/h . Diese Richtwerte gelten für Untersuchungsgebiete mit 2.000 bis 40.000 Einwohnern. Heydenreich und Hoch (2008) empfehlen für f_{RV} einen deutlich höheren Wert, nämlich 1,2 m^3/h (in Städten bis 50.000 Einwohner). Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch, wie zum Zeitpunkt der minimalen Einspeisung die Komponenten Q_{RV} und $Q_{VR.NMV}$ ermittelt werden können.

Um die tägliche Wasserverlustmenge des Untersuchungsgebiets bestimmen zu können, müssen, wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich, Schwankungen des Versorgungsdrucks berücksichtigt werden. Dazu sind der Druck zum Zeitpunkt des Nachtmindestverbrauchs P_{NMV} [m] und der mittlere Versorgungsdruck P_m [m] am AZP zu bestimmen (s. Abschnitt 2.4.2.5). Weiterhin

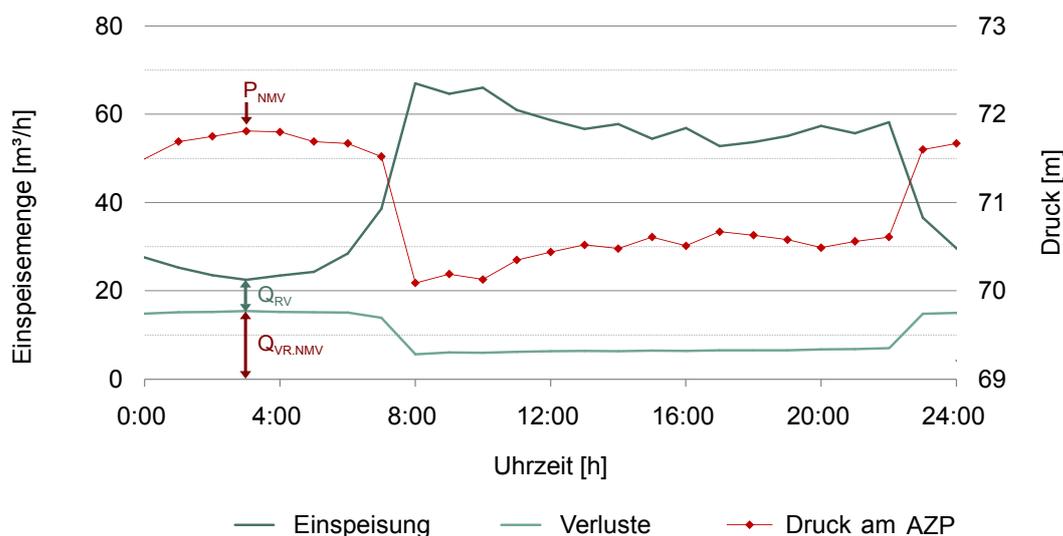


Abbildung 4.2: Beispiel einer Nachtmindestverbrauchsmessung

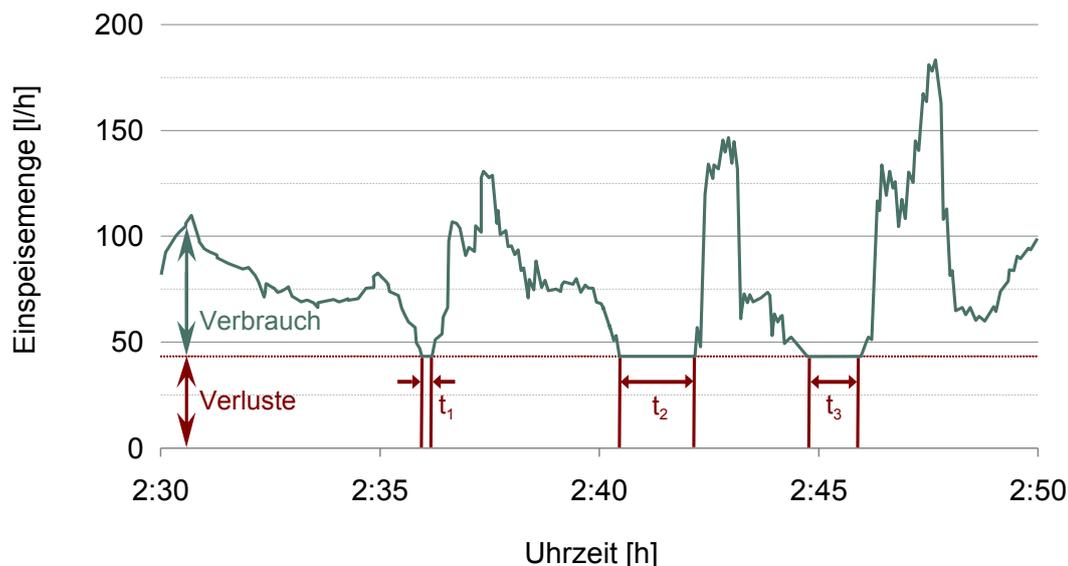
wird der dimensionslose Leakageexponent α (s. Abschnitt 3.3.3.8) des untersuchten Rohrnetzes benötigt. Anschließend kann mit Hilfe von Gleichung 4.6 die tägliche Wasserverlustmenge Q_V in $[m^3/d]$ berechnet werden:

$$Q_V = Q_{VR.NMV} \times \left(\frac{P_m}{P_{NMV}} \right)^\alpha \quad (4.6)$$

Der DVGW (2003a) empfiehlt, die Größe des Untersuchungsgebiets zwischen 4,0 und maximal 30,0 km zu halten. Weil die Restverbrauchsmenge anhand der Einwohnerzahl geschätzt wird, in Realität aber von Zone zu Zone und Nacht zu Nacht unterschiedlich ist, ist auch das Ergebnis der Nachtmindestverbrauchsmessung mit Fehlern und Unsicherheiten behaftet.

Nullverbrauchsmessung Bei der Nullverbrauchsmessung wird davon ausgegangen, dass innerhalb eines Rohrnetzbezirks „ein bestimmter Verlust als Summe aller Einzelverluste ständig vorhanden ist und der Verbrauch sich darauf aufbaut“ (Laske, 1978). Diese Verlustmenge wird Nullverbrauch genannt. Diese Annahme ist nur für einen kurzen Zeitraum gültig, da die Wasserverluste aus Leckagen in Abhängigkeit vom Versorgungsdruck variieren, wie in Abschnitt 3.3.3.8 gezeigt wird. Um diese Verlustmenge in einem Rohrnetzbezirk messen zu können, ist dessen Größe so festzulegen, dass sich der Nullverbrauch in der Zeit des geringsten Wasserverbrauchs (üblicherweise zwischen 02:00 und 05:00 Uhr) mehrmals innerhalb eines kurzen Zeitraums einstellt. Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch, wie bei der Nullverbrauchsmessung die Einspeisemenge in Minutenintervallen gemessen wird und anhand des Nullverbrauchs zum Zeitpunkt t_1 und t_2 in die Komponenten Verbrauch und Verluste aufgespalten werden kann.

Von Nullverbrauch kann nur dann sicher gesprochen werden, wenn die Einspeisemenge tatsächlich mehrmals den exakt gleichen Wert erreicht und diesen über einen Zeitraum t konstant hält. Es ist zudem sicherzustellen, dass während der Messung keine konstanten Wasserentnahmen z.B. durch Betriebe stattfinden, oder diese müssen ebenfalls gemessen werden. Je größer ein Untersuchungsgebiet ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass tatsächlich ein Nullverbrauch auftritt. Daher ist die Nullverbrauchsmethode in der Regel nicht für ganze Versorgungszonen sondern nur für kleinere Untersuchungsgebiete geeignet. Laske (1978) beschreibt

Abbildung 4.3: Beispiel einer Nullverbrauchsmessung²

mehrere Messungen in Teilnetzen bis zu einer Länge von 6,5 km. Im DVGW Arbeitsblatt W 392 werden Netzlängen von 1,0 bis maximal 10,0 km Länge empfohlen (DVGW, 2003a). Berndt u. a. (2001) geben an, dass in Versorgungsbezirken von bis zu 200 Wohneinheiten in gewissen Abständen für kurze Zeit ein „echter“ Nullverbrauch entstehen kann. Tritt stattdessen immer wieder der gleiche Minimalverbrauch ein, so „ist dies die Summe der bekannten Dauerverbraucher oder eine Leckmenge“. Die tägliche Wasserverlustmenge kann analog zur Nachtmindestverbrauchsmessung anhand von Gleichung 4.6 berechnet werden.

Das „Absperrventil-Verfahren“ Dieses Verfahren (engl. *stop tap method*) ist die aufwendigste Methode, um die Höhe der Wasserverluste in einem Untersuchungsgebiet mittels Messungen zu quantifizieren. Farley (2001) beschreibt das Verfahren folgendermaßen: Zunächst wird das Untersuchungsgebiet durch das Schließen von Zonentrennschiebern temporär isoliert. Anschließend werden alle Absperrventile der Anschlussleitungen zu den Verbrauchern geschlossen. Über eine Messeinrichtung wird Wasser aus einem speziellen Tankfahrzeug mit Kreiselpumpe (Druckeinspeisemethode, vgl. Heydenreich und Hoch (2008)) oder aus einer benachbarten Zone (Schlauchleitung von Entnahme- zu Einspeisehydrant) eingespeist und gleichzeitig der Einspeisedruck ermittelt. Da kein Verbrauch stattfindet, entspricht die Einspeisemenge den Wasserverlusten. Größere Leckagen werden noch während des Tests mittels akustischer Ortungsverfahren lokalisiert.

Das „Absperrventil-Verfahren“ ist nur für relativ kurze Rohrabschnitte (< 1 km bzw. weniger als 100 Hausanschlüsse) geeignet und hat den Nachteil, dass die Einwohner während der Überprüfung von der Versorgung abgeschnitten sind. Sein Vorteil ist, dass es auch in intermittierend betriebenen Wasserversorgungssystemen eingesetzt werden kann, da die isolierten Rohrabschnitte über spezielle Tankfahrzeuge relativ schnell gefüllt und unter Druck gesetzt werden können (Farley, 2001). Außerdem werden die störenden Einflüsse der Befüllung privater Dachtanks unterbunden, die in Entwicklungs- und Schwellenländern häufig anzutreffen sind. Es werden sehr genaue Kenntnisse über die spezifische Wasserverlustrate bei einem

²Quelle: nach (Laske, 1978)

bestimmten Druck an spezifischen Leitungsabschnitten gewonnen, die in Abhängigkeit von Material, Alter oder Durchmesser ausgewertet und auf das Gesamtnetz übertragen werden können.

Kontinuierliche Überwachung der Rohrnetzeinspeisung Die kontinuierliche Überwachung der Rohrnetzeinspeisung ist nach Ansicht von DVGW, ÖVGW und IWA die beste Methode, um das Wasserverlustniveau in einer Zone zu überwachen. Das Auftreten neuer Schäden kann aufgrund des veränderten minimalen Durchflusses in den Nachtstunden frühzeitig erkannt und so die Reaktionszeit bis zur Schadensbehebung minimiert werden.

Die eingesetzten Messgeräte sollten mit Fernwirktechnik ausgestattet werden, um die Messwerte von der Leitstelle aus überwachen zu können. Die kontinuierliche Zuflussmessung verwendet im Prinzip die Methode der Nachtmindestverbrauchsmessung: Steigt der Nachtmindestverbrauch über einen bestimmten Grenzwert, wird ein Alarm ausgelöst und die Entwicklung der Rohrnetzeinspeisung in kurzen Intervallen überprüft, um festzustellen, ob es sich um ein Einzelereignis oder eine Leckage handelt. Geht der Nachtmindestverbrauch nicht mehr unter den Alarmwert zurück, wird in der betroffenen Zone eine Inspektion durchgeführt, um die Leckstelle zu orten und zu beheben. Die kontinuierliche Überwachung wird in der Regel nicht dazu benutzt, Wasserverlustmengen zu bestimmen. Allerdings bieten die ermittelten Messwerte gute Möglichkeiten, um Erkenntnisse über die Leckrate und die absolute Wasserverlustmenge bestimmter Schadensereignisse zu gewinnen.

Volumetrischer Test (für Hochbehälter) Wasserverluste, die durch Undichtheiten an Speicherbehältern entstehen, können sehr einfach über einen volumetrischen Test quantifiziert werden. Dazu wird zunächst die zu untersuchende Behälterkammer vollständig gefüllt und anschließend werden die Absperrarmaturen auf den Zulauf- und Entnahmeleitungen geschlossen. Die Dichtheit der Armaturen sollte mittels Abhören überprüft werden. Anschließend wird der Behälterfüllstand über einen längeren Zeitraum, idealerweise über 24 Stunden hinweg gemessen. Sinkt der Wasserspiegel ab, erhält man die Leckrate über die Multiplikation der Wasserspiegeldifferenz in einem bekannten Zeitraum mit der Grundfläche der Behälterkammer (Thornton u. a., 2008).

Streubreitenverfahren Das Streubreitenverfahren wurde von Hoch (1987) entwickelt, das WVU dabei unterstützen sollte, unentdeckte Leckagen früh zu erkennen. Das Streubreitenverfahren basiert auf der Annahme, dass mit einer steigenden Anzahl von Abnehmern und steigendem Verbrauch in einer Zone auch die Streubreite bzw. Standardabweichung der Zuflussmesswerte um den zugehörigen Mittelwert zunimmt. Laut Hoch (1987) kann aus dem Verhältnis der mittleren Zuflüsse über den Zeitraum einer Minute zu der dazugehörigen Streubreite (doppelte Standardabweichung) unmittelbar der Verluststrom bestimmt werden. Es konnte nicht in Erfahrung gebracht werden, ob dieses Verfahren derzeit in WVU zur Ermittlung der Wasserverluste eingesetzt wird.

4.3.4 Werkzeuge zur Wasserbilanzerstellung

In diesem Abschnitt soll eine Reihe bestehender Werkzeuge zur Erstellung von Wasserbilanzen aus dem deutschsprachigen sowie dem angelsächsischen Raum vorgestellt werden (in alphabetischer Reihenfolge) und deren jeweilige Vor- und Nachteile miteinander verglichen werden.

Aquadas Das Unternehmen *Aquadas consulting & software* mit Sitz in Österreich entwickelt Software-Werkzeuge für das Qualitätsmanagement und die Anlagenüberwachung im Bereich der Trinkwasser- und Energieversorgung. Die modular aufgebaute Software *Aquadas* dient der Verwaltung und Dokumentation von Wartungsarbeiten und Überwachungstätigkeiten an Wasserversorgungssystemen und zur Erstellung des elektronischen Betriebs- und Wartungshandbuchs entsprechend der österreichischen Richtlinien. Laut der Funktionsbeschreibung der Software kann das Modul *Wasserbilanz* für definierte Bereiche Verlustmengen berechnen und ermöglicht es, „individuelle Wasserversorgungsgebiete zu definieren und dadurch Wasserverbrauch und Wasserverlust zu ermitteln“. Das Modul *Wasserzähler* dient der Verwaltung der Wasserzähler. Spezifische Zählerdaten wie „Zählernummer, Einbauort, Typ oder Nenngröße sowie Kenndaten wie Eichung, Ein- bzw. Ausbau, Zählerstände und Verbrauchsmengen“ können archiviert werden. Über verschiedene Schnittstellen kann die Kommunikation mit einem GIS, einem Abrechnungssystem oder einem Leitsystem erfolgen.

AqualibreTM *Bristol Water Services Austria GmbH* entwickelte die kommerzielle, in der Programmiersprache Delphi geschriebene Wasserbilanz-Software *AqualibreTM*. Laut Liemberger und McKenzie (2003) unterscheidet sich die Software von anderen Programmen dadurch, dass neben der standardisierten IWA-Wasserbilanz auch eine Komponentenanalyse in Anlehnung an das *BABE*-Verfahren (s. Abschnitt 4.3.2) durchgeführt werden kann. Aus der Differenz zwischen gesamten realen Wasserverlusten und dem Ergebnis der Komponentenanalyse kann die Menge an exzessiven Verlusten ermittelt werden, die potenziell eingespart werden können. Außerdem kann die Messgenauigkeit der Eingangsdaten bei der Eingabe bewertet werden, um damit Vertrauensbereiche für die Ergebnisse zu ermitteln.

AquaLite Bei *AquaLite* handelt es sich laut Tsitsifli und Kanakoudis (2010) um eine Weiterentwicklung von *Benchleak* und *AqualibreTM*, die im Jahr 2007 von der *South African Water Research Commission* (WRC) vorgestellt wurde. Dabei handelt es sich um ein Programm, das aus elf Bedienungsmenüs besteht, in die der Anwender die Eingangsdaten zum Versorgungssystem, zur Wasserbilanz und zum Wassertarif eingibt. Eine wichtige Neuerung gegenüber *Benchleak* ist die Möglichkeit, Vertrauensbereiche für die wichtigsten Parameter anzugeben. Weiterhin kann die Höhe von Zählerabweichungen und Datenhandhabungsfehlern beziffert werden. Als Ergebnisse erhält der Anwender neben der Wasserbilanz verschiedene Kennzahlen und eine Abschätzung der Höhe der unvermeidbaren Wasserverluste auf Zubringer-, Haupt- und Anschlussleitungen (McKenzie, 2007).

AWWA Free Water Audit Software Die AWWA stellt seit 2010 auf ihrer Webseite ein auf Microsoft Excel basierendes Programm zur Wasserbilanzerstellung kostenfrei zur Verfügung. Auf einem Tabellenblatt werden die verschiedenen bekannten Komponenten der Wasserbilanz (als Zahlenwerte oder prozentuale Anteile) sowie Angaben zum Versorgungssystem und den Betriebskosten gemacht, um die Wasserbilanz und mehrere Kennzahlen zu berechnen. Der Anwender kann die Belastbarkeit der Eingangsdaten anhand einer Skala von 1 bis 10 bewerten, um beispielsweise den Zustand des Zählerparks oder das Ausmaß illegaler Entnahmen zu spezifizieren. Anhand dieser Bewertung wird die Aussagekraft der Ergebnisse bewertet. Auf Basis der Ergebnisse werden Maßnahmen zur Verbesserung der Defizite vorgeschlagen.

Benchleak Die Software *Benchleak* wurde 2001 von der *WRC* veröffentlicht, um Südafrikanische WVU bei der Verwendung einer einheitlichen Terminologie und einer standardisierten

Vorgehensweise zur Wasserbilanzerstellung zu unterstützen (McKenzie u. a., 2002). Die Software wird auf der Webseite der WRC kostenfrei zur Verfügung gestellt. Mit *Benchleak* können die Wasserbilanz gemäß IWA-Standard sowie mehrere Kennzahlen berechnet werden. Auch hierbei handelt es sich um eine Excel-Arbeitsmappe, in die der Anwender manuell die verfügbaren Informationen zu den Komponenten der Wasserbilanz und dem Versorgungssystem eingibt und als Ergebnis die realen Verluste und einige Kennzahlen (NRW, Infrastructure Leakage Index (ILI), Anteil an den Betriebskosten) erhält.

CheckCalcs Bei der von Allan Lambert (ILMSS Ltd) entwickelten Software *CheckCalcs* handelt es sich um ein kostenloses Modul innerhalb des Excel-basierten, kommerziellen *LEAKS Suite* Programmpakets. *CheckCalcs* dient der Erstellung der Wasserbilanz gemäß der standardisierten Vorgehensweise der IWA und zur weiteren Bewertung der Wasserverluste anhand verschiedener Kennzahlen (Fantozzi u. a., 2006). Dazu gibt der Anwender manuell Informationen zu Versorgungsdruck, Versorgungsdauer (für intermittierend betriebene Systeme), Rohrnetzlänge und Anschlussleitungen ein. Anschließend werden die bekannten Informationen zu Rohrnetzeinspeisung und gemessener Rohrnetzabgabe eingegeben und die Höhe der ungemessenen Abgabe sowie des Wasserdiebstahls und der Zählerabweichungen mittels Prozentwerten abgeschätzt. Darauf basierend errechnet die Software die Höhe der scheinbaren und realen Wasserverluste, die unvermeidbaren jährlichen Wasserverluste UARL (s. Abschnitt 4.5.3.4), den ILI (s. Abschnitt 4.5.3.5) und ordnet den Zustand des Versorgungssystems einer von vier Klassen gemäß der Vorgaben des *World Bank Institute* (WBI) zu (Fantozzi u. a., 2006). Daraus leiten sich verschiedene Empfehlungen für Gegenmaßnahmen ab. Weiterhin wird anhand der Angabe zum mittleren Versorgungsdruck eine grobe Abschätzung des Potenzials von Druckmanagement zur Wasserverlustreduzierung gegeben.

NAIS[©] Wasserverlustberechnung Das Beratungsunternehmen *CONKRET GmbH & Co. KG* aus Duisburg bietet das System *NAIS[©] Wasserverlustberechnung* als kostenpflichtigen Download von der Webseite des Unternehmens an. Dabei handelt es sich laut Heydenreich und Kreft (2004) um ein Werkzeug zur Wasserverlustberechnung und -bewertung. Über die Benutzeroberfläche kann der Anwender die Rohrnetzeinspeisung, die Abrechnungsmenge, die Eigenverbräuche, die Rohrnetzlänge exklusive der Anschlussleitungen und einen Prozentwert für scheinbare Verluste angeben. Die Software berechnet damit die realen Wasserverluste, die Wasserverlustrate und die spezifischen realen Wasserverluste.

NRCC Water Balance System Halfawy und Hunaidi (2008) vom *Institute for Research in Construction* des *National Research Council of Canada* (NRCC) stellen ein Werkzeug zur Wasserbilanz-Erstellung vor, das als Teil eines GIS-basierten Anlagenverwaltungssystems beim kommunalen Wasserversorger der Stadt Regina (Kanada) implementiert wurde. Das Werkzeug kann als Erweiterung in die GIS-Software *ESRI ArcGIS* eingebunden werden. Durch die Anbindung des GIS an das SCADA System und die AMR-Datenbank (Zählerfernablesungen) konnte die Effizienz der Datenverarbeitungsprozesse deutlich gesteigert werden. Mit dem hydraulischen Modell des Versorgungssystems können berechnete Drücke direkt in die Berechnung von Kennzahlen einfließen. Weitere Funktionen sind die Untersuchung der Zählerablesungen auf Anomalien (Datenhandhabungsfehler, s. Abschnitt 3.4.5) und der Vergleich der Ergebnisse mit Informationen der Schadensdatenbank. Die Vertrauensbereiche der ermittelten Ergebnisse und ausgewählte IWA-Kennzahlen (UARL, CARL, ILI; s. Abschnitt 4.5) werden berechnet. Halfawy und Hunaidi (2008) geben an, dass die Stadt Regina

nicht in Versorgungszonen unterteilt ist und daher keine zonenweise Wasserbilanz getestet wurde.

WB-EasyCalc Das in Klagenfurt ansässige Beratungsunternehmen *Liemberger & Partners GmbH* bietet auf seiner Webseite die Software *WB-EasyCalc* zur Berechnung von Wasserbilanzen und Wasserverlustkennzahlen gratis zum Download an. Dabei handelt es sich um eine auf Microsoft Excel basierende Arbeitsmappe mit mehreren Tabellenblättern für die Datenein- und -ausgabe. Die Berechnung der Wasserverluste erfolgt gemäß der IWA-Wasserbilanz. Für die Komponenten Rohrnetzeinspeisung, in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe, nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe, Wasserdiebstahl und Zählerabweichungen können detaillierte Angaben in separaten Tabellenblättern gemacht werden. Der Anwender hat die Möglichkeit, jede Angabe mit einem Fehlerbereich zu versehen, um die Genauigkeit der Eingangsdaten zu beschreiben. Weiterhin werden Charakteristika des Rohrnetzes (Leitungslängen, Anschlussleitungen, Druck, intermittierende Versorgung) und Angaben zu Gestehungskosten und Wassertarifen abgefragt. Als Ergebnisse werden die Wasserbilanz sowie zahlreiche physikalische (spezifische reale Verluste, ILI), kommerzielle (Anteil der kommerziellen Verluste an der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe) und finanzielle (NRW vs. Betriebskosten) Kennzahlen ausgegeben und mit Hilfe von Diagrammen visualisiert.

Weitere Produkte Neben den oben beschriebenen Softwareprodukten gibt es noch eine ganze Reihe ähnlicher, oft landesspezifischer Lösungen: Speziell angepasst auf griechische Bedürfnisse entwickelten Tsitsifli und Kanakoudis (2010) die Software *WB/PI Calc-UTH*. Vom *Instituto Tecnológico del Agua* (ITA) der Polytechnischen Universität Valencia wurde die Software *SigmaLite* hervorgebracht. Die oben beschriebene *Benchleak*-Arbeitsmappe wurde laut Halfawy und Hunaidi (2008) in Australien (*Benchloss*) und Neuseeland (*BenchlossNZ*) übernommen, angepasst und erweitert. Eine weitere, Excel-basierte Variante ist *FASTCALC*, eine kommerzielle Software der Wide Bay Water Corporation (Australien). Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über die beschriebenen Werkzeuge und ihre Funktionen.

Tabelle 4.4: Vergleich von Software-Produkten zur Wasserbilanzerstellung

| Funktion | Aquadas | Aqualibre TM | AquaLite | AWWA WA | Benchleak | CheckCalcs | FASTCALC | NAIS© | NRCC WBS | WB-EasyCalc |
|---------------------------------|---------|-------------------------|----------|----------------|-----------|------------|----------|-------|----------|-------------|
| Excel-basiert | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ |
| Anbindung an GIS / ext. Systeme | ✓ | | | | | | | | ✓ | |
| Autom. Datenübernahme | ✓ | | | | | | | | ✓ | |
| Angabe v. Vertrauensbereich | | ✓ | ✓ | ✓ ^a | | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Wasserbilanz n. DVGW | | | | | | | | ✓ | | |
| Komponentenanalyse | | ✓ | | | | | | | | |
| Berechnung v. Kennzahlen | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Empfehlung v. Maßnahmen | | | | ✓ | | | | | | |
| Ergebnis-Visualisierung | | | | | | | | | ✓ | ✓ |

(a) AWWA Water Audit besitzt ein eigenes System zur Bewertung der Datenzuverlässigkeit

Zusammenfassung Fast alle der beschriebenen Softwareprodukte sind einfach zu bedienende Werkzeuge, die dem Anwender helfen, die Wasserbilanz nach den Vorgaben von IWA, AWWA oder DVGW schnell und effizient zu erstellen. Seago u. a. (2005) merken an, dass die meisten der angebotenen Programme die selben grundlegenden Funktionen zur Ermittlung der Wasserbilanz bieten und sich vorwiegend durch die Aufmachung und einige sekundäre Funktionen unterscheiden. Im Unterschied zum Großteil der beschriebenen Produkte besitzen *Aquadas* und das *NRCC Water Balance System* eine Integration an GIS und andere Software-Systeme, die die automatisierte Erhebung von Eingangsdaten ermöglicht.

4.4 An der Wassermengenanalyse beteiligte Organisationseinheiten

4.4.1 Überblick

Um eine vollständige Wasserbilanz zu erstellen und darauf aufbauend weitere Analysen durchzuführen, müssen häufig Informationen aus mehreren Organisationseinheiten eines Wasserversorgungsunternehmens zusammengeführt werden. Im den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Organisationseinheiten und externen Quellen und die zugehörigen Eingangsdaten beschrieben.

4.4.2 Technische Abteilungen eines WVU

Wassergewinnung Zentrale Aufgabe der Abteilung Wassergewinnung ist der Betrieb und die Instandhaltung der Wasserwerke, die aus Wassergewinnungs- und Wasseraufbereitungsanlagen bestehen. Weitere Aufgaben sind die Überprüfung der Roh- und Trinkwasserqualität, der Schutz der natürlichen Wasserressourcen sowie die Handhabung von Wasserentnahmerechten und Fremdbezug. Relevante Daten sind die Rohwassermenge, der Wasserverbrauch bei der Aufbereitung (etwa zur Filtrerrückspülung), die produzierte Trinkwassermenge sowie die Wassermenge aus Fremdbezug.

Netzbetrieb Die Abteilung Netzbetrieb ist zuständig für die Sicherung eines wirtschaftlichen und störungsfreien Betriebs der Wasserversorgungsnetze. Basierend auf der Kenntnis des Anlagenbestands sowie dessen Zustand sind Konzepte zu Betrieb, Wartung und Instandhaltung zu entwickeln und durchzuführen. Durch regelmäßige Inspektionen sollen der Ausfall von Anlagenteilen vorgebeugt und die Wasserverluste so gering wie möglich gehalten werden. Relevante Daten sind der Wasserverbrauch für Leitungsspülungen und Behälterreinigung, Wasserverluste durch Undichtigkeiten und Überlauf an Hochbehältern, Zählerstände manuell abgelesener Betriebswasserzähler sowie der Wasserverbrauch für Arbeiten im Rohrnetz, etwa für Schadensreparaturen oder sonstige Baumaßnahmen.

Leitstelle Die Bedienung und Überwachung großräumiger Wasserversorgungssysteme erfolgt üblicherweise in der zentralen Leitstelle des WVU. Prozessleitsysteme geben jederzeit einen Überblick über den aktuellen Betriebszustand der Anlagen und ermöglichen die Steuerung von Maschinen und Anlagenteilen mittels Fernwirktechnik (Weiß, 2011). Messwerte, Betriebsmeldungen, Warn- oder Störmeldungen sowie Steuerbefehle werden verarbeitet und anschließend auf einem Datenbankserver archiviert, so dass sie für die Wasserverlustanalyse herangezogen werden können. Relevante Daten sind Messwerte (Durchflussmengen) und

Zählwerte (Zählerstände) von Betriebswasserzählern, Meldungen (etwa Betriebszustände von Pumpen und Armaturen) sowie mittels Zuflussüberwachung erkannte Leckagen.

Auftragszentrum Im Auftragszentrum werden Aufträge angelegt, koordiniert und dokumentiert, die im Rahmen der Instandhaltung durchgeführt werden. Dabei handelt es sich einerseits um „ungeplante Aufträge wie Störmeldungen, die sofort durchgeführt werden, und geplante Maßnahmen, die vorzeitig ins System eingestellt werden, um diese zum nächsten bestmöglichen Termin durchzuführen“ (Eichner, 2003). Die gesammelten Daten dienen dem nachträglichen Bewerten durchgeführter Maßnahmen im Rahmen des technischen und kaufmännischen Controllings. Relevante Daten sind Störmeldungen und Reparaturmeldungen zur Analyse der Laufzeit von Leckagen, zeitliche Statusmeldungen (Produktivzeit) bei Spülungen zur Bestimmung der Spülmengen sowie die Schadensstatistik mit detaillierten Angaben zu Schadensart und -ursache.

Netzdokumentation Die Abteilung Netzdokumentation ist verantwortlich für die kontinuierliche Erfassung, Pflege und Aktualisierung des Anlagenbestandes mithilfe von geografischen Informationssystemen. Neben der Führung des digitalen Leitungskatasters gehören dazu die Verwaltung von Bauzeichnungen, Bestandsplänen, Genehmigungen, Betriebsanleitungen, Schadensdaten etc. und deren Bereitstellung im Rahmen der Planauskunft für Tiefbaumaßnahmen und Störungsbehebung sowie als Planungsgrundlage für das technische Büro oder Ingenieurbüros. Relevante Daten sind Lage- und Sachinformationen aller Komponenten des Wasserversorgungssystems, die Zuordnung der einzelnen Komponenten zu Versorgungszonen, die räumliche Zuordnung der Verbraucher sowie die Zuordnung von Schadensdaten zu Rohrleitungen.

Mess- und Zählerwesen Die Abteilung Mess- und Zählerwesen ist für die Beschaffung, Verwaltung, Montage und Instandhaltung von Kunden- und Betriebswasserzählern verantwortlich. Weiterhin obliegt ihr die Zählerablesung, die Durchführung von Zählerwechseln sowie die Überwachung der Einhaltung der Eichfristen bei Kundenzählern. Relevante Daten sind Zählerablesungen sowie Informationen zum Zählerpark des WVU.

Sonstige technische Abteilungen Als weitere Abteilung mit Einfluss auf die Wassermengenanalyse ist beispielsweise das Technische Büro zu nennen. Hier werden in der Regel das hydraulische Modell und die Software zur Rehabilitationsplanung betreut, die beide mit Informationen zur Wassermengenanalyse beitragen können (s. Abschnitt 5.4).

4.4.3 Kaufmännische Abteilungen eines WVU

Kundenabrechnung Das Abrechnungssystem gehört heute zur Standardausstattung eines Wasserversorgungsunternehmens. Darin werden Kundenkonten und die Ablesedaten der Kundenwasserzähler abgelegt, auf deren Basis das WVU die Verbrauchswerte kalkuliert und den Kunden in Rechnung stellt. Abrechnungssysteme sind primär auf finanzielle Zwecke ausgelegt (dem Ausstellen von Rechnungen und der Erfassung der Geldeingänge), sie liefern aber zentrale Informationen für die Erstellung der Wasserbilanz (AWWA, 2009). Relevante Daten sind Kundenadressen, Ablesungen der Zählerstände der Kundenwasserzähler, die Höhe der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe sowie die Hebeeffizienz der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe.

Finanz- und Betriebsbuchhaltung Für die Analyse der ökonomischen Auswirkungen der Wasserverluste für ein WVU werden Informationen der Finanz- und Betriebsbuchhaltung benötigt. Relevante Daten sind die Gestehungskosten für Trinkwasser aus Eigengewinnung, die Kosten für Wasser aus Fremdbezug sowie die Kosten für Personal- und Materialaufwand für den Betrieb der Wasserversorgungssysteme und die Bekämpfung der Wasserverluste.

4.4.4 Externe Daten

Für die Erstellung einer vollständigen Wasserbilanz und für die Analyse möglicher Ursachen der Wasserverluste ist das WVU in der Regel auf die Erhebung externer Daten angewiesen, wie die folgenden Beispiele zeigen:

- Feuerwehr: Angaben zu Datum, Ort und Menge von Löschwasserentnahmen für Brandbekämpfung und Übungszwecke
- Stadtverwaltung: Verkehrsdaten zur Beurteilung des Einflusses des Straßenverkehrs auf Leitungsschäden
- Weitere Ämter: Informationen zu Bodenbeschaffenheit und Grundwasser als Einflussfaktoren für Leitungsschäden

4.5 Kennzahlen zur Bewertung von Wasserverlusten

4.5.1 Kennzahlen in der Wasserversorgung

Im März 2003 hat der Deutsche Bundestag den Beschluss *Nachhaltige Wasserwirtschaft in Deutschland* verabschiedet, dessen Ziel die Modernisierung der Ver- und Entsorgungswirtschaft ist. Ein zentrales Instrument soll dabei der Leistungsvergleich zwischen Versorgungsunternehmen anhand von Kennzahlen im Rahmen von Benchmarkings sein (vgl. Abschnitt 3.6.1). Der DVGW (2008) definiert eine Kennzahl als „Verhältniszahl aus Kenngrößen, [...] in der die Beziehung zwischen Aufwand und Ergebnis hergestellt wird“ und ergänzt: „Kennzahlen sollen so gewählt werden, dass sie in Bezug auf das Erkenntnisziel eine relevante Aussage ergeben.“ Kennzahlen werden in WVU mit verschiedenen Zielrichtungen eingesetzt (Hirner und Merkel, 2005):

- Interne Leistungsbeurteilung und -verfolgung
- Festlegung und Verfolgung von Unternehmenszielen
- Positionsbestimmung durch externe Unternehmensvergleiche
- Strategisches Controlling und Qualitätsmanagement
- Transparente Leistungsdokumentation für die Öffentlichkeit

Bis zum Ende des vergangenen Jahrhunderts gab es im Bereich der Wasserversorgung keinen einheitlichen Katalog von Kennzahlen. Dies änderte sich mit dem IWA-Handbuch *Performance Indicators for Water Supply Services* von Alegre u. a. (2000), dessen erste Auflage im Jahr 2000 veröffentlicht wurde. Darin findet sich ein Katalog von etwa 350 Kennzahlen mit eindeutigen Berechnungsvorschriften und klar definierten Datenvariablen. Die erweiterte und den spezifischen Anforderungen der deutschen Wasserwirtschaft angepasste deutsche Fassung des IWA-Kennzahlensystems wurde von Hirner und Merkel (2005) nach einem internationalen Feldtest mit deutscher Beteiligung veröffentlicht. Für die Berechnung der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Kennzahlen zur finanziellen, technischen und ökologischen Bewertung der Wasserverluste werden Datenvariablen gemäß der deutschen Fassung des

IWA-Kennzahlensystems verwendet, sofern verfügbar. Die von DVGW (2008) definierten fünf Leistungsmerkmale der Wasserversorgung (Versorgungssicherheit, Qualität, Kundenservice, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit) werden darin mit insgesamt 55 Kennzahlen bewertet. Zusätzlich helfen 19 Kontextinformationen dazu, die Kennzahlen zu interpretieren und die Vergleichbarkeit verschiedener WVU zu überprüfen. Kennzahlen und Kontextinformationen werden auf Basis von insgesamt 290 Datenvariablen ermittelt. Dabei handelt es sich um mess- oder zählbare Größen, die durch das WVU erhoben und bereitgestellt werden. Eine detaillierte Beschreibung des IWA-Kennzahlensystems und der einzelnen Datenvariablen findet sich bei Hirner und Merkel (2005).

4.5.2 Finanzielle Kennzahlen

4.5.2.1 Betriebswirtschaftliche Datenvariablen

Um finanzielle Kennzahlen ermitteln zu können, werden häufig Angaben zu betrieblichen und personellen Aufwendungen des WVU benötigt. Abbildung 4.4 zeigt eine Aufstellung der typischen Aufwendungen eines Wasserversorgungsunternehmens, die in den Finanzkennzahlen Eingang finden (s. Abschnitt 4.5.2).

| | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|---|--|
| Gesamt- aufwand (G4) | Betriebs- aufwand (G5) | Betriebliche Aufwendungen (G7) | Material und Verbrauchsgüter (G12) Fremdleistungen (G9) Fremdbezug von Wasser (G10) Energie (G11) Wasserentnahmegebühr (G63) Konzessionsabgaben (G64) |
| | | Personalaufwand | Personalaufwand inkl. aller Nebenaufwendungen, Sozialleistungen etc. (G8) |
| | | Sonstige betriebliche Aufwendungen (G16) | Sonstige Steuern, Abgaben, Gebühren (G14) Mieten, Pachten, Versicherungen etc. (G65) Ausgleichszahlungen (G66) Investitionszuschüsse (G67) |
| | Kapital- aufwand (G16) | Abschreibungen (G28) | |
| | | Zinsaufwendungen (G29) | |
| | Außerordentliche Aufwendungen (G15) | | |

Abbildung 4.4: Gesamtaufwand und Einzelaufwendungen von WVU³

Die in Tabelle 4.5 aufgelisteten Datenvariablen sind ebenfalls dem IWA-Kennzahlensystem entnommen und werden für die Berechnung der betrieblichen und ökologischen Kennzahlen verwendet.

Tabelle 4.5: Verwendete Datenvariablen des IWA-Kennzahlensystems

| Eingangsparameter | Einheit | ID |
|---|------------------|-----|
| Umsatzerlöse aus Wasserverkauf für Direktversorgung | € | G36 |
| Durchschnittlicher Wasserpreis für Direktversorgung | €/m ³ | G57 |
| Kosten für Wasserverluste ⁴ | €/m ³ | G58 |

Quelle: nach Hirner und Merkel (2005)

4.5.2.2 Nicht genutzte Wasserressourcen

Es entspricht der langjährigen Praxis vieler Wasserversorgungsunternehmen, die realen Wasserverluste Q_{VR} in Prozent der Rohrnetzeinspeisung Q_N anzugeben, wie in Gleichung 4.7 dargestellt. Diese Kennzahl wird als *Nicht genutzte Wasserressourcen* bezeichnet und trägt im IWA-Kennzahlensystem die Bezeichnung *WR1* (Hirner und Merkel, 2005)⁵. In Abhängigkeit davon, ob Rohwasser- und Zubringersysteme in die Bilanz einbezogen werden oder nicht, ergeben sich zwei Berechnungsmöglichkeiten für *WR1*. Mit Rohwasser- und Zubringersystemen:

$$WR1 = \frac{Q_{VR} + Q_{BV}}{Q_S} \times 100 \quad (4.7)$$

Ohne Rohwasser- und Zubringersysteme:

$$WR1 = \frac{Q_{VR}}{Q_N} \times 100 \quad (4.8)$$

Darin sind Q_S [m^3/a] die Systemeinspeisung, Q_N [m^3/a] die Rohrnetzeinspeisung und Q_{BV} [m^3/a] die Betriebsverluste bei der Wasserproduktion. Die *Nicht genutzten Wasserressourcen* in [%] sind für die Beurteilung der Verluste aus technischen Gesichtspunkten ungeeignet, da bei steigenden Einspeisemengen ihr Wert sinkt, ohne dass die realen Verluste verringert wurden (vgl. hierzu auch DVGW (2003a) und Tennhardt (2012)). Der DVGW (2003a) kritisiert weiterhin, dass diese Kennzahl für WVU mit hoher spezifischer Rohrnetzeinspeisung (vgl. Gleichung 2.1) immer günstiger ausfällt als für kleine WVU mit niedriger spezifischer Rohrnetzeinspeisung. Laut Tennhardt (2012) wird *WR1* zudem oft fälschlich mit den gesamten Wasserverlusten Q_V gebildet, so dass die Gefahr von Missverständnissen besteht. Kölbl (2008) empfiehlt, die *WR1* nur als ersten Richtwert bzw. als kaufmännische Kennzahl anzuwenden.

4.5.2.3 Kaufmännische Wasserverluste

Die Kaufmännischen Wasserverluste (NRW) in [%] stellen die international gebräuchlichste finanzielle Kennzahl dar. Dazu wird die nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe Q_{NR} ins Verhältnis zur Rohrnetzeinspeisung Q_N im Betrachtungszeitraum gesetzt, wie Gleichung 4.9 zeigt. Die Kennzahl NRW trägt im IWA-Kennzahlensystem die Bezeichnung *Fi46*.

⁴G58 ist der höhere Wert der variablen Kosten für Fremdbezug oder der langfristigen Basiskosten eigener Rohwassergewinnung und -aufbereitung (Hirner und Merkel, 2005)

⁴nach: Overath und Merkel (2004)

⁵In Österreich wird für diese Kennzahl der Begriff *Wasserverlustrate* verwendet (Kölbl, 2008).

$$Fi46 = NRW = \frac{Q_{NR}}{Q_N} \times 100 \quad (4.9)$$

Liemberger u. a. (2007) weisen darauf hin, dass die an Weiterverteiler exportierten Wassermengen unbedingt von Q_N abgezogen werden müssen, um ein korrektes Ergebnis für die Kaufmännischen Wasserverluste zu erhalten. Die *IWA Water Loss Task Force* empfiehlt, NRW analog zu *WR1* nicht als betriebliche Kennzahl zu verwenden, weil er zum Einen stark von schwankenden Rohrnetzeinspeisungen und -abgaben beeinflusst wird und zum Anderen die Betriebskosten und die Struktur des Wasserversorgungsnetzes nicht berücksichtigt werden (Liemberger u. a., 2007).

4.5.2.4 Kaufmännische Wasserverluste in Relation zum Betriebsaufwand

Höhere Aussagekraft wird erreicht, indem die Kaufmännischen Wasserverluste als Prozentsatz des Betriebsaufwands $G5$ (s. Abbildung 4.4) des untersuchten Wasserversorgungssystems ausgedrückt werden. Die IWA empfiehlt, hierbei den drei Komponenten der nicht in Rechnung gestellten Wasserabgabe Q_{NR} unterschiedliche monetäre Bewertungen zuzuordnen (Alegre u. a., 2007): Die scheinbaren Verluste Q_{VS} und die nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe Q_{AN} werden mit dem durchschnittlichen Wasserpreis für Direktversorgung $G57$ bewertet. Die realen Wasserverluste Q_{VR} hingegen werden mit den Kosten für Wasserverluste $G58$ bewertet (s. Tabelle 4.5), wie Gleichung 4.10 zeigt. Diese Kennzahl trägt im IWA-Kennzahlensystem die Bezeichnung *Fi47*.

$$Fi47 = \frac{(Q_{AN} + Q_{VS}) \times G57 + Q_{VR} \times G58}{G5} \times 100 \quad (4.10)$$

Der durchschnittliche Wasserpreis für Direktversorgung $G57$ wird gemäß Gleichung 4.11 ermittelt

$$G57 = \frac{G36}{Q_{AI}} \quad (4.11)$$

Darin sind $G36$ die Umsatzerlöse aus Wasserverkauf für Direktversorgung in [€] und Q_{AI} die in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe in [m^3].

4.5.2.5 Jährliche Kosten der realen und scheinbaren Wasserverluste

Die jährlichen Kosten, die einem WVU durch reale und scheinbare Wasserverluste entstehen, lassen sich mittels Gleichung 4.12 und 4.13 ausdrücken:

$$K_{VR} = Q_{VR} \times G58 \quad (4.12)$$

$$K_{VS} = Q_{VS} \times G57 \quad (4.13)$$

Darin sind K_{VR} die jährlichen Kosten der realen Wasserverluste in [€] und K_{VS} die jährlichen Kosten der scheinbaren Wasserverluste in [€]. Analog zu Gleichung 4.10 werden auch hier für beide Verlustarten unterschiedliche monetäre Bewertungen angesetzt. Die ermittelten jährlichen Kosten der Wasserverluste können den Kosten der Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung gegenübergestellt werden, um Potenzial und Ertragsrate der Maßnahmen abschätzen zu können.

4.5.3 Betriebliche Kennzahlen zur Beschreibung der Wasserverluste

4.5.3.1 Spezifische reale Wasserverluste

Der DVGW empfiehlt als technische Kennzahl die so genannten spezifischen realen Wasserverluste⁶ q_{VR} (DVGW, 2003a). Diese haben gegenüber den nicht genutzten Wasserressourcen $WR1$ den Vorteil, dass über die Rohrnetzlänge die Versorgungsstruktur des untersuchten Wasserversorgungssystems berücksichtigt wird, s. Gleichung 4.14:

$$Op24 = q_{VR} = \frac{Q_{VR}}{8.760 \times L_N} \quad (4.14)$$

Darin sind q_{VR} die spezifischen realen Wasserverluste in $[m^3/km/h]$, Q_{VR} die realen Wasserverluste in $[m^3/a]$ und L_N die Gesamtlänge des Rohrnetzes in $[km]$, exklusive der Anschlussleitungen. Tabelle 4.6 zeigt Richtwerte für die Beurteilung der Wasserverluste anhand der spezifischen realen Wasserverluste q_{VR} und der Versorgungsstruktur (spezifische Rohrnetzeinspeisung q_N , s. Abschnitt 2.4.2.1).

Tabelle 4.6: Richtwerte für spezifische reale Wasserverluste q_{VR} in $[m^3/km/h]$

| Wasserverlustbereich | Versorgungsstruktur | | |
|-------------------------|---------------------|----------------|-------------|
| | großstädtisch | städtisch | ländlich |
| | > 15.000 | 5.000 – 15.000 | < 5.000 |
| geringe Wasserverluste | < 0,10 | < 0,07 | < 0,05 |
| mittlere Wasserverluste | 0,10 – 0,20 | 0,07 – 0,15 | 0,05 – 0,10 |
| hohe Wasserverluste | > 0,20 | > 0,15 | > 0,10 |

Quelle: nach DVGW (2003a)

Die höheren Grenzwerte für städtische und großstädtische Versorgungsgebiete wird mit der zunehmenden Anschlussdichte (Schwachstellen) und der höheren Beanspruchung dieser Netze begründet. Laut DVGW (2003a) sollte q_{VR} den Grenzwert für mittlere Wasserverluste nicht überschreiten. Bei hohen Wasserverlusten sind „besondere Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung“ zu ergreifen. Die dreistufige Gliederung wurde kritisiert, da sie zu Anomalien an den Stufenübergängen führt, wie Abbildung 4.5 verdeutlicht (vgl. hierzu Fantozzi u. a. (2010) und Tennhardt (2012)).

4.5.3.2 Verluste pro Hausanschluss und Tag

Es wird davon ausgegangen, dass ein Großteil der realen Wasserverluste an Anschlussleitungen entsteht. Daher ist es sinnvoll, die realen Verluste in Bezug mit der Anzahl der Hausanschlüsse zu setzen, wie in Gleichung 4.15 dargestellt. Diese Kennzahl trägt im IWA-Kennzahlensystem die Bezeichnung $Op27$. Diese Kennzahl ist auch unter der Abkürzung CARL (für engl. *Current Annual Real Losses*) bekannt und geht in die Berechnung des ILI (für engl. *Infrastructure Leakage Index*, s. Abschnitt 4.5.3.5) ein.

$$Op27 = CARL = \frac{Q_{VR} \times 1000}{n_{AL} \times 365} \quad (4.15)$$

⁶Entspricht der Kennzahl Op24 des IWA-Kennzahlensystems

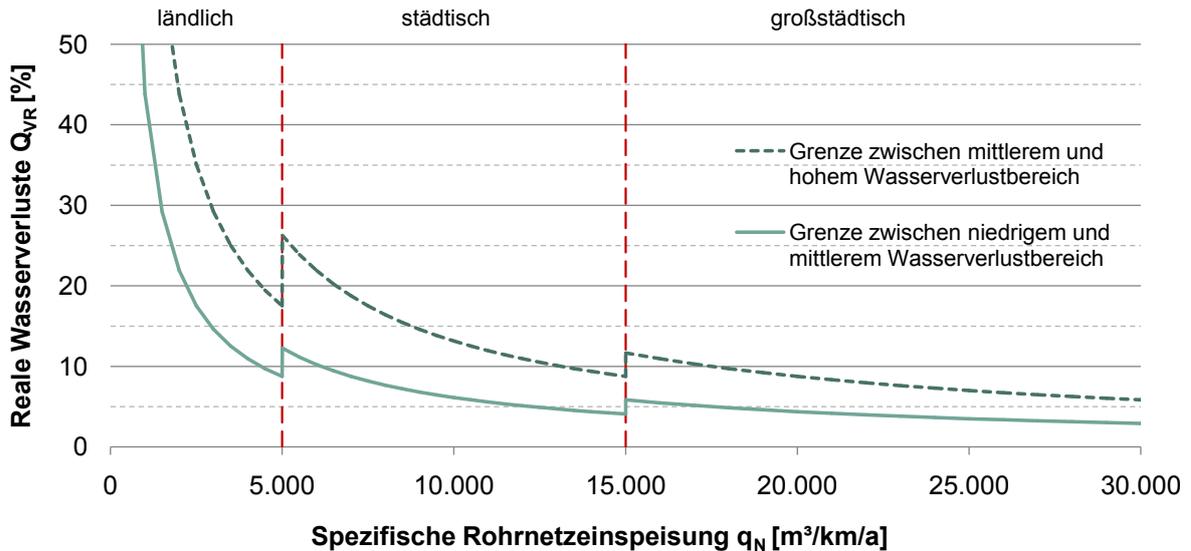


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der DVGW-Grenzen für spezifische Wasserverluste und den zugehörigen prozentualen Wasserverlusten⁷

Darin sind $Op27$ in $[l/AL/d]$ die realen Wasserverluste pro Hausanschluss und Tag, Q_{VR} in $[m^3]$ die realen Wasserverluste pro Jahr und n_{AL} die Anzahl der Anschlussleitungen im Untersuchungsgebiet. Die Kennzahl ist nur für Systeme mit ähnlicher Versorgungsstruktur (Hausanschlussdichte) vergleichbar. Die IWA *Water Loss Task Force* empfiehlt, diese Kennzahl nur für Systeme mit einer Anschlussdichte größer $20 AL/km$ zu verwenden. Da auch die scheinbaren Wasserverluste letztlich zu einem großen Teil an den Anschlussleitungen entstehen (Schleichverluste, Zählerabweichungen), ist es sinnvoll, auch diese ins Verhältnis zur Anzahl der Anschlussleitungen zu setzen, s. Gleichung 4.16.

$$Op25 = \frac{Q_{VS} \times 1000}{n_{AL} \times 365} \quad (4.16)$$

Diese Kennzahl wird im IWA-Kennzahlensystem als $Op25 [l/AL/d]$ bezeichnet. Die Summe aus $Op25$ und $Op27$ ergibt das Verhältnis der Gesamtwasserverluste Q_V zu n_{AL} ($Op23$).

4.5.3.3 Reale Verluste pro Hausanschluss und Tag pro Meter Versorgungsdruck

Die Kennzahl q_{VRP} ist ein weiterer Schritt zur bestmöglichen Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen eines Versorgungssystems. Mit der Versorgungsdruckhöhe geht ein wichtiger Parameter für die Höhe der Verluste in Gleichung 4.17 ein.

$$q_{VRP} = \frac{Q_{VR} \times 1000}{n_{AL} \times 365 \times P_m} \quad (4.17)$$

Darin sind q_{VRP} in $[l/AL/m/d]$ die realen Wasserverluste pro Meter Versorgungsdruck bezogen auf Hausanschluss und Tag, Q_{VR} $[m^3]$ der reale Wasserverlust, n_{AL} $[-]$ die Anzahl der Anschlussleitungen und P_m $[m]$ der mittlere Versorgungsdruck. Mithilfe der Kennzahl q_{VRP} lassen sich Versorgungssysteme oder -zonen miteinander vergleichen, deren Versorgungsdruck sich signifikant unterscheidet.

⁷Quelle: nach Fantozzi u. a. (2010)

4.5.3.4 Unavoidable Annual Real Losses

Das Konzept der so genannten unvermeidbaren jährlichen Wasserverluste UARL (engl. *Unavoidable Annual Real Losses*) wurde von Lambert u. a. (1999) entwickelt und im Oktober 2000 in den IWA *blue pages* vorgestellt (Lambert und Hirner, 2000). Dabei handelt es sich um eine Gleichung zur Ermittlung der technisch erreichbaren unvermeidbaren realen Wasserverluste in gut betriebenen Wasserversorgungssystemen mit einem Rohrnetz in gutem Zustand. Die Gleichung für den UARL wurde auf Basis eines internationalen Datensatzes aus 20 Wasserversorgungssystemen empirisch ermittelt. Die Auswertung der empirischen Daten führte zu folgenden Richtwerten der unvermeidbaren Wasserverlustrhöhe für die einzelnen Komponenten eines Rohrnetzes pro m Druckhöhe und Tag:

- Haupt- und Versorgungsleitungen: 18 Liter pro km
- Anschlussleitungen (WVU-Anteil): 0,8 Liter pro Anschlussleitung
- Anschlussleitungen (privater Anteil): 25 Liter pro km

Somit ergibt sich nach Lambert u. a. (1999) Gleichung 4.18 für die Bestimmung des UARL in $[l/AL/d]$:

$$UARL = (18 \times L_N + 0,8 \times n_{AL} + 25 \times L_{AL}) \times \frac{P_m}{n_{AL}} \quad (4.18)$$

Schadenshäufigkeit und Leckraten von Rohrbrüchen sind nicht in allen Rohrnetzen mit gutem Zustand gleich hoch. Da im UARL aber die Komponenten der Kleinstleckagen an Anschlussleitungen dominieren, wie Abbildung 4.6 zeigt, haben unterschiedlich hohe Ansätze für die Verluste an Haupt- und Versorgungsleitungen nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse (Farley und Trow, 2003).

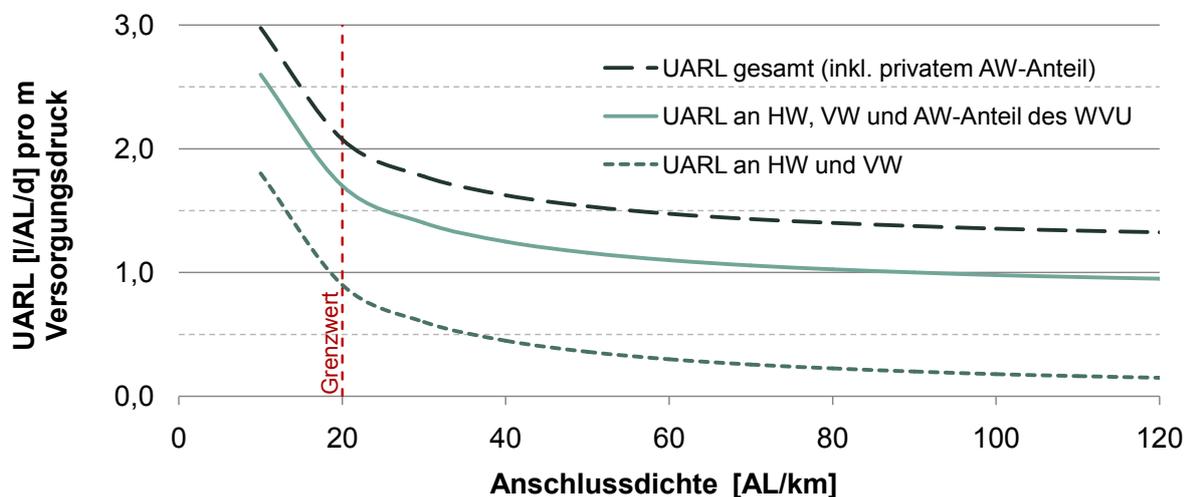


Abbildung 4.6: Höhe der unvermeidbaren Wasserverluste UARL an Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen bei unterschiedlichen Anschlussdichten⁸

⁸Quelle: nach Lambert u. a. (1999)

4.5.3.5 Infrastructure Leakage Index

Der Infrastructure Leakage Index (ILI) ist eine dimensionslose Kennzahl, die als Verhältnis der realen Wasserverluste pro Hausanschluss und Tag (CARL) zu den unvermeidbaren Wasserverlusten (UARL) für den aktuell herrschenden mittleren Versorgungsdruck gebildet wird (s. Gleichung 4.19).

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (4.19)$$

Der ILI berücksichtigt mehrere wichtige Parameter, die die Höhe der Wasserverluste beeinflussen, wie die Länge des Rohrnetzes, die Hausanschlussdichte, die Länge der Anschlussleitungen und den durchschnittlichen Versorgungsdruck. Der ILI ist ein Indikator für die Wirksamkeit der vom WVU eingesetzten Maßnahmen zur Wasserverlustbekämpfung: Je weiter der ILI den Wert von 1,0 überschreitet, desto höher ist das Potenzial für weitere Maßnahmen zur Reduzierung von Wasserverlusten durch Rehabilitationsmaßnahmen, Leckortung und -reparatur oder Druckmanagement (Lambert u. a., 1999). Für Rohrnetze in gutem Zustand kann es vorkommen, dass für den ILI ein Wert kleiner 1,0 ermittelt wird. In diesem Fall ist die Höhe der unvermeidbaren Wasserverluste zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren.

4.5.4 Ökologische Kennzahlen

In der deutschen Fassung des IWA-Kennzahlensystems gibt es eine Reihe von Kennzahlen, die zusammengefasst werden, um das Leistungsmerkmal Nachhaltigkeit eines Wasserversorgungsunternehmens zu beschreiben. Dabei werden Ressourcenherkunft, -schutz und -verbrauch (Energie und Rohstoffe) sowie die technische und wirtschaftliche Substanzerhaltung untersucht und bewertet. Die Kennzahl WR1 (vgl. Abschnitt 4.5.2.2) definiert beispielsweise die Effizienz der Ressourcennutzung und sollte laut Hirner und Merkel (2005) kleiner 5 % betragen.

Mit der Kennzahl Ph17 (in $[kWh/m^3]$) des IWA-Kennzahlensystems wird der Energiebedarf der Pumpen für Gewinnung, Aufbereitung und Förderung beschrieben.

$$Ph17 = \frac{\text{EnergieverbrauchPumpen}}{Q_N} \quad (4.20)$$

Allerdings gibt es bisher in der Wasserversorgung keine ökologischen Kennzahlen, die einen Zusammenhang von Energieverbrauch oder CO₂-Emissionen mit der Höhe der realen Wasserverluste abbilden.

4.6 Datengüte von Messwerten und Kennzahlen

4.6.1 Bewertung der Genauigkeit von erhobenen Werten

Die Aussagekraft der Ergebnisse einer Wassermengenanalyse hängt von der Verlässlichkeit der Eingangsdaten ab. Daher sollte die Genauigkeit aller Eingangsdaten für die Wasserbilanz geprüft und bewertet werden. Die Genauigkeit bezeichnet gemäß DIN ENV 13005:1999 das „Ausmaß der Übereinstimmung zwischen Messergebnis und dem wahren Wert der Messgröße“

(DIN, 1999). In der Praxis liegen den Wasserversorgungsunternehmen üblicherweise keine Informationen zur Genauigkeit der verschiedenen Eingangsdaten vor. Alegre u. a. (2007) schlagen daher vor, dass die Eingangsdaten für die Wasserbilanz mit einer qualifizierten Schätzung des Streubereichs zu versehen sind. Dafür ist für jede Datenquelle zu bestimmen, in welchem Intervall $\pm U_A$ in $[m^3]$ um den Wert A sich der wahre Wert befindet. U_A wird als Unsicherheit bezeichnet. Aus der Unsicherheit U_A lässt sich anhand Gleichung 4.21 die relative Unsicherheit u_A in [%] ermitteln.

$$u_A = \frac{U_A}{A} \times 100 \quad (4.21)$$

4.6.2 Festlegung des Vertrauensniveaus

Alegre u. a. (2007) empfehlen, für die gewählte Unsicherheit U_A bzw. u_A das Vertrauensniveau (englisch: *confidence limit*) festzulegen. Ein 95%-Vertrauensniveau bedeutet, dass sich der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 5% außerhalb des Intervalls $[A - U_A; A + U_A]$ befindet. Übliche Vertrauensniveaus sind beispielsweise 68 %, 95 % oder 99 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich bei normalverteilten Werten etwa 68% aller Messwerte im Bereich der einfachen Standardverteilung um den Mittelwert, ca. 95% im Bereich der zweifachen Standardabweichung und über 99 % im Bereich der dreifachen Standardabweichung befinden. Für normalverteilte Werte wird die Standardabweichung s des Mittelwerts \bar{x} gemäß Gleichung 4.22 bestimmt.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.22)$$

Die Standardabweichung wird mit dem jeweiligen Erweiterungsfaktor k multipliziert, um die Unsicherheit U des jeweiligen Vertrauensniveaus zu bestimmen (DIN, 1999):

- Vertrauensniveau = 68%: $k = 1$ und $U = \pm 1s$
- Vertrauensniveau = 95%: $k = 2$ und $U = \pm 2s$
- Vertrauensniveau = 99%: $k = 3$ und $U = \pm 3s$

In der Wasserversorgungsbranche hat sich die Verwendung von 95%-Konfidenzniveaus durchgesetzt (Alegre u. a., 2007).

4.6.3 Bewertung der Genauigkeit von berechneten Werten

Für Eingangsgrößen, die voneinander unabhängig sind, sind die kombinierten Unsicherheiten der Ergebniswerte zu ermitteln. Hierfür steht die Gleichung 4.23 zur Verfügung (DIN, 1999). Für Addition und Subtraktion unabhängiger Eingangsgrößen (z.B. $W = X + Y - Z$) gilt:

$$U_W = \sqrt{(U_X)^2 + (U_Y)^2 + (U_Z)^2} \quad (4.23)$$

Somit lässt sich die kombinierte Unsicherheit berechneter Komponenten der Wasserbilanz oder daraus abgeleiteter Kennzahlen bestimmen.

4.7 Wassermengenanalyse als Werkzeug zur Strategieentwicklung

4.7.1 Überblick

Effektives Wasserverlustmanagement zeichnet sich dadurch aus, dass die verschiedenen Wasserverlustarten und -mengen, der finanzielle Wert des verlorenen Wassers und die Kosten der geeigneten Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung identifiziert und gegeneinander abgewogen werden (AWWA, 2009). Die aus ökonomischer Sicht optimale Wasserverlusthöhe ist an dem Punkt erreicht, ab dem die Kosten für weitere Reduzierungsmaßnahmen den Wert der eingesparten Wasserverlustmenge übersteigen würden. Im angelsächsischen Bereich wird dieser Punkt als *Economic Level of Leakage* (ELL) bezeichnet. Abbildung 4.7 zeigt, welche Methoden die IWA zur Reduzierung der scheinbaren und realen Wasserverluste bis zum Erreichen des wirtschaftlichen Optimums vorschlägt (Thornton u. a., 2008). Im Folgenden sind die Methoden zur Senkung der realen und scheinbaren Wasserverluste beschrieben. Die genannten Methoden werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher erläutert. Eine detaillierte Beschreibung findet sich beispielsweise bei Thornton u. a. (2008).

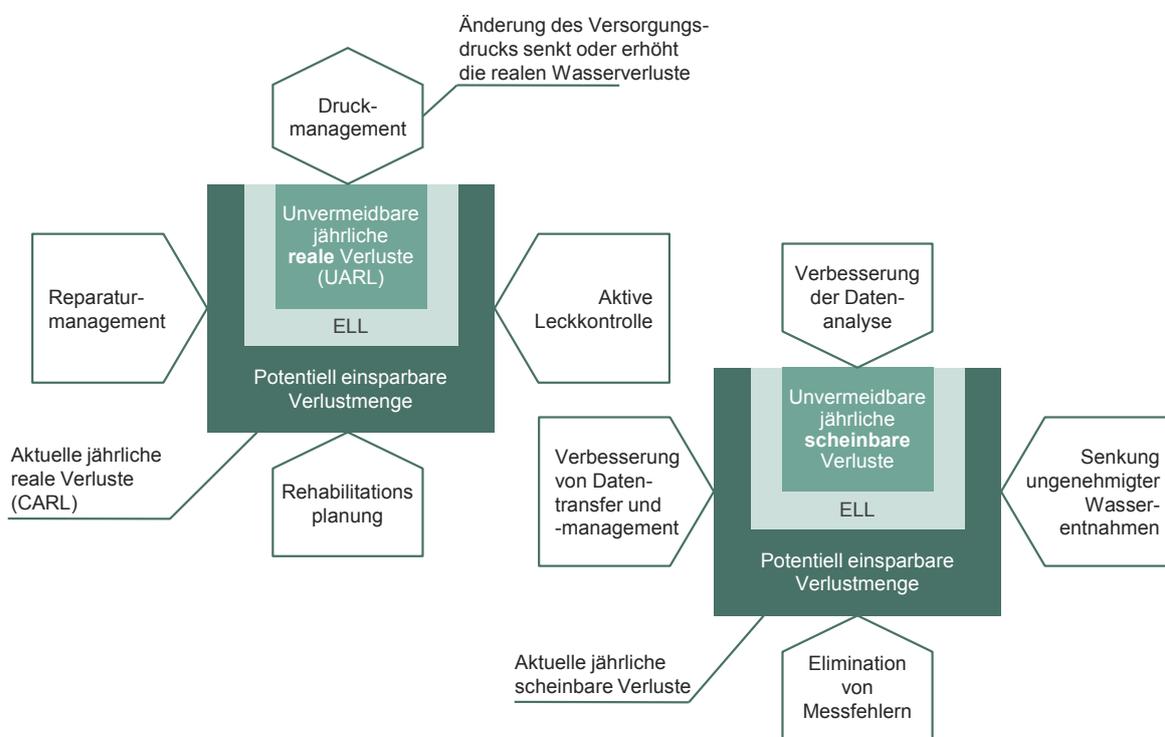


Abbildung 4.7: Vier-Säulen-Konzepte zur Kontrolle realer und scheinbarer Wasserverluste⁹

Aktive Leckkontrolle Als Aktive Leckkontrolle (engl. *active leakage control, ALC*) bezeichnet man die regelmäßige, pro-aktive Inspektion des Leitungsnetzes oder dessen kontinuierliche Überwachung mittels Durchflussmessung oder durch Geräuschlogger. Die Aktive Leckkontrolle verringert die Laufzeit neuer Leckagen signifikant.

⁹Quelle: nach (Thornton u. a., 2008)

Reparaturmanagement Kurze zeitliche Abstände zwischen Leckortung und -reparatur sowie hohe Qualitätsstandards bei der Ausführung der Arbeiten verkürzen die Laufzeit und verringern die Wahrscheinlichkeit eines erneuten Schadensauftritts an der selben Stelle.

Rehabilitation Die langfristige Planung und Umsetzung von Erneuerungsraten für unterschiedliche Materialgruppen eines Rohrnetzes unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands und dessen prognostizierter zukünftiger Entwicklung mindert die Zahl neuer Rohrbrüche und Leckagen.

Druckmanagement Die Verringerung der maximalen Drücke und die Dämpfung von Druckspitzen senkt die Leckagerate vorhandener Schäden und mindert das Auftreten neuer Schäden.

Senkung ungenehmigter Wasserentnahmen Illegale Wasserentnahmen an Hydranten oder durch überbrückte oder manipulierte Wasserzähler sollten durch strikte Unternehmenspolitik unterbunden werden.

Elimination von Messfehlern Nur durch die Ausstattung aller Abnahmestellen mit geeichten Wasserzählern und regelmäßigen Austausch und Kontrolle der eingesetzten Zähler ist die vollständige und genaue Erfassung aller gelieferten Wassermengen möglich.

Verbesserung von Datentransfer und -management Die Prozesse von der Zählerablesung über die Kundenabrechnung bis hin zur Wasserbilanz sollten systematisiert werden, um Datenverluste und -ungenauigkeiten zu verhindern.

Verbesserung der Datenanalyse Die Auswertung der Ablesungen sollte durch korrekte mathematische Verfahren erfolgen, um Abgrenzungsverluste zu minimieren.

4.7.2 Formulierung von Zielwerten

Basierend auf der aktuellen Wassermengenanalyse sollte das WVU einen Zielwert für die Wasserverluste formulieren. Da sich die Auswirkungen der Massnahmen zur Senkung der scheinbaren Wasserverluste nur schwer quantifizieren lassen und diese Verluste in Deutschland eine untergeordnete Rolle spielen, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Formulierung von Zielwerten für reale Wasserverluste. Es empfiehlt sich, hierfür die Kennzahl Wasserverluste pro Anschlussleitung und Tag zu verwenden, da die unvermeidbaren Wasserverluste (UARL, s. Abschnitt 4.5.3.4) die gleiche Einheit besitzen. Alternativ kann auch ein Zielwert für den ILI (s. Abschnitt 4.5.3.5)) verwendet werden. Da die Wasserverlustreduzierung dem Gesetz des abnehmenden Ertrages folgt, können in Zonen mit exzessiven Wasserverlusten anfangs hohe Einsparungen mit geringem Aufwand erzielt werden, indem zum Beispiel durch eine Leckortungs- und Reparaturkampagne die Rückstände an versteckt laufenden, größeren Leckagen behoben werden (AWWA, 2009). Für jede weitere Reduzierung steigt der benötigte Aufwand bis weitere Gegenmaßnahmen schließlich unrentabel werden. Zur Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Wasserverlusthöhe bestehen bereits verschiedene Ansätze, eine Zusammenfassung findet sich bei Fanner u. a. (2007). Abbildung 4.8 veranschaulicht die Bestimmung des optimalen Wasserverlustniveaus (ELL) anhand einer Gesamtkostenkurve.

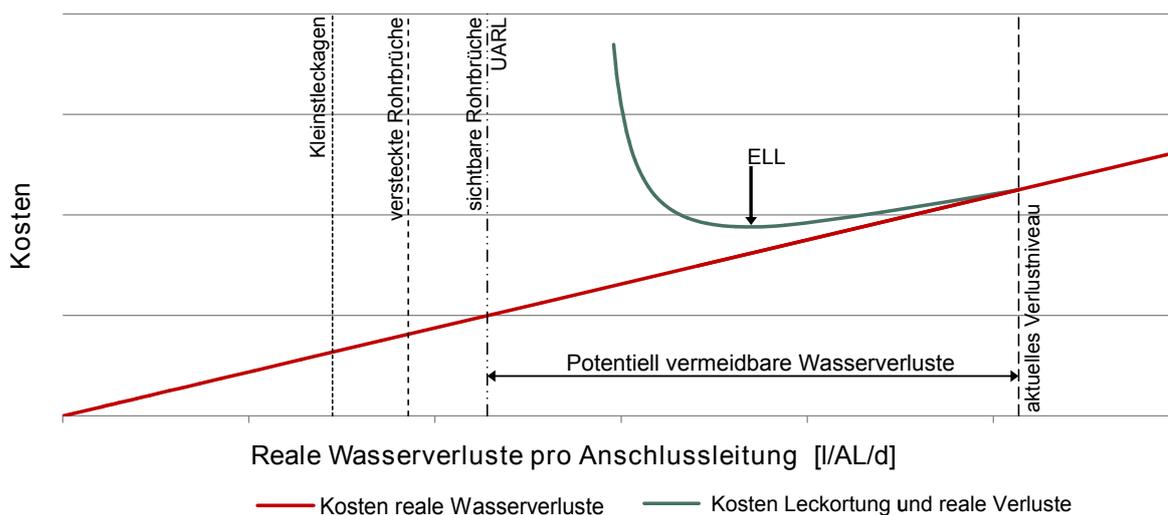


Abbildung 4.8: Bestimmung des optimalen Wasserverlustniveaus (ELL) bei Einsatz von Leckortung¹⁰

Wie Abbildung 4.8 zeigt, werden zur Berechnung des ELL der Wert der verlorenen Wassermenge und die Kostenkurve für regelmäßige elektroakustische Leckortungskampagnen (unterschiedlicher Häufigkeit) überlagert und damit eine Gesamtkostenkurve gebildet. Die Reparaturkosten werden nicht berücksichtigt, da sich durch häufigere Leckortungskampagnen die Anzahl der gefundenen Leckagen nicht erhöht sondern lediglich deren Laufzeit verringert wird (Fanner u. a., 2007). Die Kosten der Leckortungsmaßnahmen werden durch die folgenden Faktoren beeinflusst:

- Teamstärke (in der Regel ein bis zwei Mann) und Gehälter
- Leitungsmaterialien
- verwendete Ausrüstung
- Genauigkeit der Kartengrundlage
- Hausanschluss- und Armaturendichte
- Größe der zu findenden Leckagen

Um die Zeitspanne zwischen Ortung und abgeschlossener Reparatur einer Leckstelle zu berücksichtigen, kann in die Kostenkurve aus Abbildung 4.8 auch die übliche Reparaturdauer einfließen. Auf diese Weise lässt sich analysieren, wie eine Senkung der Reparaturdauer zur Reduktion der Wasserverluste und der daraus entstehenden Kosten beitragen kann.

Eine aktuelle Entwicklung in der Überwachung von Rohrnetzen ist die flächendeckende Ausstattung mit permanent installierten Geräuschloggern. Diese registrieren und melden Veränderungen in der Akustik eines Rohrnetzes sehr früh an die Leitstelle und verringern damit signifikant die Zeitspanne zwischen Auftreten und Entdeckung eines neuen Schadens. Für die Berechnung des ELL ist ein Zusammenhang zwischen Installations- und Betriebskosten dieses Systems und der damit eingesparten Wassermenge herzustellen.

Eine weitere Methode zur Senkung der realen Wasserverluste stellt das Druckmanagement dar. Mit Hilfe eines hydraulischen Modells lässt sich ermitteln, wie weit der Druck dynamisch oder nur in den Nachtstunden abgesenkt werden kann, ohne die Versorgungsqualität für die

¹⁰Quelle: nach (Fanner u. a., 2007)

Kunden zu beeinträchtigen. Ist dieser Wert bekannt, können die Auswirkungen der Druckabsenkung auf die Wasserverlustsituation simuliert werden, wie in Abbildung 4.9 abgebildet. Die Installationskosten für die Druckreduziersysteme (Armaturen, Schacht, Telemetrie) erhöhen zunächst die Gesamtkosten. Gleichzeitig bewirkt die Senkung des Drucks aber eine Reduzierung der Leckraten aller Schadenstypen in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung des Leitungsnetzes (Leckageexponent α , s. Gleichung 3.6). Dadurch sinkt auch die Höhe der unvermeidlichen Wasserverluste, die anhand der druckabhängigen Kennzahl UARL bestimmt wird. Das Beispiel in Abbildung 4.9 zeigt, dass unter den gegebenen Randbedingungen das optimale Wasserverlustniveau ohne Druckmanagement erzielt wird.

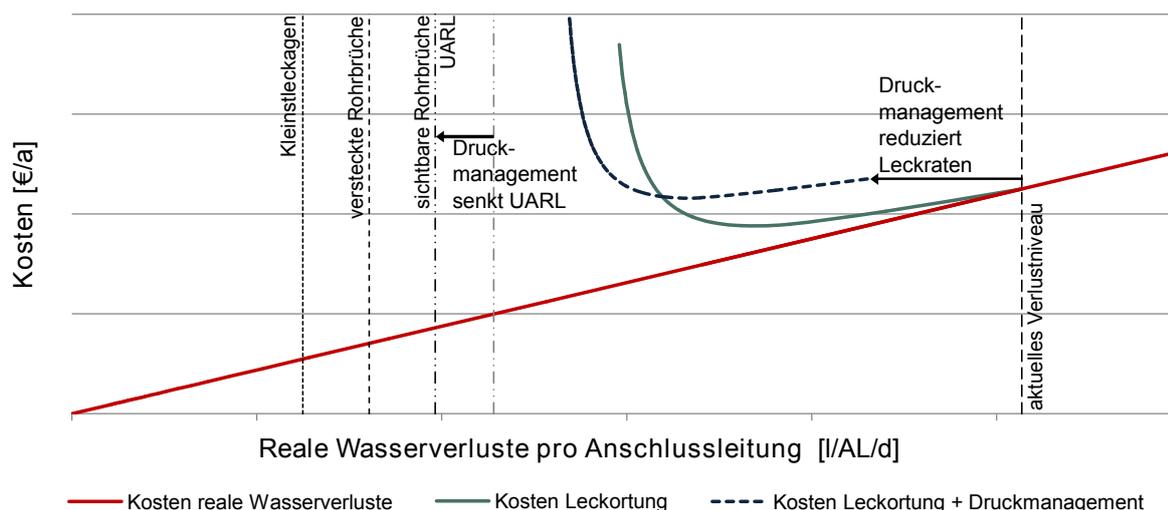


Abbildung 4.9: Bestimmung des optimalen Wasserverlustniveaus (ELL) bei Einsatz von Leckortung und Druckmanagement

Langfristig lassen sich die Wasserverluste, insbesondere aus Kleinstleckagen, durch die Verbesserung des Zustands der Infrastruktur senken. Dies wird durch gezieltes Instandhaltungsmanagement und langfristige Rehabilitationsplanung erreicht. Hierzu wurde eine ganze Reihe von Werkzeugen entwickelt, die bei WVU eingesetzt werden, wie beispielsweise *KANEW* (Herz, 2002), *CARE-W* (Eisenbeis u. a., 2002) oder *PiReM* (Fuchs-Hanusch u. a., 2008). Die genannten Werkzeuge dienen dazu, auf Basis historischer Schadensraten und Erneuerungsraten eine Prognose für den zukünftigen Erneuerungsbedarf einzelner Leitungsgruppen abzuleiten. Mit möglichst geringem wirtschaftlichen Einsatz soll langfristig der Rohrnetzzustand erhalten oder verbessert werden, indem für jede Leitung der optimale Erneuerungszeitpunkt bestimmt wird (Baur und Herz, 2005). Da die Auswirkung der langfristigen Erneuerungsraten auf die Höhe der Wasserverluste nicht so einfach prognostiziert werden kann wie beispielsweise beim Druckmanagement, können die Effekte der Rehabilitationsplanung bei der Bestimmung des optimalen Wasserverlustniveaus nur schwer berücksichtigt werden.

Die in den Abbildungen 4.8 und 4.9 dargestellten Kostenkurven zur Bestimmung des ELL basieren zunächst immer auf Schätzungen, z.B. die Quantifizierung der durch pro-aktive Leckortung eingesparten Wasserverlustmenge oder die Bestimmung des Leckageexponenten α . Wird die Bestimmung der Zielwerte in aufeinanderfolgenden Jahren wiederholt, so dass sich Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen beobachten lassen, können die zugrundeliegenden Gleichungen mittels empirischer Daten kalibriert werden.

4.7.3 Identifikation von Gegenmaßnahmen

Die detaillierte Kenntnis der einzelnen Komponenten der Wasserbilanz sind entscheidende Faktoren, um die optimale Strategie zur Reduzierung der Wasserverluste zu entwickeln. Die Tabellen 4.7 und 4.8 geben einen Überblick über geeignete Maßnahmen zur Bekämpfung einzelner Verlustkomponenten.

Tabelle 4.7: Reale Verlustkomponenten und Gegenmaßnahmen

| Verlustkomponenten | Gegenmaßnahmen |
|---|---|
| Wasserverluste aus sichtbaren Schäden | <ul style="list-style-type: none"> ○ Verkürzung der Laufzeit durch kürzere Reaktions- und Reparaturzeiten |
| Wasserverluste aus detektierbaren Schäden | <ul style="list-style-type: none"> ○ Aufarbeitung des Rückstands an bekannten Schäden ○ Reduktion der Anzahl neuer Schäden durch <ul style="list-style-type: none"> → Einführung von Druckmanagement (kurzfristig) → Einführung einer Reha-Strategie (langfristig) ○ Reduktion der Schadenslaufzeit durch <ul style="list-style-type: none"> → Einführung kontinuierlicher Rohrnetzüberwachung → Intensivierung der Leckortungsmaßnahmen → Verbesserung der Reparaturprozesse |
| Wasserverluste aus Kleinstleckagen | <ul style="list-style-type: none"> ○ Einführung von Druckmanagement ○ Entwicklung einer langfristigen Reha-Strategie |

Quelle: nach GIZ (2011)

Tabelle 4.8: Scheinbare Verlustkomponenten und Gegenmaßnahmen

| Verlustkomponenten | Gegenmaßnahmen |
|---|--|
| Nicht abgerechneter Wasserverbrauch | <ul style="list-style-type: none"> ○ Erhöhung der Hebeeffizienz ○ Reduktion des Eigenverbrauchs des WVU ○ Reduktion der Anzahl der Pauschalkunden |
| Abgrenzungsverluste u. Datenhandhabungsfehler | <ul style="list-style-type: none"> ○ Umstieg von manueller Ablesung auf AMR ○ Analyse des Abrechnungsprozesses ○ Prüfung der Prognose- und Annualisierungsverfahren ○ Verbesserung des Kundendatenmanagements ○ Suche nach Anomalien im Verbrauchsverhalten |
| Zählerabweichungen u. Schleichverluste | <ul style="list-style-type: none"> ○ Analyse des Wasserzählerparks ○ Austausch falsch dimensionierter KWZ ○ Regelmäßige Prüfung der Messgenauigkeit von BWZ ○ Austausch- und Wartungsprogramm für BWZ |
| Wasserdiebstahl | <ul style="list-style-type: none"> ○ Netz auf manipulierte KWZ inspizieren ○ Eindämmung von Betrug und Wassermisbrauch |

Quelle: nach GIZ (2011)

Die Verlustkomponenten sollten nicht nur anhand der verlorenen Wassermengen sondern

auch anhand ihrer ökonomischen und ökologischen Auswirkungen verglichen und daraufhin zuerst diejenigen Komponenten angegangen werden, die die höchste Rentabilität versprechen (GIZ, 2011). Nicht jede der beschriebenen Gegenmaßnahmen ist für jedes WVU geeignet. Bei der Entwicklung der Strategie zur Reduktion der Wasserverluste sind daher Kosten-Nutzen-Analysen für die einzelnen Gegenmaßnahmen durchzuführen. Die Auswahl der optimalen Maßnahmen wird durch die Ermittlung von Kennzahlen (s. Abschnitt 4.5) unterstützt.

4.8 Defizite und Verbesserungspotenzial

4.8.1 Gängige Praxis der Wassermengenanalyse in Deutschland

Zentraler Baustein der Wassermengenanalyse ist die Erstellung einer detaillierten Wasserbilanz. In der Praxis wird der Wert der Wasserbilanz für die Wasserverlustreduzierung jedoch häufig unterschätzt. Ihre Aussage wird darauf beschränkt, generelle Änderungen für ein Gesamtnetz zu erkennen: Ist der prozentuale Anteil der Wasserverluste an der Rohrnetzeinspeisung gegenüber dem Vorjahr gestiegen oder gesunken? In der Praxis wird aber meist nur eine Bilanz für das gesamte Wasserversorgungssystem erstellt, wie aus der deutschsprachigen Fachliteratur geschlossen werden kann.

Osmanovic (2010) stellt fest, dass häufig keine Wasserbilanzierung bzw. Fertigstellung der Jahresabrechnungsberichte nach Empfehlung des DVGW-Arbeitsblattes W 392 stattfindet und dass es bei der Erstellung der Wasserbilanz keine Differenzierung der Wasserverluste nach einzelnen Versorgungsgebieten oder -zonen gibt. Ein Beispiel für eine sehr detaillierte Wasserbilanz für ein Gesamtsystem, in der alle Komponenten berücksichtigt werden, gibt Tennhardt (2012). Er beschreibt, wie für das Wasserversorgungssystem der Berliner Wasserbetriebe systematisch die Bilanzierung aller Volumenströme durchgeführt wird, um die Hintergrundverluste aus Kleinstleckagen quantifizieren zu können. Dabei werden selbst kleinste Abgabemengen soweit möglich quantitativ erfasst: öffentliche Toiletten, Zierbrunnen, Bewässerung öffentlicher Flächen, Löschwasserentnahmen, Spülmengen und Eigenverbrauch des WVU. Tennhardt weist darauf hin, dass der hohe Detaillierungsgrad für aussagekräftige Ergebnisse unerlässlich aber mit einem hohen Aufwand verbunden ist (Quelle: L. Tennhardt, Berliner Wasserbetriebe, persönliche Mitteilung, 16.07.2013). Kölbl und Martinek (2010) halten fest, dass Wasserbilanzen und daraus errechnete Kennzahlen elementare Komponenten eines Wasserverlustmanagements sind, sich in der Regel aber auf längere, bereits vergangene Zeiträume beziehen, da es sich um relativ träge Instrumente handelt. Gangl u.a. (2009) schlussfolgern, dass für eine detaillierte Betrachtung oder zur Erkennung von Schwachstellen im Netz eine Wasserbilanz für ein Versorgungssystem nur bedingt zielführend ist, da die jährlich erstellte Wasserbilanz immer nur den Zustand der Vergangenheit anzeigt, auf den erst zeitversetzt reagiert werden kann. Da (nicht eichpflichtige) Großwasserzähler zur Rohrnetzüberwachung häufig viele Jahre ohne Kalibrierung oder Überprüfung im Einsatz sind, kommen Gangl u. a. (2007) sowie Guibentif u.a. (2007) übereinstimmend zu dem Schluss, dass mögliche Zählerabweichungen in der Wasserbilanz berücksichtigt werden sollten. Schon relativ kleine Messabweichungen bei der Einspeisemenge können die ermittelten Wasserverluste deutlich verfälschen.

4.8.2 Befragung von WVU in Baden-Württemberg

Im Rahmen einer Diplomarbeit befragte Rathgeber (2012) die Wasserversorgungsunternehmen der größten Städte Baden-Württembergs sowie die Mitgliedsunternehmen der Schwarz-

waldWASSER GmbH¹¹. Die Umfrage wurde von 29 der 77 befragten Unternehmen beantwortet, deren jährliche Einspeisemengen ein breites Spektrum von ca. 42.000 m^3/a bis ca. 43,3 Mio. m^3/a abdecken. Insgesamt 69 % der Befragten gaben an, die „Erstellung von Wasserbilanzen für die effiziente Reduzierung von Wasserverlusten“ für „wichtig“ oder „sehr wichtig“ zu halten. Allerdings verwenden nur 31 % der befragten Unternehmen das standardisierte Schema gemäß DVGW Arbeitsblatt W 392 für die Erstellung der Wasserbilanz, wie in Abbildung 4.10 zu sehen ist.

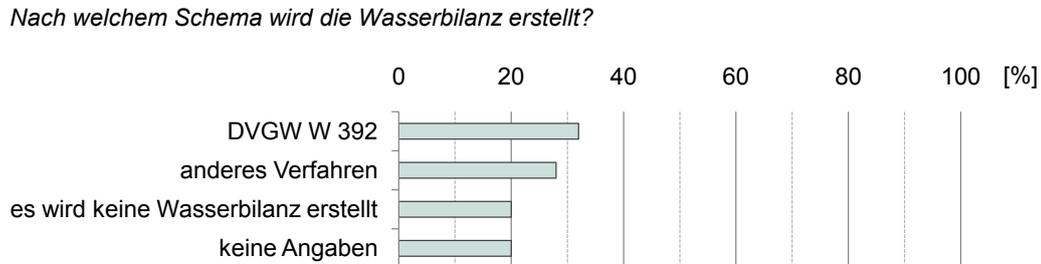


Abbildung 4.10: Verfahren zur Wasserbilanzerstellung¹²

Bei der Befragung wurde ersichtlich, dass kein WVU sämtliche Komponenten der DVGW-Wasserbilanz ermittelt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse in Abbildung 4.11 verdeutlicht, dass viele WVU lediglich die Rohrnetzeinspeisung Q_N sowie die in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe Q_{AI} ermitteln. Diese beiden Werte lassen sich anhand von Messwerten aus der betrieblichen Überwachung und der Kundenabrechnung ermitteln und liegen den meisten WVU in digitaler Form vor. Weiterhin wird die Abgabe an temporäre Abnehmer wie z.B. Baustellen von einem sehr großen Anteil (83 %) der Befragten berücksichtigt und auch mittels Zählerstandrohren gemessen.

Der Eigenbedarf für Wasseraufbereitung und -verteilung wird von der überwiegenden Anzahl der WVU bei der Erstellung der Wasserbilanz berücksichtigt, wie Abbildung 4.11 zeigt. Abbildung 4.11 zeigt aber auch, dass nur ein geringer Teil des Eigenbedarfs tatsächlich gemessen wird, hier also eine beträchtliche Unsicherheit bezüglich der tatsächlich verbrauchten Wassermengen besteht. Weitere Bestandteile der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} werden von den WVU sehr unterschiedlich behandelt: Die Bewässerung öffentlicher Grünflächen, Kanal- und Straßenreinigung sowie der Wasserverbrauch öffentlicher Veranstaltungen werden von ca. zwei Dritteln der befragten WVU in den Wasserbilanzen berücksichtigt, allerdings wird die Entnahmemenge häufig nur abgeschätzt. Die Umfrage macht deutlich, dass die Ermittlung und Berücksichtigung der Löschwassermenge die WVU vor Probleme stellt, da die Feuerwehr die Entnahmemengen nicht misst und es keine Vorgaben, Richtwerte oder bekannte Verfahren zur Abschätzung der Mengen gibt.

Die Auswertung der Umfrageergebnisse zeigt, dass die scheinbaren Verluste nur sehr selten berücksichtigt werden, häufig pauschal als Prozentsatz der Rohrnetzabgabe. Gründe dafür sind vermutlich einerseits der große Aufwand der zur detaillierten Abschätzung der Zählerabweichungen und der Schleichverluste notwendig ist und andererseits dass die WVU keinen direkten Nutzen in der Ermittlung dieser Komponenten sehen. Bezüglich des Wasserdiebstahls ist die Ursache wahrscheinlich darin zu sehen, dass dieser in Deutschland nur eine

¹¹Die SchwarzwaldWASSER GmbH ist der Interessenverband von ca. 60 WVU, Regionalversorgern und Zweckverbänden im Rheintal sowie im nördlichen und mittleren Schwarzwald

¹²Quelle: (Rathgeber, 2012)

| Eingangsdaten | Berechnete Komponenten | | Eingangsdaten |
|--|---------------------------|---|--|
| Rohrnetz- einspeisung Q_N Ermittelt: 100% Vollständig gemessen: 97% | Rohrnetz- abgabe Q_A | In Rechnung gestellte Rohrnetz- abgabe Q_{AI} | Private Haushalte, Gewerbe und Industrie Ermittelt: 93% Davon gemessen: 90% |
| | | | Temporäre Abnehmer (z.B. Baustellen) Ermittelt: 83% Davon gemessen: 66% |
| | | Nicht in Rechnung gestellte Rohrnetz- abgabe Q_{AN} | Filterspülungen Ermittelt: 45% Davon gemessen: 21% |
| | | | Behälterreinigung Ermittelt: 59% Davon gemessen: 14% |
| | | | Hydranten- und Leitungsspülungen Ermittelt: 62% Davon gemessen: 17% |
| | | | Löschwasser Ermittelt: 41% Davon gemessen: 3% |
| | | | Kanal- und Straßenreinigung Ermittelt: 55% Davon gemessen: 31% |
| | | | Bewässerung öffentlicher Flächen Ermittelt: 66% Davon gemessen: 55% |
| | Wasser- verluste Q_V | Scheinbare Wasserverluste Q_{VS} | Zählerabweichungen und Abgrenzungsverluste Ermittelt: 0% Davon gemessen: 0% |
| | | | Schleichverluste Ermittelt: 3% Davon gemessen: 0% |
| | | | Wasserdiebstahl Ermittelt: 0% Davon gemessen: 0% |
| | | Reale Wasser- verluste Q_{VR} | An Zubringerleitungen Ermittelt: 0% Davon gemessen: 0% |
| | | | An Behältern Ermittelt: 7% Davon gemessen: 3% |
| | | | An Haupt- und Versorgungsleitungen Ermittelt: 0% Davon gemessen: 0% |
| | | | An Hausanschlussleitungen Ermittelt: 0% Davon gemessen: 0% |
| | | | Ermittelt: 0% Davon gemessen: 0% |

Abbildung 4.11: Umfrageergebnisse zur Handhabung der Wasserbilanz¹³

untergeordnete Rolle spielt. In Folge werden die realen Wasserverluste in den meisten Fällen mit den Gesamtwasserverlusten gleichgesetzt. Die Einzelbestandteile der realen und scheinbaren Wasserverluste werden in der Praxis nicht ermittelt. Lediglich zwei WVU ermitteln die Wasserbilanz für einzelne Versorgungszonen. 52 % der Befragten gaben an, aus den Ergebnissen der Wasserbilanz Kennzahlen abzuleiten, die für die Wasserverlustreduzierung genutzt werden (Rathgeber, 2012).

Abbildung 4.12 gibt Aufschluss darüber, welche Abteilungen eines WVU bei der Erstellung einer Wasserbilanz eingebunden werden. Die von Rathgeber (2012) durchgeführte Umfrage ergab, dass durchschnittlich drei und maximal bis zu sieben Abteilungen Daten für die Erstellung der Wasserbilanz zur Verfügung stellen. Dies zeigt, dass die Erstellung der Wasserbilanz für die WVU einen bedeutenden Aufwand an koordinierenden Tätigkeiten erfordert. Als Arbeitsaufwand für die Erstellung der Wasserbilanz gaben die befragten WVU Zeiträume zwischen einem und fünf Arbeitstagen an, der Mittelwert liegt bei 2,3 Tagen.

4.8.3 Fazit und Ableitung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Dank der Bemühungen von Wasserverbänden wie DVGW, IWA und AWWA verfügt die Wasserwirtschaft inzwischen über standardisierte Verfahren zur Quantifizierung und Beschreibung der Wasserverluste. Erfahrungen aus der Praxis zeigen aber, dass diese nicht von allen WVU konsequent und in der vorgeschriebenen Weise angewendet werden. Die Untersuchung

¹⁴Quelle: (Rathgeber, 2012)

Welche Abteilungen stellen Daten für die Erstellung der Wasserbilanz zur Verfügung?

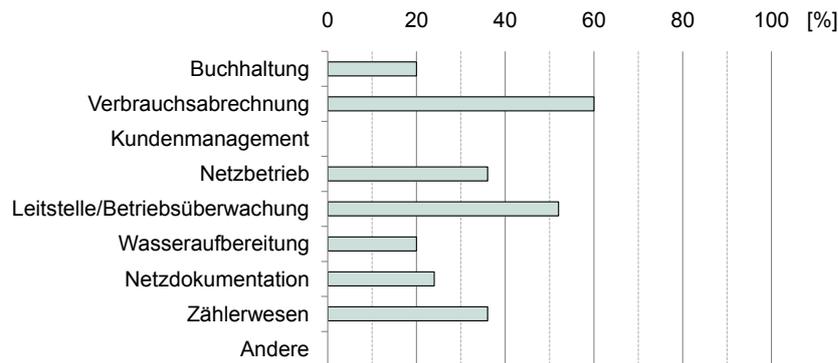


Abbildung 4.12: An der Wasserbilanzerstellung beteiligte Abteilungen¹⁴

der Handhabung der Wasserbilanz lässt sich wie folgt zusammenfassen (Knobloch und Klingel, 2013):

- Viele Einzelkomponenten der DVGW-Wasserbilanz sind sehr aufwendig zu ermitteln und werden pauschal abgeschätzt oder vernachlässigt.
- Eine vollständige Wasserbilanz unter Berücksichtigung aller Komponenten wird nur selten erstellt.
- Die scheinbaren Wasserverluste Q_{VS} werden häufig gar nicht oder nur pauschal berücksichtigt. Die Annahme von 1,5 bis 2,0 % der Rohrnetzabgabe Q_A ergibt für die meisten deutschen WVU einen zu hohen Wert.
- Aufgrund unterschiedlicher Vorgehensweisen sind die Ergebnisse vieler WVU nicht untereinander vergleichbar und technische Kennzahlen werden verfälscht.
- Mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen ist eine Bilanzierung sehr aufwendig, weshalb die Wasserbilanz meist für das Gesamtnetz und nicht zonenweise und nur in großen, meist jährlichen Abständen ermittelt wird.
- Lange Bilanzierungszeiträume, die fehlende Bilanzierung von Zonen und die unvollständige Ermittlung der Bilanz führen zu einer eingeschränkten Aussagekraft der Ergebnisse für das Wasserverlustmanagement.

Aus der beschriebenen Situation in der Praxis lässt sich schlussfolgern, dass Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, um Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die WVU dabei unterstützen mit wirtschaftlichem Aufwand eine vollständige, korrekte Wasserbilanz für adäquate Bilanzierungszeiträume zu erstellen. Es ist unter anderem zu überprüfen, ob es Komponenten gibt, die mengenmäßig einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis haben und daher in Zukunft aus der Bilanz herausgenommen werden können. Dies gilt insbesondere für Komponenten, die in Summe ein Vielfaches kleiner sind als die Messabweichung der großen Komponenten wie z. B. Rohrnetzeinspeisung Q_N oder in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe Q_{AI} . Für Komponenten, die sich bei der Untersuchung als relevant herausstellen,

¹⁴Quelle: (Rathgeber, 2012)

sind Verfahren zu entwickeln, um ihre Höhe mit wirtschaftlichem Aufwand hinreichend genau quantifizieren zu können (Knobloch und Klingel, 2013).

5 Konzeption der automatisierten Wassermengenanalyse

5.1 Kapitelüberblick

In Abschnitt 5.2 werden die Inhalte und die Zielsetzung des Forschungsprojekts *AWaRe* vorgestellt, das sich die Entwicklung eines GIS-basierten Werkzeugs zur automatisierten Analyse der Wasserverluste in Wasserversorgungssystemen zur Aufgabe gestellt hat. Abschnitt 5.3 stellt die Systemarchitektur von *AWaRe* vor und erläutert die Arbeitsteilung der Verbundpartner zur Entwicklung der einzelnen Module. Besondere Berücksichtigung findet hierbei die Entwicklung des Moduls zur Wassermengenanalyse (*WMA*), das im Rahmen der vorliegenden Arbeit konzipiert und entwickelt wurde. Abschnitt 5.4 beschreibt die Schnittstellen zu zentralen IT-Systemen eines WVU und zeigt auf, welche Eingangsdaten die *WMA* für die Durchführung von Analysen benötigt. Außerdem wird in diesem Abschnitt erläutert, wie die Elemente eines Wasserversorgungssystems abstrahiert, zu übergeordneten Komponenten zusammengefasst und topologisch verknüpft werden, so dass sie von der *WMA* eingelesen werden können. Die Abschnitte 5.5 bis 5.7 beschreiben die Entwicklung und Funktionsweise der drei Module, aus denen sich die *WMA* zusammensetzt: Modul WB zur Erstellung der Wasserbilanz, Modul PI zur Ermittlung von Kennzahlen und Modul UA zur Analyse von Ursachen der Verluste.

5.2 Projekthintergrund

Damit ein WVU Maßnahmen zur Reduzierung der Wasserverluste kostenoptimal einsetzen kann, muss zunächst eine differenzierte Wassermengenanalyse durchgeführt werden. Die Wassermengenanalyse erfordert die Erhebung und Verknüpfung relevanter Daten aus allen Anlagenteilen und Betriebsebenen eines Wasserversorgungssystems. Basierend auf der Wassermengenanalyse kann eine Strategie entwickelt werden, die den optimalen Einsatz bzw. die bestmögliche Kombination der unterschiedlichen Methoden zur Wasserverlustreduzierung festlegt. Wie in Abschnitt 4.8 gezeigt werden konnte, ist mit den momentan verfügbaren Mitteln eine umfassende Wassermengenanalyse für WVU sehr personal- und zeitintensiv und wird daher von wenigen Unternehmen umgesetzt. Eine solche umfassende Wassermengenanalyse enthält neben der Bilanzierung der Wasserverlustkomponenten auch deren Bewertung und die Identifikation möglicher Ursachen. Die Bilanzierung muss alle Komponenten des produzierten, eingespeisten und abgegebenen Wassers erfassen. Die Bewertung erfolgt über diverse Kennzahlen.

Gemeinsam mit den Ingenieurbüros *3S Consult GmbH* (3S) aus Garbsen und *COS Systemhaus GmbH* (COS) aus Ettlingen wurde am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) das Forschungsprojekt *GIS-integrierte automatisierte Wassermengenanalyse zur Reduzierung von Wasserverlusten in der Trinkwasserversorgung (AWaRe¹)* initiiert. Ziel von *AWaRe* ist die Entwicklung und pilothafte Inbetriebnahme eines prototypischen Werkzeugs zur automatisierten Wassermengenanalyse. Für

die Implementierung und den Test der Software nehmen die Stadtwerke Pforzheim (SWP) als Praxispartner am Projekt *AWaRe* teil. Dies sind die primären Entwicklungsziele von *AWaRe*:

1. Automatisierte Erfassung der Eingangsdaten für die Wassermengenanalyse aus relevanten Anlagenteilen und Betriebsebenen eines Wasserversorgungssystems zur Minimierung der personalintensiven manuellen Datenerhebung und -aufbereitung.
2. Schließen von Lücken im Überwachungssystem des WVU durch Anbindung an ein hydraulisches Modell, um Systemdrücke und Fließgeschwindigkeiten zu simulieren, die nicht durch Messinstrumentierung direkt erfasst werden.
3. Räumlich und zeitlich differenzierte Bilanzierung der Wassermengen- und Wasserverlustverteilung eines Systems, um Wasserverluste nicht nur für das Gesamtsystem, sondern für beliebige Bilanzierungszonen und -zeiträume zu quantifizieren.
4. Analyse und Bewertung der Wasserverlustkomponenten hinsichtlich technischer, ökonomischer, ökologischer und energetischer Kriterien und Wahl optimaler Gegenmaßnahmen.
5. Bereitstellung international anerkannter Kennzahlen, um die Vergleichbarkeit der Wasserverluste unterschiedlicher Wasserversorgungssysteme oder Versorgungszonen zu gewährleisten.
6. Visualisierung der Ergebnisse der Wassermengenanalyse im GIS, um die räumliche Verteilung der Wasserverluste und die Lage von Problemzonen einfach zu veranschaulichen.

Die unter 3, 4 und 5 aufgeführten Ziele sind der Gegenstand der vorliegenden Dissertation. Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben *AWaRe* startete am 01. Mai 2012 und hat eine Laufzeit von zweieinhalb Jahren. Das Projekt wird mit Mitteln des BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme *KMU-innovativ: Ressourcen- und Energieeffizienz* gefördert.

5.3 Das Werkzeug *AWaRe*

GIS Zentrale Integrationsebene von *AWaRe* ist das GIS, wie die schematische Darstellung der Systemarchitektur in Abbildung 5.1 verdeutlicht. Im Rahmen des Verbundprojekts handelt es sich um das von COS entwickelte GIS *COSVega*. Konzeption und Entwicklung des neuen Werkzeugs zielen darauf ab, die einzelnen Module der Software möglichst eigenständig zu halten, um ihre Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Randbedingungen und Kompatibilität mit verschiedenen Softwareumgebungen zu gewährleisten.

Die für die Wassermengenanalyse notwendigen Eingangsdaten aus unterschiedlichen sekundären Quellen, wie z.B. dem Leitsystem, der Kundenabrechnung, dem Auftragszentrum oder der Schadensdatenbank werden über flexible Schnittstellen und Abfragen an das GIS angebunden. Die Daten aus den sekundären Quellen werden in *COSVega* auf Güte und Konsistenz geprüft, homogenisiert und für die weitere Verarbeitung in der Wassermengenanalyse in einer Austauschdatenbank bereitgestellt. Die Struktur der Tabellen dieser Austauschdatenbank ist fest vorgegeben und wird in Abbildung 5.4 und den Abschnitten 5.5 bis 5.7 beschrieben. Das GIS erhält weiterhin eine spezifische Fachschale, um nach der Durchführung der Analysen die Berechnungsergebnisse aus der Austauschdatenbank einzulesen und die Ergebnisse der Wassermengenanalyse und der hydraulischen Simulation in einem web-basierten Auskunftssystem grafisch darzustellen.

¹*AWaRe* kann einerseits als Akronym des Projekttitels gelesen werden, andererseits soll mit dem Kürzel auf die Relevanz der genauen Kenntnis (engl. *awareness*) der Wasserverlustmengen hingewiesen werden.

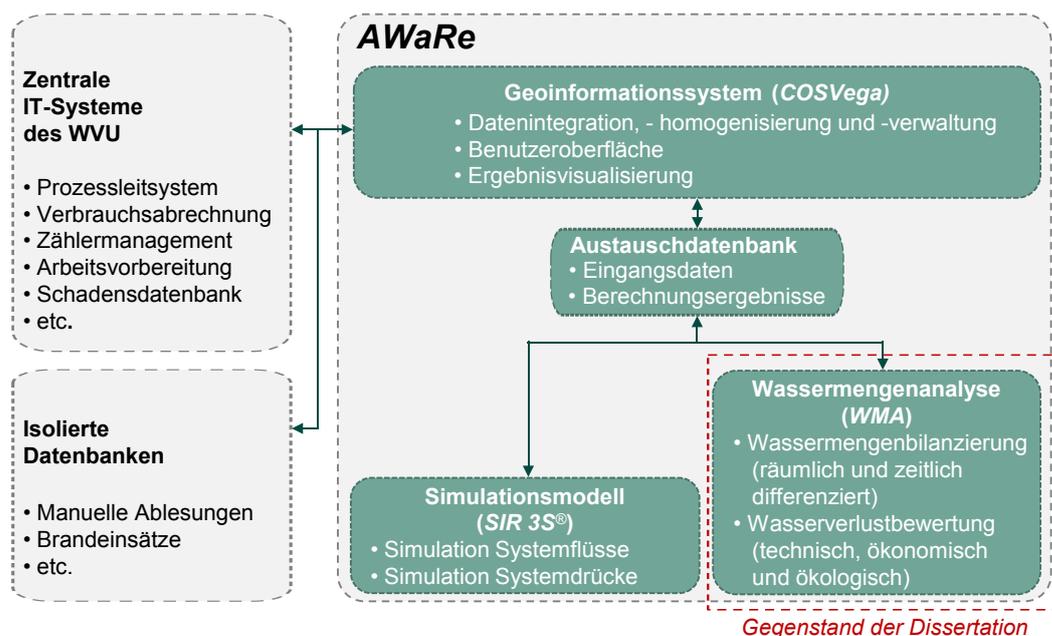


Abbildung 5.1: Systemarchitektur des Werkzeugs AWaRe

Wassermengenanalyse Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung des Moduls zur Wassermengenanalyse (im Folgenden *WMA* genannt), das innerhalb von *AWaRe* für die automatisierte Bilanzierung und Bewertung der Wasserverluste zuständig ist. Einmal parametrisiert, werden von der *WMA* automatisch alle erforderlichen Eingangsdaten aus der Austauschdatenbank übernommen und auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft. Anschließend werden die Wasserverluste für gewählte Betrachtungszeiträume und -zonen berechnet. Die ermittelten Wasserverluste werden mithilfe technischer, ökonomischer und ökologischer Kennzahlen bewertet. Mögliche Ursachen für die Wasserverluste werden analysiert. Die einzelnen Module der *WMA* sind in den Abschnitten 5.5 bis 5.7 detailliert beschrieben. Die Ergebnisse der Analysen werden von der *WMA* für die Visualisierung im GIS in die Austauschdatenbank zurückgeschrieben. Daneben können die Resultate als Berichte in Textdateien oder als CSV-Dateien für die Weiterverarbeitung in Tabellenkalkulationsprogrammen gespeichert werden.

Die *WMA* ist in der Programmiersprache *C#* implementiert. Die einzelnen Module der *WMA* werden als austauschbare Programmbibliotheken (*DLL*) an das Hauptprogramm angebunden. Um die großen Datenmengen handhaben zu können, benötigt die Software ein 64 bit Betriebssystem und liegt auch selbst als 64 bit Version vor. Dadurch kann der gesamte im System verfügbare Arbeitsspeicher verwendet werden. Besonders die Verarbeitung von Messwerten an Betriebswasserzählern, die über mehrere Jahre hinweg in Minutenintervallen vorliegen, benötigt sehr viel Arbeitsspeicher. Wo möglich, werden durch Parallelisierung der Algorithmen sämtliche im System vorhandenen Prozessoren bzw. Prozessorkerne verwendet, um die Laufzeit der Berechnung zu minimieren.

Hydraulisches Simulationsmodell Über die Austauschdatenbank wird auch das hydraulische Simulationsmodell *SIR 3S[®]* des Partners *3S* an das GIS *COSVega* angebunden. Innerhalb der *AWaRe*-Lösung liefert das hydraulische Modell Informationen über wichtige hydraulische Zustandsgrößen (Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten) zur Wassermengenanalyse, für

die aufgrund mangelnder Messgeräte keine Messungen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus kann durch Simulationen die Planung von Maßnahmen zur Verlustreduzierung (z.B. Druckmanagement) unterstützt werden.

5.4 Schnittstellen und Eingangsdaten

5.4.1 Schnittstellen zur Softwareumgebung des WVU

Um die Wassermengenanalyse zu automatisieren, werden zentrale IT-Systeme eines WVU mittels Schnittstellen an das GIS angebunden. Die in diesen Systemen gespeicherten Daten werden nicht mehr nur für einen spezifischen Zweck, sondern mehrfach genutzt und isolierte Datenhaltungen werden aufgelöst. Durch die Verknüpfung der Daten über ihren Raumbezug entstehen neue Informationen. Die Anbindung erfolgt in der Regel über Sichten, also logische Relationen in einem Datenbanksystem, die über eine im Datenbankmanagementsystem gespeicherte Abfrage definiert werden. Jedes Mal wenn eine Abfrage erfolgt, wird ein lesender Zugriff auf die Datenbank hergestellt, der den jeweils aktuellen Datenbestand des betreffenden IT-Systems zeigt. Auf diese Weise kann *AWaRe* an die im Folgenden beschriebenen IT-Systeme angebunden werden.

Prozessleitsystem Das Prozessleitsystem dient der Steuerung und Überwachung eines Wasserversorgungssystems. Es registriert und archiviert große Mengen an Messwerten (Durchflüsse, Zählerstände, Füllstände, Drücke) und Meldungen über Betriebszustände von Pumpen und Armaturen, die für die automatisierte Wassermengenanalyse von Bedeutung sind. Daten des Prozessleitsystems gehen in die Berechnung der Rohrnetzeinspeisung Q_N (s. Abschnitt 5.5.1) und die Ermittlung des Wassereigenverbrauchs in Wasserwerken $Q_{AN.1}$ (s. Abschnitt 5.5.3) ein. Weiterhin werden Daten aus dem Leitsystem für die Ermittlung der Wasserentnahmen für Leitungsspülungen $Q_{AN.2}$ und Brandbekämpfung $Q_{AN.4}$ (s. Abschnitt 5.5.3) sowie die Bestimmung von realen Wasserverlusten aus Behälterüberläufen $Q_{VR.1}$ und Leitungsleckagen $Q_{VR.3}$ (s. Abschnitt 5.5.5) verwendet.

Verbrauchsabrechnung Softwarelösungen für die Verbrauchsabrechnung dienen der Verwaltung der Kunden, Abnahmestellen und Verträge. Außerdem werden sie für die Organisation der Kundenwasserzählerablesung (Tour- und Laufwegplanung) und der Archivierung und Plausibilisierung der abgelesenen Zählerstände verwendet. Die Software enthält üblicherweise Funktionen zur Schätzung und Prognose von Verbräuchen sowie für die Verwaltung der Tarife, der Abrechnungstermine und der Rechnungslegung. Daten aus der Verbrauchsabrechnung gehen in die Berechnung der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AI} (s. Abschnitt 5.5.2) sowie der Abgrenzungsverluste $Q_{VS.1}$ und Zählerabweichungen $Q_{VS.2}$ (s. Abschnitt 5.5.4) ein.

Zählermanagement Die Software für die technische Zählerverwaltung sammelt Informationen zum Zählerpark eines WVU. Relevante Informationen für die Wassermengenanalyse sind Zählertyp, Baujahr, Eichdatum, Messbereich und Fehlerkurve. Daten aus dem Zählermanagement gehen in die Berechnung der Zählerabweichungen an Kundenwasserzählern $Q_{VS.2}$ und Betriebswasserzählern $Q_{VS.3}$ ein (s. Abschnitt 5.5.4).

Arbeitsvorbereitung Softwarelösungen für Arbeitsvorbereitung bzw. Auftragsmanagement dienen der Organisation der innerbetrieblichen Auftragsabwicklung und der Planung und

Kontrolle der Ressourcen Arbeitskraft und Material. Aufträge werden erstellt, protokolliert und an Mitarbeiter vergeben. Der aufgewendete Ressourceneinsatz wird über Systeme zur Zeiterfassung dokumentiert. Daten der Arbeitsvorbereitung gehen in die Ermittlung von nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgaben Q_{AN} ein (s. Abschnitt 5.5.3). Dies sind z.B. Leitungsspülungen $Q_{AN,2}$ aber auch Reparaturen und Baumaßnahmen $Q_{AN,3}$.

Schadensdatenbank Schäden an Leitungen und Armaturen sind gemäß DVGW Arbeitsblatt W 402 (2010) anhand eines Schadensprotokolls zu dokumentieren, um belastbare Aussagen über den Rohrnetzzustand für die Instandhaltung zu gewinnen. In der Regel werden diese Schadensprotokolle mit Aussagen zu Schadensart, -stelle und -ursache sowie Umgebungs- und Zustandsdaten in digitaler Form in einer Schadensdatenbank archiviert. Daten der Schadensdatenbank gehen in die Bestimmung von realen Wasserverlusten aus Leitungsleckagen $Q_{VR,3}$ (s. Abschnitt 5.5.5) und in die Ursachenanalyse (s. Abschnitt 5.7) ein.

Isolierte Datenbanken Neben den genannten IT-Systemen gibt es in einem WVU in der Regel auch isolierte Datenbanken, die für die Wasserbilanz relevant sein können. Dazu gehören beispielsweise die Dokumentation von Behälterüberläufen, manuelle Ablesungen von Betriebswasserzählern oder auch Informationen der Feuerwehr zu Brandeinsätzen. Diese Datenbanken werden häufig in Tabellenkalkulationsprogrammen, aber mitunter auch von einzelnen Mitarbeitern als Listen in Papierform geführt, so dass von Fall zu Fall individuelle Lösungen für ihre Anbindung an *AWaRe* zu entwickeln sind.

5.4.2 Schnittstellen zu anderen Modulen von *AWaRe*

Abbildung 5.1 illustriert, dass die benötigten Eingangsdaten aus bestehenden IT-Systemen des WVU über Sichten an das zentrale GIS angebunden und in einer Austauschdatenbank mit fest definiertem Format bereitgestellt werden. Hierbei handelt es sich um eine SQLite-Datenbank im DB3-Format. Neben diesen Daten verarbeitet die *WMA* auch proprietäre Daten des GIS und tauscht Informationen mit dem hydraulischen Modell aus.

GIS-Leitungskataster Aus dem GIS-Leitungskataster werden Informationen über die physikalischen Bestandteile des Wasserversorgungssystems (Rohre, Armaturen, Behälter, Pumpen) und ihre spezifischen Eigenschaften an die *WMA* übergeben. Weiterhin werden im Leitungskataster die Lage der Abnahmestellen, Kundenwasserzähler und Betriebswasserzähler und ihre Zuordnung zu Versorgungszonen dokumentiert, die für die Berechnung der Rohrnetzeinspeisung Q_N und -abgaben Q_A benötigt werden. Nach der erfolgreichen Berechnung der Wasserbilanz werden die Ergebnisse an das GIS übergeben, wo sie zur Auswertung visualisiert werden können. Zur weiteren Bearbeitung der Ergebnisse stehen dem Benutzer in der GIS-Oberfläche verschiedene Analysewerkzeuge zur Verfügung.

Hydraulisches Modell Das hydraulische Modell und die *WMA* sind über eine gemeinsame Austauschdatenbank an das GIS angebunden. Über diese Schnittstelle können Randbedingungen für Simulationsrechnungen in das hydraulische Modell eingelesen werden. Dabei handelt es sich um die berechneten Rohrnetzabgaben und Wasserverluste sowie verschiedene Lastfaktoren (minimaler, mittlerer und maximaler Wasserverbrauch), die als Ergebnisse der Wasserbilanz des *WMA*-Moduls WB (s. Abschnitt 5.5) zur Verfügung stehen. Anhand dieser Randbedingungen werden im hydraulischen Modell stationäre Berechnungen durchgeführt.

Die simulierten Drücke und Fließgeschwindigkeiten der verschiedenen Lastfälle werden über die Austauschdatenbank an die WMA zurückgegeben, wo sie als Eingangsdaten in die Ermittlung verschiedener Kennzahlen (z.B. ILI, s. Abschnitt 5.6), die Ursachenanalyse (z.B. Wechselwirkung Druck und Schadenshäufigkeit, s. Abschnitt 5.7) sowie die Bewertung von Gegenmaßnahmen (z.B. Potenzial von Druckmanagement) eingehen. Außerdem können die Simulationsergebnisse der Rohrnetzberechnung im GIS visualisiert werden.

5.4.3 Topologische Anforderungen der WMA

Um eine Wassermengenanalyse durchführen zu können, muss das Wasserversorgungssystem abstrahiert und auf wesentliche Elemente reduziert werden. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft an einem Ausschnitt aus dem Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim, wie es in einem GIS-basierten Leitungskataster dargestellt wird.

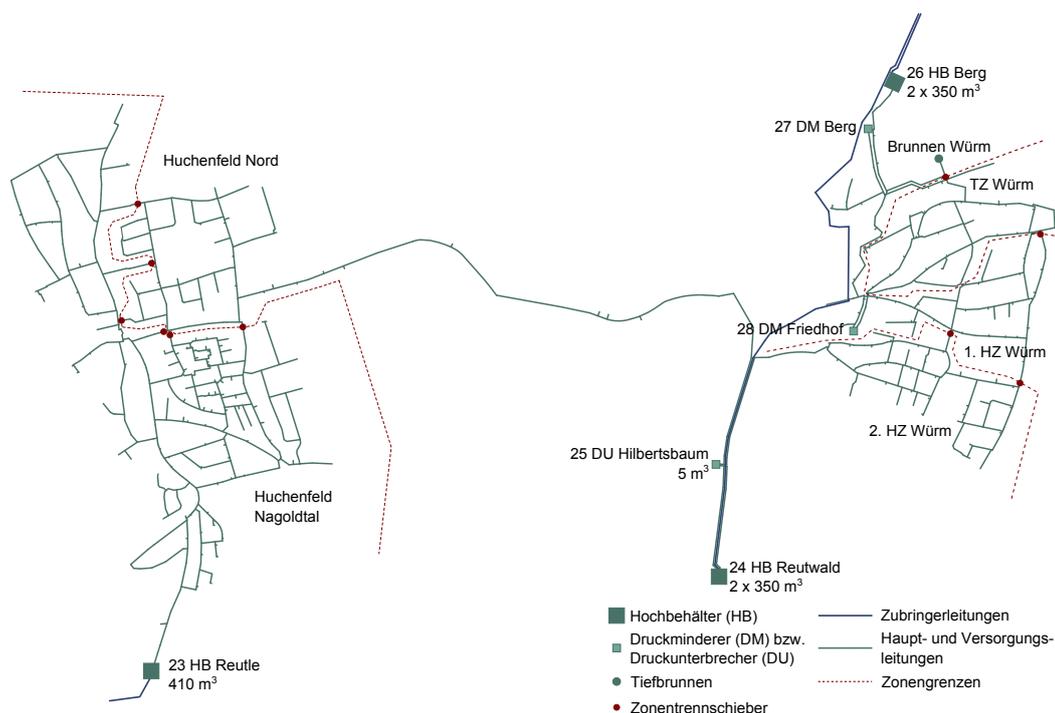


Abbildung 5.2: Darstellung des Pilotgebiets 1 (Topologie s. Abbildung 6.13) im GIS-Leitungskataster²

Neben den sichtbaren Elementen wie Behältern, Tiefbrunnen und Rohrleitungen enthält das GIS eine Vielzahl weiterer Informationen wie zum Beispiel Attribute der Leitungen, Lage von Hydranten oder Kundenwasserzählern, die in Abbildung 5.2 nicht dargestellt sind. Das komplexe Wasserversorgungssystem, das im GIS anhand vieler tausend Elemente beschrieben wird, muss zu übergeordneten Komponenten zusammengefasst werden. Diese sind in Abbildung 5.2 schematisch abgebildet und werden im Folgenden erläutert. Drei dieser Komponenten sind obligatorisch und reichen aus, um die Topologie einfacher Systeme darzustellen und mit der WMA zu berechnen:

²Quelle: COSVega (2014)

Quellen / Weiterverteiler Quellen stellen die Systemgrenzen dar. An Quellen wird Wasser in das System eingespeist (Brunnen, Aufbereitungsanlagen, Fremdwasserbezug) oder aus dem System abgegeben (Weiterverteiler).

Bilanzierungszonen Eine Bilanzierungszone (BZ) fasst alle Elemente eines Verteilungsnetzes zusammen. Sie enthält die Informationen über Rohrleitungen und Armaturen, Abnehmer, Kundenwasserzähler und Leitungsschäden. Jeder BZ können verschiedene Arten von Wasserabgaben zugeordnet werden, z.B. Wasserverbrauch der Abnehmer, Spülungen oder Löschwasserentnahmen.

BWZ Betriebswasserzähler (BWZ) messen die Einspeisemengen in das System und in einzelne Bilanzierungszonen. Sie dienen als Verbinder und werden jeweils zwischen zwei anderen Komponenten angeordnet.

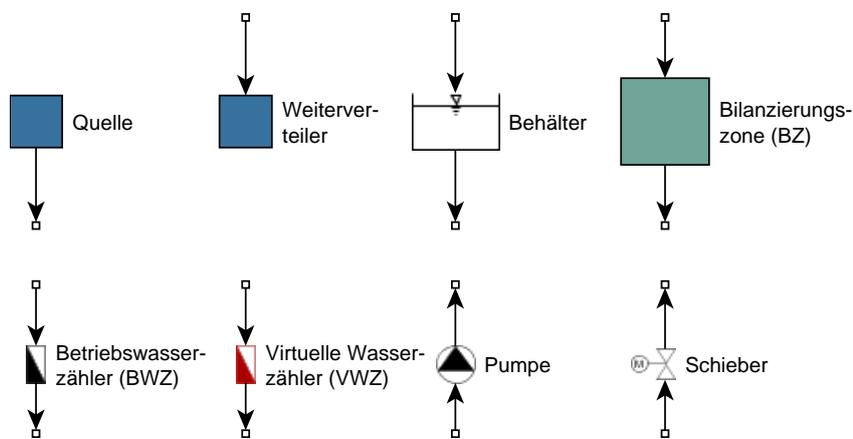


Abbildung 5.3: Komponenten zur Abstraktion der Topologie eines Wasserversorgungssystems

Zwei weitere Komponenten erhöhen den Detaillierungsgrad des abstrahierten Wasserversorgungssystems, sind aber nicht zwingend erforderlich:

Behälter Behälter sind zum Ausgleich von Bedarfsschwankungen zwischen Quellen und Bilanzierungszonen oder zwischen zwei oder mehreren Bilanzierungszonen angeordnet. In Behältern werden Wässer mit unterschiedlichem spezifischem Energiegehalt und unterschiedlicher Gesteungskosten gemischt. Weiterhin können Behältern Wasserverluste infolge von Leckagen und Undichtheit zugeordnet werden.

VWZ Virtuelle Wasserzähler (VWZ) werden in Kombination mit Behältern verwendet, um Lücken in der Rohrnetzüberwachung eines WVU zu schließen. Über die Auswertung von Füllstandsänderungen im Behälter, Einspeise- oder Entnahmemengen von BWZ und der Behältergeometrie kann durch die Verwendung eines VWZ ein fehlendes Durchflussmessgerät ersetzt werden.

Weiterhin gibt es zwei Komponenten, die der zeitlichen Variabilität der Topologie von Wasserversorgungsnetzen Rechnung tragen. Ihre Verwendung ist ebenfalls fakultativ:

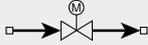
| Komponente | Tabelle | Inhalte |
|---|---|---|
| Quelle  | <i>[t_wasserherkunft]</i> | Beschreibung der Quelle |
| BWZ  | <i>[t_bwz]</i> <i>[t_bwz_zaehlertyp]</i> <i>[t_bwz_fehlerkurve]</i> <i>[t_bwz_ablesungen]</i> | Liste der Betriebswasserzähler Beschreibung des BWZ-Zählertyps Fehlerkurven der BWZ-Zählertypen Messwerte der BWZ |
| VWZ  | <i>[t_vwz]</i> | Liste der Virtuellen Wasserzähler |
| BZ  | <i>[t_zonen]</i> <i>[t_rohrleitungen]</i> <i>[t_knoten]</i> <i>[t_schaeden]</i> <i>[t_schadensreparatur]</i> <i>[t_abnehmer]</i> <i>[t_verbrauchskurven]</i> <i>[t_kwz]</i> <i>[t_kwz_zaehlertyp]</i> <i>[t_kwz_fehlerkurve]</i> <i>[t_kwz_ablesungen]</i> <i>[t_pauschalkunden]</i> <i>[t_wvu_bedarf_netze]</i> <i>[t_lw_bedarf]</i> <i>[t_reparaturen]</i> <i>[t_sonstige_abgaben]</i> <i>[t_leitungsbestand]</i> <i>[t_leitungsgruppen]</i> | Liste der zu untersuchenden Zonen Beschreibung des Rohrnetzes Beschreibung der Knoten Beschreibung der Schäden Information zu Schadensreparaturen Liste der Abnehmer in den BZ Abgerechneter Verbrauch der Abnehmer Liste der Kundenwasserzähler Beschreibung des KWZ-Zählertyps Fehlerkurve jedes KWZ-Zählertyps Abgelesene KWZ-Zählerstände Liste der Pauschalkunden Leitungsspülungen Liste der Brandeinsätze Liste von Arbeiten im Rohrnetz Sonstige Wasserabgaben Historische Entwicklung des Rohrnetzes Definition von Leitungsgruppen |
| Behälter  | <i>[t_hb_kenndaten]</i> <i>[t_hb_querschnitte]</i> <i>[t_hb_fuellstand]</i> <i>[t_hb_ueberlauf]</i> <i>[t_hb_dichtheit]</i> | Behältereigenschaften Behältergeometrie Füllstandsmesswerte von Behältern Informationen zu Behälterüberlauf Informationen zu Behälter-Leckagen |
| Pumpe  | <i>[t_pumpen]</i> <i>[t_zustand_pumpen]</i> <i>[t_sz]</i> <i>[t_sz_ablesungen]</i> | Pumpeneigenschaften Zustandsmeldungen (an / aus) Liste der Stromzähler Abgelesene Stromzählerstände |
| Schieber  | <i>[t_armaturen]</i> <i>[t_zustand_armaturen]</i> | Liste der Armaturen Zustandsmeldungen (auf / zu) |

Abbildung 5.4: Struktur der Austauschdatenbank zur Beschreibung der Komponenten

Pumpen Durch das An- und Abschalten von Pumpen werden Bilanzierungszonen oder andere Komponenten temporär verbunden oder voneinander getrennt, wodurch die Wasserbilanz beeinflusst wird. Außerdem tragen Pumpen Energie in das System ein und erhöhen damit den spezifischen Energiegehalt des Wassers.

Schieber Das Öffnen und Schließen eines Schiebers verändert ebenfalls die Topologie eines Wasserversorgungssystems, indem Bilanzierungszonen verbunden oder getrennt werden oder die Einspeisung aus einer Quelle temporär unterbunden wird. Die Information über den Betriebszustand eines E-Schiebers kann aus dem Leitsystem gewonnen werden. Grundsätzlich können auch manuell betätigte Schieber berücksichtigt werden, wenn Veränderungen an der Schieberstellung protokolliert werden.

Jede dieser Komponenten wird durch eine oder mehrere von insgesamt über 30 Tabellen einer Austauschdatenbank definiert, die in Abbildung 5.4 aufgelistet sind. Abbildung 5.4 zeigt, dass beispielsweise jeder Behälter mittels fünf Tabellen beschrieben wird: In $[t_hb_kenndaten]$ werden alle Behälter innerhalb der Systemgrenzen der Wasserbilanz gesammelt und anhand einer Reihe von Attributen (Baujahr, Typ, Sohlhöhe, Grundfläche, Volumen etc.) beschrieben. Die Kubatur von Behältern mit über die Höhe variierender Querschnittsfläche, wie insbesondere bei Wassertürmen und alten Wasserbehältern mit gemauerten Gewölben anzutreffen, ist in $[t_hb_querschnitte]$ festgelegt. In $[t_hb_fuellstand]$ werden Messwerte aus dem Prozessleitsystem abgelegt, die die Füllstandsganglinie im Bilanzierungszeitraum abbilden. Die Tabellen $[t_hb_ueberlauf]$ und $[t_hb_dichtheit]$ geben Auskunft über mögliche Wasserverluste an jedem Behälter. Die Komponente BZ besteht einerseits aus den physikalischen Komponenten des Rohrnetzes innerhalb einer Bilanzierungszone, wie zum Beispiel $[t_rohrleitungen]$ und $[t_armaturen]$. Die anderen zu BZ zugeordneten Tabellen beschreiben die Verbraucher dieser Zone und den abgerechneten Wasserverbrauch (über eine Schnittstelle zur Verbrauchsabrechnung), die installierten Kundenwasserzähler ($[t_kwz]$) und deren Eigenschaften sowie alle weiteren Rohrnetzabgaben, die in dieser Zone auftreten. Die Inhalte und Funktionen der übrigen in Abbildung 5.4 aufgezählten Tabellen werden in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

Bei der Abstraktion des Wasserversorgungssystems muss gewährleistet werden, dass die topologischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Komponenten korrekt wiedergegeben werden. In Abschnitt 6.5 sind die Topologien der untersuchten Pilotgebiete schematisch dargestellt. Die in Abbildung 5.4 aufgezählten Tabellen werden von der WMA eingelesen und an die Berechnungsmodule WB (Wasserbilanz), PI (Kennzahlen) und UA (Ursachenanalyse) übergeben, deren Funktionalität in den Abschnitten 5.5 bis 5.7 beschrieben wird.

5.5 Modul WB - Wasserbilanz

5.5.1 Ermittlung der Rohrnetzeinspeisung Q_N

Den ersten Schritt zur Berechnung der Wasserbilanz stellt die Ermittlung der Rohrnetzeinspeisung Q_N in eine Bilanzierungszone dar. Informationen der Tabelle $[t_zonen]$ werden genutzt, die zu untersuchenden Bilanzierungszonen zu identifizieren. Dann wird anhand aller Einspeisemengen und Entnahmemengen, die an BWZ und VWZ für diese Zonen registriert werden, mittels Gleichung 5.1 die tägliche Netto-Einspeisemenge berechnet.

$$Q_N(d_0, d_e) = \sum_{d_0}^{d_e} (Q_{N.1} + Q_{N.2}) - \sum_{d_0}^{d_e} (Q_{N.3} + Q_{N.4}) \quad (5.1)$$

Darin sind d_0 das Anfangsdatum und d_e das Enddatum des Bilanzierungszeitraums und $Q_N(d_0, d_e)$ [m^3] die Netto-Einspeisemenge im Bilanzierungszeitraum. $Q_{N.1}$ bis $Q_{N.4}$ werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Einspeisung an Betriebswasserzählern ($Q_{N.1}$) Informationen über die BWZ des WVU werden in der Tabelle $[t_bwz]$ geführt, deren Aufbau in Tabelle 5.1 dargestellt ist. Anhand der Topologie des Wasserversorgungssystems (Felder von_zone , $nach_zone$) kann eindeutig bestimmt werden, in welche Bilanzierungszone ein BWZ Wasser einspeist.

Tabelle 5.1: Tabelle $[t_bwz]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------|----------------|---|
| id_bwz | | Eindeutige ID |
| id_zaehlertyp | | Eindeutige ID die auf $[t_bwz_zaehlertyp]$ verweist |
| id_manuell | | ID der manuellen Ablesungen |
| id_mw | | ID der Messwerte aus dem Leitsystem |
| id_zw | | ID der Zählwerte aus dem Leitsystem |
| name | | Vom WVU verwendete Bezeichnung des BWZ |
| von_zone | | ID der Zone, aus der Wasser entnommen wird |
| nach_zone | | ID der Zone, in die Wasser eingespeist wird |
| baujahr | $[jjjj/mm/dd]$ | Baujahr des BWZ |
| einbaudatum | $[jjjj/mm/dd]$ | Einbaudatum des BWZ |
| eichdatum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der letzten Eichung |
| status | | Im Netz; ausgebaut; im Lager |

Die Messwerte der BWZ werden aus der Tabelle $[t_bwz_ablesungen]$ eingelesen, deren Aufbau in Tabelle 5.2 dargestellt ist. Im Gegensatz zu KWZ gibt es bei BWZ nicht nur Zählerstandablesungen, sondern verschiedene Typen von Messwerten:

- manuelle Ablesungen: Summenwerte $[m^3]$
- Messwerte (MW): momentane Durchflüsse $[m^3/h]$
- Zählwerte (ZW): Kubikmeterintervalle $[m^3]$

Die Auswertung der vorhandenen Messwerte aller BWZ, die die Ströme in und aus einer Zone erfassen, entscheidet über die von der WMA verwendeten Verfahren zur Bestimmung der Leckagemengen $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$, Spülmengen $Q_{AN.2}$ und Löschwasserentnahmen $Q_{AN.4}$. Liegen an allen BWZ über den gesamten Betrachtungszeitraum Werte in Minutenintervallen vor, können Spülmengen $Q_{AN.2}$ automatisiert anhand der Analyse der Einspeiseganglinie berechnet werden (s. Abschnitt 5.5.3). Liegen die Messwerte mindestens in Stundenintervallen vor, können Löschwasserentnahmen $Q_{AN.4}$ und Leckagemengen $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ automatisiert anhand der Analyse der Einspeiseganglinie berechnet werden (s. Abschnitte 5.5.3 und 5.5.5). Sind die Intervalle größer als eine Stunde, ist eine detaillierte Analyse nicht möglich. $Q_{AN.2}$, $Q_{AN.4}$, $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ werden pauschal anhand von Richtwerten bestimmt.

Die Plausibilität und Vollständigkeit der Messwerte wird geprüft. Treten verhältnismäßig kurze Lücken in den Messreihen auf, werden die fehlenden Werte durch Interpolation aus den Messwerten der Zeiträume vor und nach der Lücke geschlossen. Kommt es zu negativen Einspeisemengen, wie es beispielsweise beim Überschreiten des Zählerhöchststands eines Rollenzählwerks (sogenannter Überlauf) der Fall ist, wird die Einspeisung im betroffenen Zeitraum näherungsweise anhand des vorangehenden und des nachfolgenden Wertes ermittelt. Anhand der Kennung wird für jeden Messwert überprüft, ob es sich um einen regulären Messwert handelt oder ob eine Störung vorlag.

Nach der Plausibilitätskontrolle wird aus den Messwerten aller Einspeisezähler die tägliche Einspeisemenge in eine Bilanzierungszone errechnet und über den Bilanzierungszeitraum

Tabelle 5.2: Tabelle $[t_bwz_ablesungen]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------|----------------------|---|
| id_bwz | | Eindeutige ID die auf $[t_bwz]$ verweist |
| zaehlwerk | | Bei Verbundzählern: Haupt- oder Nebenzählwerk |
| erfassungsart | | Manuell oder per Fernwirktechnik |
| ablesedatum | | Datum und Uhrzeit |
| messwert | $[m^3/h]$ o. $[m^3]$ | Zählerstand, Durchfluss oder Menge |
| typ | | Manuelle Ablesung; Messwert; Zählwert |
| kennung | | Regulärer Wert; Übertragungsausfall; Ersatzwert |

aufsummiert. Liegen für einen BWZ mehrere Messreihen vor (z.B. monatliche manuelle Ablesungen der Zählerstände, Messwerte in Minutenintervallen und Zählwerte in Stundenintervallen), wird die gesamte Einspeisemenge für jede einzelne Reihe gebildet und die Ergebnisse werden untereinander verglichen. Weicht ein Ergebnis signifikant ($\pm 5\%$) von den anderen ab, wird eine Warnmeldung ausgegeben. In die Wasserbilanz wird vorzugsweise das Ergebnis aus Zählwerten übernommen. Liegen keine Zählwerte vor, wird auf Messwerte oder letztlich auf manuelle Ablesungen zurückgegriffen. Als Ergebnis wird für jeden BWZ die gesamte Einspeisemenge über den gesamten Bilanzierungszeitraum sowie die Einspeisemenge jedes einzelnen Tages in diesem Zeitraum protokolliert. Liegen Messwerte in Minutenintervallen vor, werden diese außerdem zur Analyse der Messabweichung verwendet (s. Abschnitt 5.5.4).

Einspeisung an virtuellen Wasserzählern ($Q_{N,2}$) Üblicherweise werden in einem Wasserversorgungssystem nicht alle Durchflussmengen, die für die zonenweise Erstellung der Wasserbilanz erforderlich sind, mit Messgeräten überwacht, da die Kosten für Installation und Betrieb solcher Messgeräte hoch sind. Um dennoch die Rohrnetzeinspeisung Q_N in jede Bilanzierungszone möglichst genau bestimmen zu können, werden so genannte virtuelle Wasserzähler (VWZ) verwendet, die über die Tabelle $[t_vwz]$ (s. Tabelle 5.3) in die Topologie des Wasserversorgungssystems eingebunden werden.

Tabelle 5.3: Tabelle $[t_vwz]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-----------|---------|---|
| id_vwz | | Eindeutige ID |
| name | | Vom WVU verwendete Bezeichnung des VWZ |
| von_zone | | ID der Zone, aus der Wasser entnommen wird |
| nach_zone | | ID der Zone, in die Wasser eingespeist wird |

VWZ können nur auf Einspeise- oder Entnahmeleitungen von Behältern eingesetzt werden. Für Behälter mit einem VWZ wird überprüft, in welchen zeitlichen Intervallen die Messwerte der einspeisenden oder entnehmenden BWZ und des Behälterfüllstands in der Austauschdatenbank vorliegen. Liegen die Messungen in Minutenintervallen vor und ist die Behältergeometrie in $[t_hb_querschnitte]$ exakt definiert, wird die Durchflussmenge $Q_{N,2}$ am VWZ als Differenz zwischen eingespeistem bzw. entnommenem Volumen und Volumenänderung im Behälter über die Zeit berechnet. Dieser Ansatz findet beispielsweise Verwendung, wenn die (intermittierende) Förderung einer Pumpe in einen Behälter mit einem Messgerät überwacht

wird, nicht aber die Abgabe des Behälters in die Bilanzierungszone. Anhand der berechneten Werte ist es möglich, detailliertere Analysen für die Bilanzierungszone durchzuführen, um beispielsweise Spülwasserentnahmen, Löschwassermengen oder Leckageverluste zu bestimmen (s. Abschnitte 5.5.3 und 5.5.5), die ohne den VWZ nicht möglich wären. Abbildung 5.5 zeigt drei verschiedene Anwendungsfälle, bei denen VWZ zum Einsatz kommen.

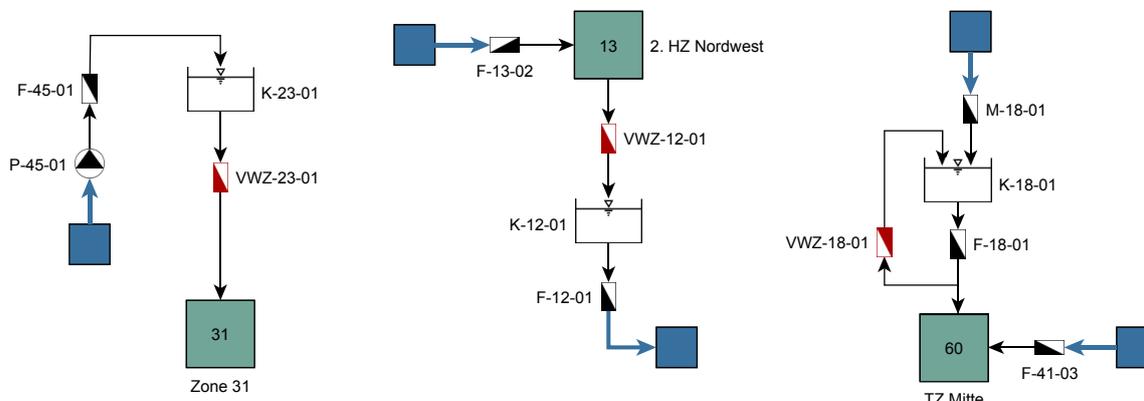


Abbildung 5.5: Verschiedene Anwendungsfälle für VWZ: Einspeisung aus HB in Zone (links), Entnahme aus Zone in HB (Mitte) und Einspeisung in Gegenbehälter (rechts)

Da die berechneten Werte in der Regel eine große Schwankungsbreite aufweisen, ist es notwendig, die berechnete Ganglinie mithilfe eines Filters zu glätten. Der Filter muss dabei gewährleisten, dass Ausreißer erkannt und eliminiert werden. Gleichzeitig sollen kurzfristige Durchflussschwankungen infolge von Leitungsspülungen o.ä., die im Rahmen der Wassermengenanalyse quantifiziert werden sollen, erhalten bleiben. Die besten Ergebnisse werden bei der Verwendung eines Medianfilters erzielt. Hierbei handelt es sich um einen nichtlinearen Filter aus der Klasse der Rangordnungsfiler, der zunächst die Messwerte innerhalb einer definierten Umgebung eines zentralen Messwerts nach ihrer Größe sortiert. Wenn der zentrale Messwert oberhalb des 90%-Quantils bzw. unterhalb des 10%-Quantils der Umgebung liegt, wird er durch den Median der Umgebung ersetzt. Abbildung 5.6 zeigt berechnete Einspeisemengen an einem VWZ vor und nach der Glättung durch den Filter.

Die berechneten Durchflüsse des VWZ werden im Arbeitsspeicher der WMA behalten. Analog zu $Q_{N,1}$ werden die berechneten Durchflüsse auf die tägliche Einspeisemenge in eine Bilanzierungszone umgerechnet und über den Bilanzierungszeitraum aufsummiert.

Entnahme an Betriebswasserzählern ($Q_{N,3}$) Wird Wasser aus einer Bilanzierungszone entnommen und mittels BWZ registriert, wird die entnommene Menge analog zur Einspeisemenge über den Bilanzierungszeitraum aufsummiert. Hierzu wird auf die gleiche Weise wie bei $Q_{N,1}$ verfahren.

Entnahme an virtuellen Wasserzählern ($Q_{N,4}$) Wird Wasser aus einer Bilanzierungszone entnommen, ohne von einem BWZ registriert zu werden, kann die entnommene Menge anhand eines VWZ in Kombination mit einem Behälter näherungsweise bestimmt werden. Hierzu wird auf die gleiche Weise wie bei $Q_{N,2}$ verfahren.

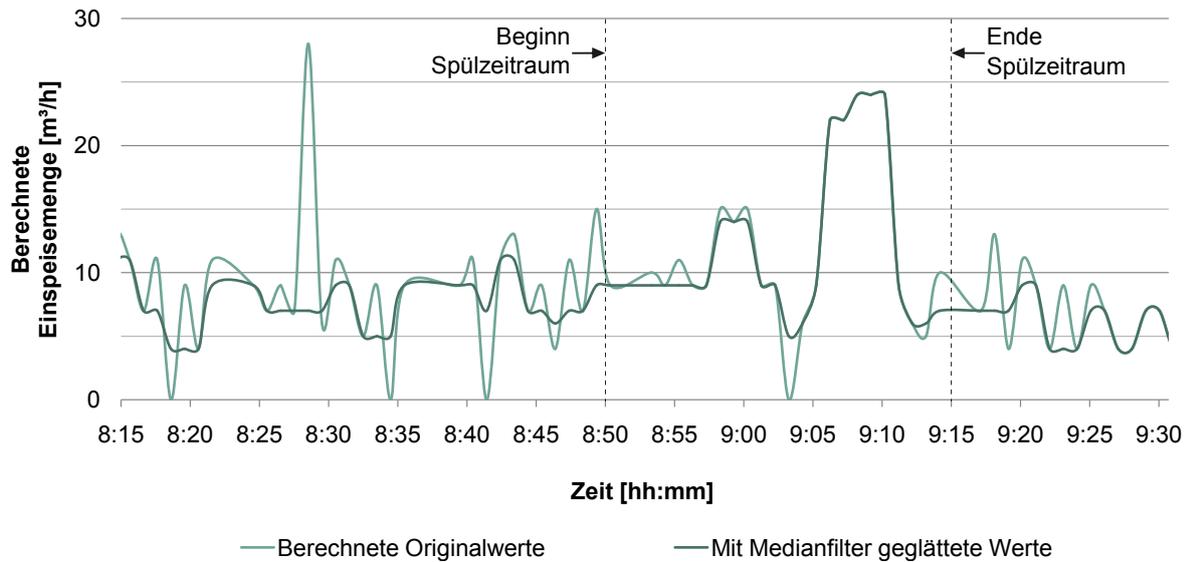


Abbildung 5.6: Glättung berechneter Einspeisemengen an einem VWZ mittels Medianfilter

5.5.2 Ermittlung der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AI}

Nach der Quantifizierung der Rohrnetzeinspeisung Q_N wird die in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe Q_{AI} ermittelt. Q_{AI} wird als Summe des abgerechneten Verbrauchs von Zählerkunden ($Q_{AI.1}$) und Pauschalkunden ($Q_{AI.2}$) gebildet. Der aus Zählerablesungen berechnete Wasserverbrauch $Q_{AI.0}$ dient als Kontrollwert zur Bestimmung der Abgrenzungsverluste (s. Abschnitt 5.5.4).

Aus Zählerablesungen berechneter Wasserverbrauch ($Q_{AI.0}$) Informationen über die KWZ des WVU werden in der Tabelle $[t_kwz]$ geführt, deren Aufbau in Tabelle 5.4 dargestellt ist. Über die Zuordnung des KWZ zu einer Abnahmestelle in der Tabelle $[t_abnehmer]$ (s. Tabelle 5.6) kann der gemessene Wasserverbrauch einer Bilanzierungszone zugeordnet werden.

Tabelle 5.4: Tabelle $[t_kwz]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------|----------------|---|
| id_kwz | | Eindeutige ID |
| id_abnehmer | | Eindeutige ID die auf $[t_abnehmer]$ verweist |
| id_zaehlertyp | | Eindeutige ID die auf $[t_kwz_zaehlertyp]$ verweist |
| baujahr | $[jjjj/mm/dd]$ | Baujahr des Zählers |
| einbaudatum | $[jjjj/mm/dd]$ | Einbaudatum des Zählers |
| eichdatum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der letzten Eichung |
| status | | Im Netz; ausgebaut; im Lager |

Der Bestand an KWZ unterliegt ständigen Veränderungen, wie beispielsweise der Installation neuer Zähler bei Neukunden, dem Ausbau bestehender Zähler infolge von Kundenwegzug oder dem Austausch bestehender Zähler nach sechs Jahren im Rahmen der Eichpflicht. Wird ein KWZ innerhalb des Betrachtungszeitraums ausgetauscht, ist dies

Tabelle 5.5: Tabelle $[t_kwz_ablesungen]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------|----------------|---|
| id_kwz | | Eindeutige ID die auf $[t_kwz]$ verweist |
| zaehlwerk | | Bei Verbundzählern: Haupt- oder Nebenzählwerk |
| erfassungsart | | Manuell durch WVU oder Kunden, Fernauslesung |
| ablesedatum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Ablesung |
| ablesestand | $[m^3]$ | Abgelesener Zählerstand |

bei der Berechnung des gemessenen Wasserverbrauchs zu berücksichtigen. Die abgelesenen Zählerstände der KWZ sind in der Tabelle $[t_kwz_ablesungen]$ abgelegt, deren Aufbau in Tabelle 5.5 dargestellt ist.

Für die korrekte Ermittlung und Umrechnung des Wasserverbrauchs auf den Betrachtungszeitraum (*Annualisierung*) anhand der abgelesenen Zählerstände sind verschiedene Ansätze möglich, die von Renaud u. a. (2009) beschrieben werden. Es sind generell folgende Konstellationen möglich:

- letzte Ablesung vor dem Ende des Betrachtungszeitraums
- letzte Ablesung nach dem Ende des Betrachtungszeitraums
- mehrere Ablesungen im Betrachtungszeitraum
- letzte Ablesung vor dem Beginn des Betrachtungszeitraums
- erste Ablesung nach dem Ende des Betrachtungszeitraums

Sind Ablesungen nach dem Ende des Betrachtungszeitraums verfügbar, kann der Wasserverbrauch mittels *a posteriori*-Verfahren ermittelt werden. Ist dies nicht der Fall, kommen *a priori*-Verfahren zur näherungsweisen Bestimmung des Wasserverbrauchs zum Einsatz. Nach Renaud u. a. (2009) stehen drei Verfahren zur Verfügung:

1. Ermittlung des Wasserverbrauchs ohne Korrektur

Hierbei handelt es sich um die einfachste Methode zur Ermittlung des Wasserverbrauchs. Dabei wird angenommen, dass der Wasserverbrauch im Betrachtungszeitraum der Differenz zweier aufeinanderfolgender Zählerablesungen entspricht, wie Abbildung 5.7 veranschaulicht. Der Wasserverbrauch wird *a priori* anhand Gleichung 5.2 und *a posteriori* anhand Gleichung 5.3 bestimmt.

$$Q_{AI.0}(d_0, d_e) = Q_{AI.0}(d_{n-1}, d_n) \quad (5.2)$$

$$Q_{AI.0}(d_0, d_e) = Q_{AI.0}(d_n, d_{n+1}) \quad (5.3)$$

Darin sind d_0 das Anfangsdatum und d_e das Enddatum des Betrachtungszeitraums, d_n das Datum der Zählerablesung im Betrachtungszeitraum n und $Q_{AI.0}(d_i, d_j)$ der abgelesene bzw. berechnete Wasserverbrauch im Zeitraum d_i bis d_j . Abbildung 5.7 zeigt deutlich, dass die Verfügbarkeit von Ablesedaten großen Einfluss auf das Ergebnis der Verbrauchsermittlung hat. Die Länge des Ablesezeitraums kann signifikant vom Betrachtungszeitraums abweichen. Da diese Methode mit einer hohen Ungenauigkeit behaftet ist, ist sie in der *WMA* nicht implementiert.

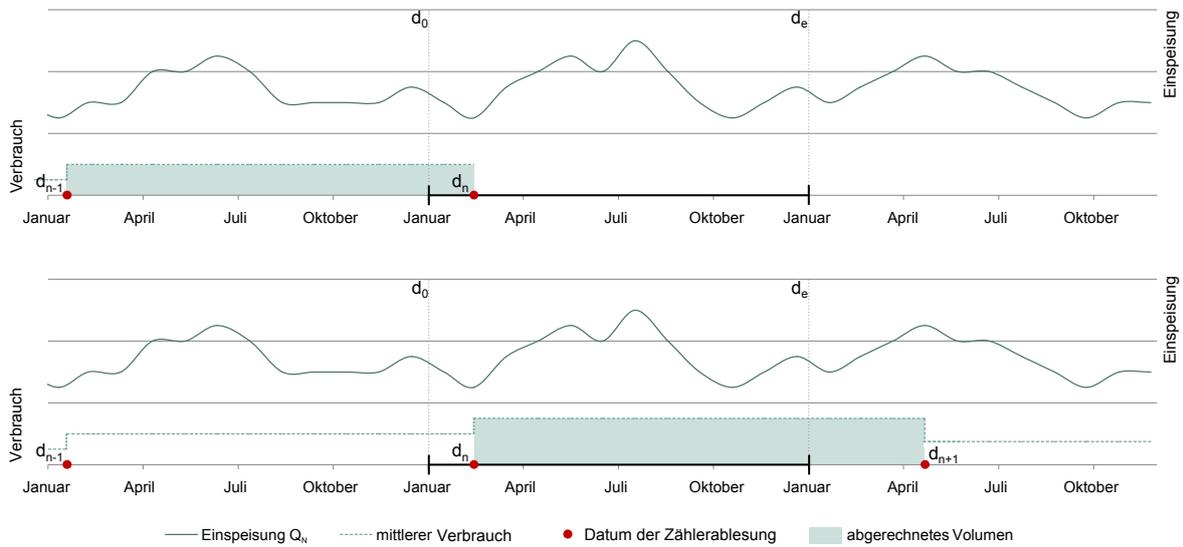


Abbildung 5.7: Ermittlung des Wasserverbrauchs ohne Korrektur *a priori* (oben) bzw. *a posteriori* (unten)

2. Zeitanteilige Berechnung des Wasserverbrauchs (*pro rata temporis*)

Eine genauere Bestimmung des Wasserverbrauchs erlaubt die zeitanteilige Berechnung des Wasserverbrauchs, die in Abbildung 5.8 dargestellt ist. Hierbei wird der Wasserverbrauch aus dem Ableszeitraum *a priori* anhand Gleichung 5.4 und *a posteriori* anhand Gleichung 5.5 proportional zur Zeit auf den Betrachtungszeitraum umgerechnet.

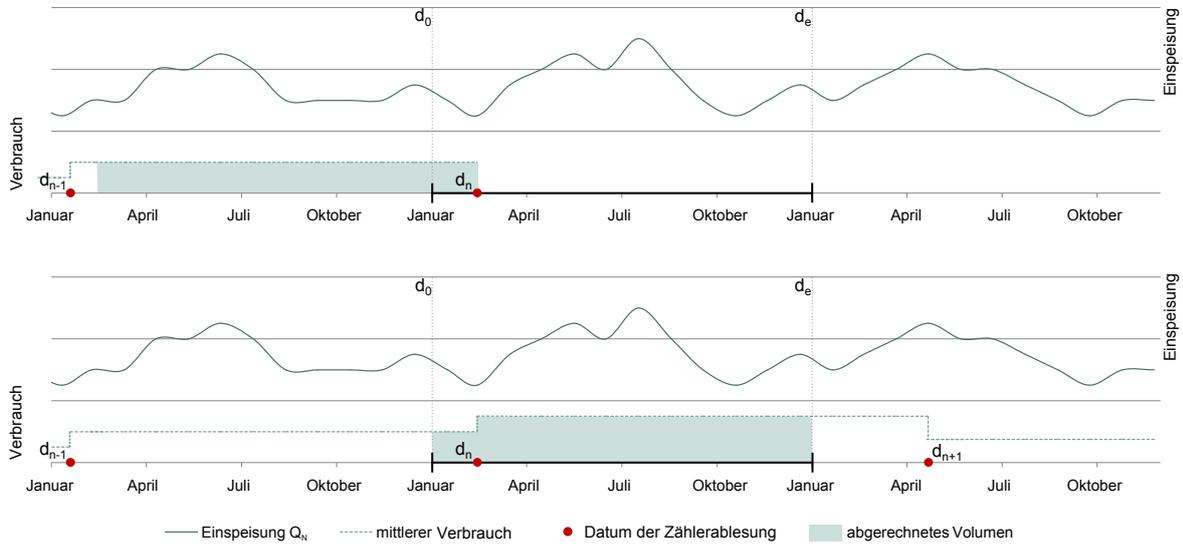


Abbildung 5.8: Zeitanteilige Berechnung des Wasserverbrauchs *a priori* (oben) bzw. *a posteriori* (unten)

$$Q_{AI.0}(d_0, d_e) = Q_{AI.0}(d_{n-1}, d_n) \times \frac{d_e - d_0}{d_n - d_{n-1}} \quad (5.4)$$

$$Q_{AI.0}(d_0, d_e) = Q_{AI.0}(d_{n-1}, d_n) \times \frac{d_n - d_0}{d_n - d_{n-1}} + Q_{AI.0}(d_n, d_{n+1}) \times \frac{d_e - d_n}{d_{n+1} - d_n} \quad (5.5)$$

3. Berechnung des Wasserverbrauchs proportional zur Einspeisemenge

Bei diesem Verfahren wird die Rohrnetzeinspeisung im Ablesezeitraum der Einspeisung im Betrachtungszeitraum gegenübergestellt. Dadurch wird bei der Berechnung des Wasserverbrauchs berücksichtigt, dass ein hoher Wasserverbrauch der Kunden zu einem Anstieg der Rohrnetzeinspeisung führt und umgekehrt. Der Wasserverbrauch wird *a priori* anhand Gleichung 5.6 und *a posteriori* anhand Gleichung 5.7 proportional zu der Einspeisemenge im Betrachtungszeitraum berechnet.

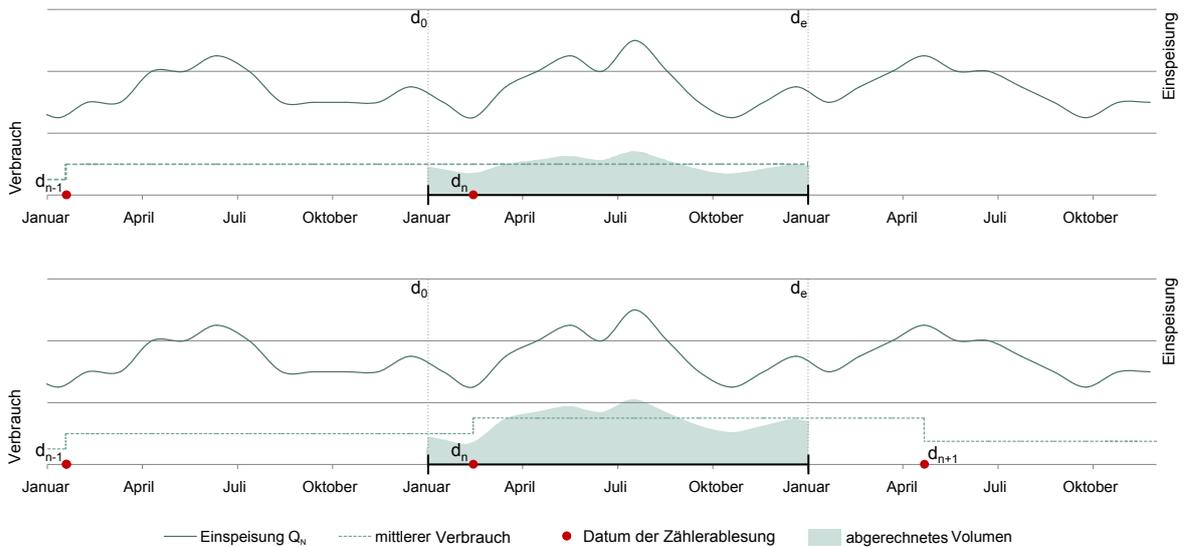


Abbildung 5.9: Berechnung des Wasserverbrauchs proportional zur Einspeisemenge *a priori* (oben) bzw. *a posteriori* (unten)

$$Q_{AI.0}(d_0, d_e) = Q_{AI.0}(d_{n-1}, d_n) \times \frac{Q_N(d_0, d_e)}{Q_N(d_{n-1}, d_n)} \quad (5.6)$$

$$Q_{AI.0}(d_0, d_e) = Q_{AI.0}(d_{n-1}, d_n) \times \frac{Q_N(d_0, d_n)}{Q_N(d_{n-1}, d_n)} + Q_{AI.0}(d_n, d_{n+1}) \times \frac{Q_N(d_n, d_e)}{Q_N(d_n, d_{n+1})} \quad (5.7)$$

Wurde der KWZ innerhalb des Betrachtungszeitraums d_0 bis d_e mehrmals abgelesen (z.B. monatlich oder quartalsweise), so entspricht der Verbrauch in diesen Intervallen der Differenz der abgelesenen Zählerstände. Für die Berechnung des Verbrauchs vor der ersten und nach der letzten Ablesung im Betrachtungszeitraum wird der Verbrauch nach dem oben beschriebenen Verfahren ermittelt. Wurde der KWZ vor dem Betrachtungszeitraum ausgebaut oder erst nach dem Betrachtungszeitraum eingebaut, wird er bei der Berechnung des Wasserverbrauchs nicht berücksichtigt. Da die verfügbaren Ablesungen nicht immer den gesamten

Betrachtungszeitraum abdecken, wird für jeden KWZ je nach verfügbaren Daten der optimale Ansatz ausgewählt: Nach Möglichkeit werden *a posteriori* verwendet. Wenn die Einspeisegangleinie über den gesamten Zeitraum d_{n-1} bis d_{n+1} vollständig vorliegt, wird das zuletzt beschriebene Verfahren verwendet, ansonsten das zeitanteilige Verfahren.

Tabelle 5.6: Tabelle $[t_abnehmer]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-------------|---------|---------------------------------------|
| id_abnehmer | | Eindeutige ID |
| id_zone | | Eindeutige ID der Bilanzierungszone |
| status | | Status des Abnehmers: aktiv / inaktiv |

Abgerechneter Wasserverbrauch ($Q_{AI.1}$) Die Eingangsdaten zur Bestimmung des abgerechneten Wasserverbrauchs $Q_{AI.1}$ stammen aus der Verbrauchsabrechnung und werden in zwei Tabellen abgelegt: In der Tabelle $[t_abnehmer]$, deren Aufbau in Tabelle 5.6 dargestellt ist, werden die Kunden des WVU den jeweiligen Bilanzierungszonen zugeordnet. In der Tabelle $[t_verbrauchskurven]$ werden die jährlich in Rechnung gestellten Wasserverbrauchsmengen gespeichert, s. Tabelle 5.7. Anhand dieser Eingangsdaten lässt sich der abgerechnete Wasserverbrauch $Q_{AI.1}$ im Betrachtungszeitraum für jede Bilanzierungszone ermitteln. Kunden, deren Wasserverbrauch zwar ermittelt, aber nicht abgerechnet wurde, werden von der WMA der Komponente „Sonstige nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe“ ($Q_{AN.5}$) zugeordnet.

Tabelle 5.7: Tabelle $[t_verbrauchskurven]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-------------|----------|---|
| id_abnehmer | | Eindeutige ID die auf $[t_abnehmer]$ verweist |
| jahr | $[jjjj]$ | Abrechnungsjahr |
| verbrauch | $[m^3]$ | In Rechnung gestellter Jahresverbrauch |
| abgerechnet | | In Rechnung gestellt / nicht in Rechnung gestellt |

Abgerechneter Wasserverbrauch von Pauschalkunden ($Q_{AI.2}$) Falls das WVU Kunden hat, deren Wasserverbrauch nicht gemessen, sondern nur pauschal abgerechnet wird, wird die angesetzte Wassermenge in $Q_{AI.2}$ berücksichtigt. Die benötigten Eingangsdaten werden in der Tabelle $[t_pauschalkunden]$ abgelegt, die in Tabelle 5.8 dargestellt ist. Pauschalkunden, deren Wasserverbrauch zwar geschätzt, aber nicht abgerechnet wurde, werden der Komponente „Sonstige nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe“ ($Q_{AN.5}$) zugeordnet.

5.5.3 Ermittlung der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN}

In diesem Abschnitt werden Ansätze beschrieben, mit deren Hilfe die verschiedenen Komponenten der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} berechnet werden.

Eigenbedarf des WVU in Wasserwerken und Behältern ($Q_{AN.1}$) Ein gewisser Anteil des produzierten Trinkwassers wird von den WVU für Reinigungsarbeiten in den Wasserwerken und Speicherbehältern verwendet: In regelmäßigen Abständen sind Filter mit Trinkwasser zu

Tabelle 5.8: Tabelle $[t_pauschalkunden]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-------------|----------------|---|
| id_kunde | | Eindeutige ID |
| id_zone | | Eindeutige ID der Bilanzierungszone |
| status | | Status des Pauschalkunden: aktiv / inaktiv |
| datum1 | $[jjjj/mm/dd]$ | Beginn des Abrechnungszeitraums |
| datum2 | $[jjjj/mm/dd]$ | Ende des Abrechnungszeitraums |
| menge | $[m^3]$ | Pauschal abgerechnete Wassermenge |
| abgerechnet | | In Rechnung gestellt / nicht in Rechnung gestellt |

spülen und Anlagenteile zu reinigen. Lange Verweilzeiten, Zutritt von Luftsauerstoff und der Eintrag von Verschmutzungen über die Luft führen zu Geruchs-, Belags- und Bewuchsbildung in Behältern, die aus hygienischen Gründen in regelmäßigen Abständen zu entfernen sind. Laut DVGW Arbeitsblatt W 300 sind Behälter mindestens einmal jährlich zu kontrollieren und erforderlichenfalls zu reinigen (DVGW, 2005). Gemäß DVGW Arbeitsblatt W 291 soll der Behälter bei der Entleerung bei einem Wasserstand von mindestens 50 cm vom Netz genommen werden, um das Eindringen von Verunreinigungen von der Wasseroberfläche und vom Behälterboden in das Leitungsnetz zu verhindern (DVGW, 2000). Durch diese Maßnahme gehen bei großen Behältern signifikante Wassermengen verloren, die in der Wasserbilanz berücksichtigt werden sollten. Die notwendigen Eingangsdaten zur Bestimmung von $Q_{AN.1}$ werden in der Tabelle $[t_wvu_bedarf_ww]$ abgelegt, deren Aufbau in Tabelle 5.9 dargestellt ist. Anhand der Informationen zu Datum und Menge der Wasserentnahmen aus Tabelle $[t_wvu_bedarf_ww]$ wird der Eigenbedarf jeder Anlage im Betrachtungszeitraum berechnet und der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe zugewiesen.

Tabelle 5.9: Tabelle $[t_wvu_bedarf_ww]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-------------|----------------|---|
| id_anlage | | Eindeutige ID des Wasserwerks oder Behälters |
| name | | Vom WVU verwendete Bezeichnung der Anlage |
| entnahmeart | | Filterspülung, Reinigung von Anlagenteilen, Behälterreinigung |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum des Vorgangs |
| menge | $[m^3]$ | Für den Vorgang verbrauchte Wassermenge |
| gemessen | | Angabe ob Menge geschätzt oder gemessen ist |

Eigenbedarf des WVU für Leitungsspülungen ($Q_{AN.2}$) Leitungsabschnitte, in denen das Wasser stagniert oder in denen nur geringe Fließgeschwindigkeiten erreicht werden, müssen regelmäßig gespült werden, um die Erfordernisse an die Trinkwassergüte einzuhalten. Um die Wassermenge zu ermitteln, die im Betrachtungszeitraum beim Spülen von Leitungen verbraucht wird, werden in der Regel Informationen aus dem Auftragszentrum oder der Abteilung Netzbetrieb über Spülintervalle und -intensität benötigt. Diese werden in der Tabelle $[t_wvu_bedarf_netze]$ abgelegt, deren Aufbau in Tabelle 5.10 dargestellt ist.

Laut DVGW (2006a) sind Spülpläne zu erstellen, in denen Spülturnus, -geschwindigkeit

Tabelle 5.10: Tabelle $[t_wvu_bedarf_netze]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-------------|----------------|--|
| id_spuelung | | Eindeutige ID |
| id_hydrant | | Eindeutige ID |
| entnahmeart | | Turnus- oder Sonderspülung, Kalibrierungsmessung |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Spülung |
| dauer | $[min]$ | Dauer der Spülung |
| von_zeit | $[hh:mm]$ | Start der Spülung |
| bis_zeit | $[hh:mm]$ | Ende der Spülung |
| menge | $[m^3]$ | Angabe zur entnommenen Wassermenge |
| gemessen | | Angabe ob Menge geschätzt oder gemessen ist |

und -menge vorab festzulegen sind und bei der Spülung die Trübung, Spülzeiten und -mengen zu dokumentieren sind. Dennoch ist die Datenlage erfahrungsgemäß je nach WVU sehr unterschiedlich. Während bei manchen WVU sämtliche Zeiten (Auftragseingang, Ankunft am Hydranten, Ende der Spülung) des mit der Spülung beauftragten Bereitschaftsteams detailliert erfasst und im Auftragsmanagementsystem vorgehalten werden, verfügen andere WVU möglicherweise nur über eine Liste der gespülten Hydranten (Spülplan). In den seltensten Fällen verfügt das WVU über Schätz- oder Messwerte bezüglich der tatsächlich entnommenen Wassermenge. Je nach Datenlage sind daher in der *WMA* zwei Optionen zur Bestimmung der Spülwassermenge $Q_{AN.2}$ implementiert.

1. Wenn Anfangs- und Endzeitpunkt des Spülauftrags bekannt sind und Q_N für die betroffene Bilanzierungszone in Minutenintervallen vorliegt, kann die Spülmenge detailliert ermittelt werden. Dazu wird die Einspeiseganglinie während des Spülvorgangs analysiert, um den exakten Spülzeitraum zu identifizieren, wie in Abbildung 5.10 dargestellt. Nimmt die Steigung der Ganglinie sehr große positive oder negative Werte an, weist dies darauf hin, dass der Hydrant geöffnet bzw. geschlossen wurde. Der Mittelwert der Rohrnetzeinspeisung des gleichen Wochentages drei Wochen vor und drei Wochen nach der Spülung bildet die Referenzganglinie. Die Spülwassermenge $Q_{AN.2}$ wird aus der Differenz zwischen der Ganglinie im Spülzeitraum und der Referenzganglinie näherungsweise bestimmt.
2. Wenn die Dauer der Spülung unbekannt ist, oder die oben genannte Methode aufgrund mangelnder minütlicher Messwerte nicht durchführbar ist, besteht die Möglichkeit, Erfahrungswerte für die Entnahmemenge unterschiedlicher Spülungen (z.B. turnusmäßige Spülung: $2,5 m^3$; Sonderspülung: $2,5 m^3$; Kalibrierungsmessung: $5,0 m^3$) vorzugeben.

Eigenbedarf des WVU für Arbeiten im Rohrnetz ($Q_{AN.3}$) Im Rahmen der Instandhaltung eines Wasserverteilungsnetzes wird eine ganze Reihe von Arbeiten durchgeführt, bei denen es zu einer Wasserentnahme aus dem Rohrnetz kommt: Reparaturarbeiten, Reinigung (Spülung, Molchung, Hochdruckreinigung), Sanierung (Zementmörtel-Auskleidung oder Relining) oder Erneuerung bzw. Neubau von Leitungsabschnitten. Baumaßnahmen im Rohrnetz werden entweder vom WVU selbst durchgeführt oder extern an Baufirmen vergeben. Die Baufirmen werden dabei in der Regel mit Zählerstandrohren ausgestattet und sind dazu verpflichtet, jede Wasserentnahme aufzuzeichnen und mit dem WVU abzurechnen. Diese Wassermengen

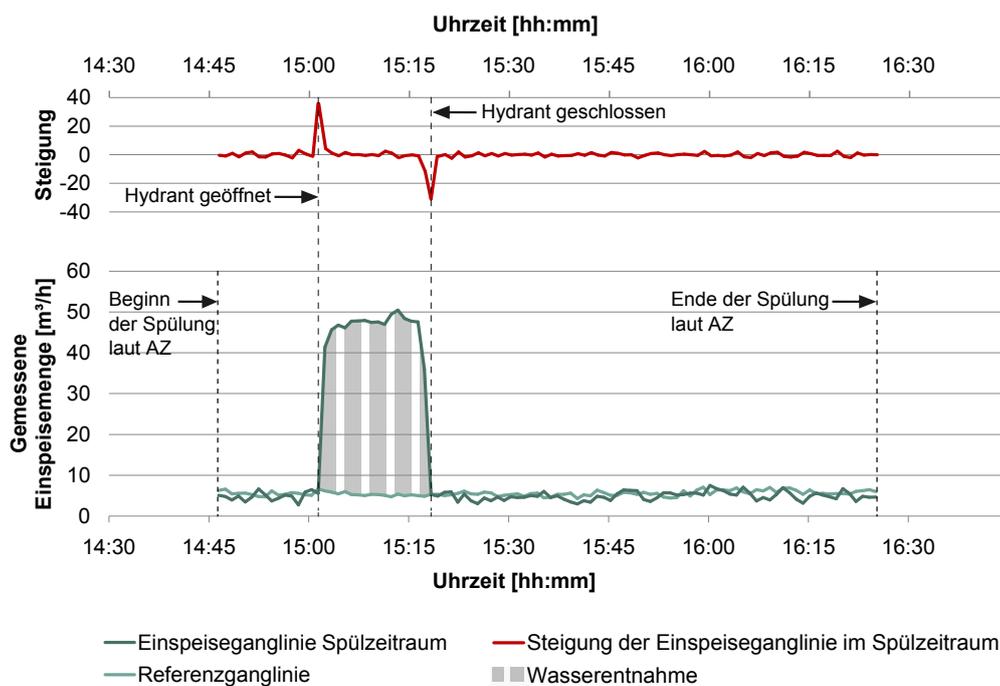


Abbildung 5.10: Ermittlung der Spülwassermenge $Q_{AN.2}$

werden also erfasst und unter der Position Q_{AI} abgerechnet. Werden die Wassermengen nicht mit Zählerstandrohren erfasst, etwa bei intern ausgeführten Arbeiten, wird der folgende Ansatz zur näherungsweise Ermittlung genutzt: Ist im GIS der von einer Arbeitsmaßnahme betroffene Leitungsabschnitt bekannt, so werden anhand der Topologie des Rohrnetzes alle Trennschieber identifiziert, die zum Isolieren dieses Leitungsabschnittes geschlossen werden müssen. Anschließend wird im GIS das Volumen V_{LA} der isolierten Rohrleitungen berechnet. DVGW Arbeitsblatt W 291 empfiehlt als Spülwassermenge nach Baumaßnahmen den dreibis fünffachen Rohrinhalt des betroffenen Leitungsabschnitts (DVGW, 2000). Um weiterhin die Entleerung des Leitungsabschnitts vor der Baumaßnahme zu berücksichtigen, wird der Wasserverbrauch $Q_{AN.3}$ gemäß Gleichung 5.8 berechnet:

$$Q_{AN.3} = 6 \times \sum_{i=1}^n V_{LA.i} \quad (5.8)$$

Darin bezeichnet $V_{LA.i}$ in $[m^3]$ das Volumen des zu isolierenden Leitungsabschnitts. Die notwendigen Eingangsdaten werden vom GIS in der Tabelle $[t_reparaturen]$ bereitgestellt, deren Aufbau in Tabelle 5.11 dargestellt ist.

Tabelle 5.11: Tabelle $[t_reparaturen]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|------------|----------------|---|
| vorgang | | Reparatur, Neubau, Sanierung, Reinigung |
| id_leitung | | Eindeutige ID der bearbeiteten Leitung |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Baumaßnahme |
| volumen | $[m^3]$ | Volumen $V_{LA.i}$ der isolierten Leitungen |

Löschwassermenge ($Q_{AN.4}$) Für die Ermittlung der Wassermenge, die von der Feuerwehr zur Brandbekämpfung und für Übungen dem Rohrnetz entnommen wird, existieren bisher keine Ansätze oder Richtwerte. Die DIN 14010 (10/2005) nennt zwar Löschmittel und Löschwassermenge als mögliche Angaben zur statistischen Erfassung von Bränden. In der Praxis wird die Löschwassermenge aber häufig nicht in den Brandberichten erfasst, da diese vor Ort nicht exakt quantifiziert werden kann. Tennhardt (2012) berichtet allerdings, dass die Feuerwehr Berlin „über Laufzeit und Strahlrohrgröße die entnommenen Mengen protokollarisch erfasst“. Da die Strahlrohre stufenlos regelbar und nur einen Bruchteil der Einsatzdauer geöffnet sind, ist anzunehmen, dass dieser Ansatz zu einer Überschätzung der Löschwassermenge führt.

Korkmazer (2013) untersuchte verschiedene Ansätze zur näherungsweise Bestimmung der Löschwassermenge. Gestützt auf eine Umfrage unter Feuerwehrangehörigen und die Auswertung von Literaturwerten kam Korkmazer (2013) zu dem Ergebnis, dass die Löschwassermenge bei Klein- und Mittelbränden mit großer Sicherheit geringer als 5 m^3 ist, unter anderem weil hierbei die Anzahl der eingesetzten C-Rohre begrenzt ist. Bei Großbränden lässt sich hingegen keine pauschale Aussage treffen, da in diese Kategorie alle Brände fallen, bei denen mehr als drei C-Rohre eingesetzt werden. In der Literatur finden sich für die Löschwassermenge bei Großbränden Angaben zwischen 5 m^3 und 4.600 m^3 (Bockwoldt, 1987). Korkmazer (2013) fasst seine Untersuchung folgendermaßen zusammen:

- Kleinbrand Typ a: Einsatz von Kleinlöschgeräten; keine Wasserentnahme aus dem Rohrnetz.
- Kleinbrand Typ b: Einsatz von maximal einem C-Rohr; Löschwassermenge zwischen $0,2$ und $0,5 \text{ m}^3$.
- Mittelbrand: Einsatz von maximal drei C-Rohren; Löschwassermenge zwischen $1,75$ und $4,5 \text{ m}^3$.
- Großbrand: Einsatz von mehr als drei C-Rohren; Löschwassermenge muss individuell aus Messdaten ermittelt werden.
- Übungen: So genannte „nasse“ Übungen sind vergleichbar mit Mittelbränden; Löschwassermenge zwischen $1,75$ und $4,5 \text{ m}^3$.

Für die Implementierung der automatischen Ermittlung der Löschwassermenge wurde die folgende Vorgehensweise gewählt: Von der Feuerwehr ist dem WVU die Dokumentation der Brandereignisse im Betrachtungszeitraum zur Verfügung zu stellen. Diese werden in der Tabelle $[t_lw_bedarf]$ abgelegt, deren Aufbau in Tabelle 5.12 dargestellt ist.

Tabelle 5.12: Tabelle $[t_lw_bedarf]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------|----------------|--|
| id_hydrant | | Eindeutige ID |
| entnahmeart | | Klein-, Mittel-, Großbrand oder Übung |
| einsatznummer | | Einsatznummer der Feuerwehr |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum des Brandereignisses |
| uhrzeit | $[hh:mm]$ | Zeitpunkt der Alarmierung oder Einsatzbeginn |
| menge | $[m^3]$ | Angabe zur Löschwassermenge, falls bekannt |

Wie die Arbeit von Korkmazer (2013) gezeigt hat, ist die Löschwasserentnahme bei Klein- und Mittelbränden sehr gering und lässt sich mit ausreichender Sicherheit eingrenzen. Es wer-

den daher pauschale Werte für Klein- und Mittelbrände angenommen ($0,5$ bzw. $4,5 \text{ m}^3$), die gegebenenfalls durch eigene Erfahrungswerte ersetzt werden können. Dasselbe gilt für nasse Übungen, hier liegt der Pauschalwert ebenfalls bei $4,5 \text{ m}^3$. Bei Großbränden hingegen kann die entnommene Wassermenge sehr groß werden und insbesondere in kleinen Bilanzierungszonen die Ergebnisse der Wasserbilanz beeinflussen. Anhand der Hydranten-ID wird daher jeder Großbrand der zugehörigen Bilanzierungszone zugeordnet. Anschließend wird anhand von Datum und Uhrzeit des Brandereignisses die Rohrnetzeinspeisung dieser Zone während des Brandes mit der Referenzganglinie der Rohrnetzeinspeisung des gleichen Wochentages drei Wochen vor und drei Wochen nach dem Brand verglichen, wie Abbildung 5.11 veranschaulicht. Da Löscheinsätze bei Großbränden länger als eine Stunde dauern (im Gegensatz zu Leitungsspülungen), sind stündliche Zählwerte in der Regel für die Analyse ausreichend. Die Löschwassermenge $Q_{AN.4}$ wird aus der Differenz zwischen der Ganglinie während des Brandereignisses und der Referenzganglinie näherungsweise bestimmt.

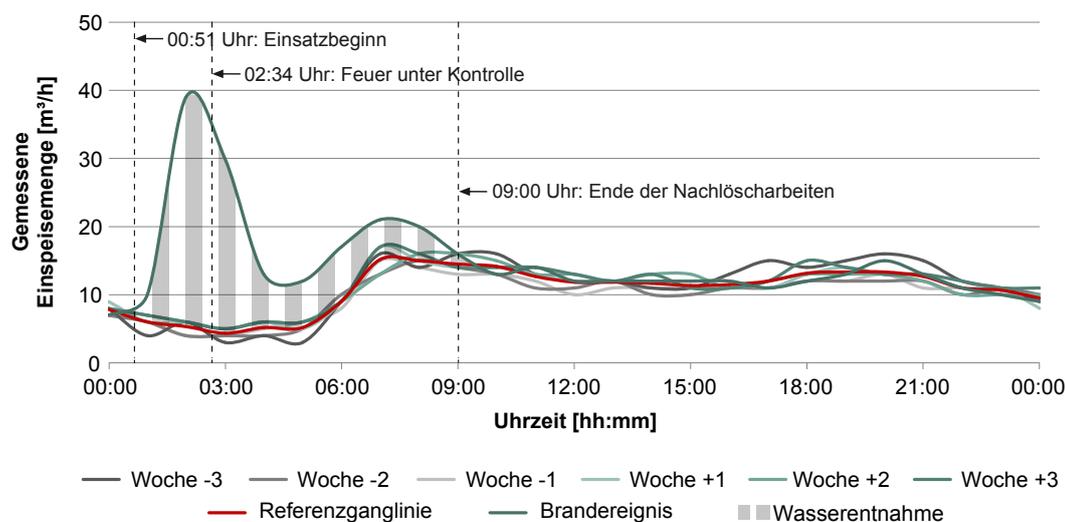


Abbildung 5.11: Ermittlung der Löschwassermenge $Q_{AN.4}$

Sonstige genehmigte, nicht in Rechnung gestellte Abgabe ($Q_{AN.5}$) Neben den bereits genannten, nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgaben können noch eine Reihe weiterer Wasserentnahmen aus dem Leitungsnetz auftreten, die in $Q_{AN.5}$ zusammengefasst werden. Das können einerseits Abnehmer sein, deren Verbrauch zwar gemessen, aber vom WVU nicht in Rechnung gestellt wurde. Diese Wassermenge werden in Tabelle $[t_verbrauchskurven]$ abgelegt (s. Abschnitt 5.5.2). Weitere Entnahmen, die in manchen Fällen nicht gemessen und in Rechnung gestellt werden, können beispielsweise der Straßenreinigung, der Bewässerung öffentlicher Flächen, Zierbrunnen, Märkten o.ä. dienen. Die zur Berechnung von $Q_{AN.5}$ benötigten Informationen werden, sofern vorhanden, aus der Tabelle $[t_sonstige_abgaben]$ eingelesen, deren Aufbau in Tabelle 5.13 dargestellt ist.

5.5.4 Ermittlung der scheinbaren Wasserverluste Q_{VS}

Nachdem die Berechnung der Rohrnetzeinspeisung Q_N und der Rohrnetzabgaben Q_A abgeschlossen ist, werden die scheinbaren Wasserverluste Q_{VS} ermittelt. Diese lassen sich in die fünf Kategorien Abgrenzungsverluste $Q_{VS.1}$, Zählerabweichungen an Kundenwasserzählern

Tabelle 5.13: Tabelle $[t_sonstige_abgaben]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|------------|----------------|---|
| id_hydrant | | Eindeutige ID |
| vorgang | | Straßenreinigung, Bewässerung, Zierbrunnen, Markt |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum des Vorgangs |
| menge | $[m^3]$ | Für den Vorgang verbrauchte Wassermenge |
| gemessen | | Angabe ob Wassermenge geschätzt oder gemessen ist |

$Q_{VS.2}$ und Betriebswasserzählern $Q_{VS.3}$, sowie Schleichverluste $Q_{VS.4}$ und Wasserdiebstahl $Q_{VS.5}$ unterteilen.

Abgrenzungsverluste ($Q_{VS.1}$) Mit dem Begriff „Abgrenzungsverluste“ werden Datenhandhabungsfehler beschrieben, die durch die unterschiedlichen Ablesezeitpunkte der BWZ und KWZ auftreten (s. Abschnitt 3.4.5). Häufig entstehen Fehler in der Wasserbilanz dadurch, dass für die Ermittlung der in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AI} die Verbrauchswerte aus der Verbrauchsabrechnung ohne weitere Korrektur übernommen werden. Die Verbrauchswerte eines Kunden können aber durch die Umbuchung von Mehr- oder Minderverbrauch des Vorjahres verfälscht sein. Außerdem wenden IT-Systeme für die Verbrauchsabrechnung Prognosen an, wenn zum Zeitpunkt der Rechnungslegung keine aktuelle Zählerablesung vorliegt. Die Abgrenzungsverluste $Q_{VS.1}$ werden anhand Gleichung 5.9 aus der Differenz des aus Zählerablesungen berechneten Wasserverbrauchs $Q_{AI.0}$ und des abgerechneten Wasserverbrauchs $Q_{AI.1}$ bestimmt.

$$Q_{VS.1} = Q_{AI.0} - Q_{AI.1} \quad (5.9)$$

Wenn im Betrachtungszeitraum mehr Wasser abgerechnet wurde, als von den KWZ im selben Zeitraum gemessen wurde, nimmt $Q_{VS.1}$ negative Werte an und erhöht somit den Anteil der realen Wasserverluste.

Zählerabweichungen an Kundenwasserzählern ($Q_{VS.2}$) Wie in Abschnitt 3.4.1.1 beschrieben, kann die fehlerhafte Dimensionierung von KWZ Messabweichungen verursachen, die zum systematischen Unter- oder Überregistrieren von Wassermengen führen können. Um diese Zählerabweichungen $Q_{VS.2}$ näherungsweise bestimmen zu können, werden der Kundenwasserzählerpark des WVU analysiert und die Charakteristika jedes einzelnen KWZ mit den gemessenen Wassermengen verglichen. Die Charakteristika der KWZ sind in den Tabellen $[t_kwz_zaehlertyp]$ und $[t_kwz_fehlerkurven]$ abgelegt, deren Aufbau in den Tabellen 5.14 und 5.15 dargestellt ist.

Anhand der in $[t_kwz_zaehlertyp]$ und $[t_kwz_fehlerkurven]$ verfügbaren Eingangsdaten kann für jeden KWZ der Messbereich und die zugehörige Fehlerkurve bestimmt werden (vgl. Abbildung 2.5). Diese werden mit dem Durchflussspektrum des KWZ verglichen. Das Durchflussspektrum wird aufbauend auf empirischen Ergebnissen von Hofmann und Stefanski (2011) aus dem mittels Zählerablesungen berechneten Wasserverbrauch $Q_{AI.0}$ (s. Abschnitt 5.5.2) bestimmt. Laut Hofmann und Stefanski (2011) konzentriert sich der Wasserverbrauch häuslicher Kunden auf wenige Stunden am Tag. Je kleiner der mittlere Wasserverbrauch, desto kürzer ist der Zeitraum, in dem tatsächlich eine Entnahme stattfindet. Für Wasserzähler, an denen ein mittlerer täglicher Verbrauch von $\geq 24,0 \text{ m}^3/h$ (entspricht dem

Tabelle 5.14: Tabelle $[t_kwz_zaehlertyp]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|----------------|-----------|---|
| id_zaehlertyp | | Eindeutige ID des Zählertyps |
| id_fehlerkurve | | Eindeutige ID die auf $[t_kwz_fehlerkurven]$ verweist |
| bauart | | Typ (EFZ, MFZ, RKZ, WMZ etc.) |
| hersteller | | Name des Herstellers |
| modell | | Modellbezeichnung des Herstellers |
| nennweite | $[mm]$ | Nennweite des Zählers |
| Q_A | $[m^3/h]$ | Anlaufdurchfluss |
| ratio | | Verhältnis Q_3/Q_1 gemäß MID |
| Q_1 | $[m^3/h]$ | Minstdurchfluss gemäß MID |
| Q_2 | $[m^3/h]$ | Übergangsdurchfluss gemäß MID |
| Q_3 | $[m^3/h]$ | Dauerdurchfluss gemäß MID |
| Q_4 | $[m^3/h]$ | Überlastungsdurchfluss gemäß MID |
| klasse | | Klasse A, B oder C gemäß EWG |
| Q_{min} | $[m^3/h]$ | Minimaldurchfluss gemäß EWG |
| Q_t | $[m^3/h]$ | Trenndurchfluss gemäß EWG |
| Q_n | $[m^3/h]$ | Nenndurchfluss gemäß EWG |
| Q_{max} | $[m^3/h]$ | Maximaldurchfluss gemäß EWG |

Tabelle 5.15: Tabelle $[t_kwz_fehlerkurven]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|----------------|-----------|--|
| id_fehlerkurve | | Eindeutige ID |
| durchfluss | $[m^3/h]$ | Durchflussmenge |
| messfehler | $[\%]$ | Zur Durchflussmenge zugehöriger Messfehler |

Bedarf von ca. 200 Einwohnern) gemessen wurde, ist vereinfachend von einer Entnahmedauer von 21 h/d auszugehen. Die tägliche Entnahmedauer von KWZ mit einem mittleren täglichen Verbrauch kleiner 24,0 m^3/h lässt sich mittels Gleichung 5.10 annähern.

$$t_{ED.i} = -0,026 \times \left(\frac{Q_{AI.0.i}}{24 \times t_{WB}} \right)^2 + 1,416 \times \left(\frac{Q_{AI.0.i}}{24 \times t_{WB}} \right) + 1,918 \quad (5.10)$$

Darin ist $t_{ED.i}$ die tägliche Entnahmedauer des KWZ i $[h]$, $Q_{AI.0.i}$ der gemessene Wasserverbrauchs dieses KWZ im Betrachtungszeitraum $[m^3]$ und t_{WB} die Dauer des Betrachtungszeitraums der Wasserbilanz $[d]$. Abbildung 5.12 zeigt die Messwerte von Hofmann und Stefanski (2011) und die daraus abgeleitete Funktion zur Bestimmung von $t_{ED.i}$.

Anhand der täglichen Entnahmedauer $t_{ED.i}$ lässt sich näherungsweise die mittlere Durchflussmenge des betrachteten KWZ bestimmen. Die auf diese Weise ermittelte Durchflussmenge wird mit dem Messbereich des KWZ verglichen. Aus der Fehlerkurve wird die positive oder negative Messabweichung berechnet. Die prozentuale Abweichung wird mit dem gemessenen Wasserverbrauch $Q_{AI.0.i}$ multipliziert und ergibt die Zählerabweichung $Q_{VS.2.i}$. Positive Zählerabweichungen deuten darauf hin, dass der tatsächliche Wasserverbrauch überschätzt wird, und werden daher in der Wasserbilanz negativ angesetzt. Dadurch sinken die scheinbaren

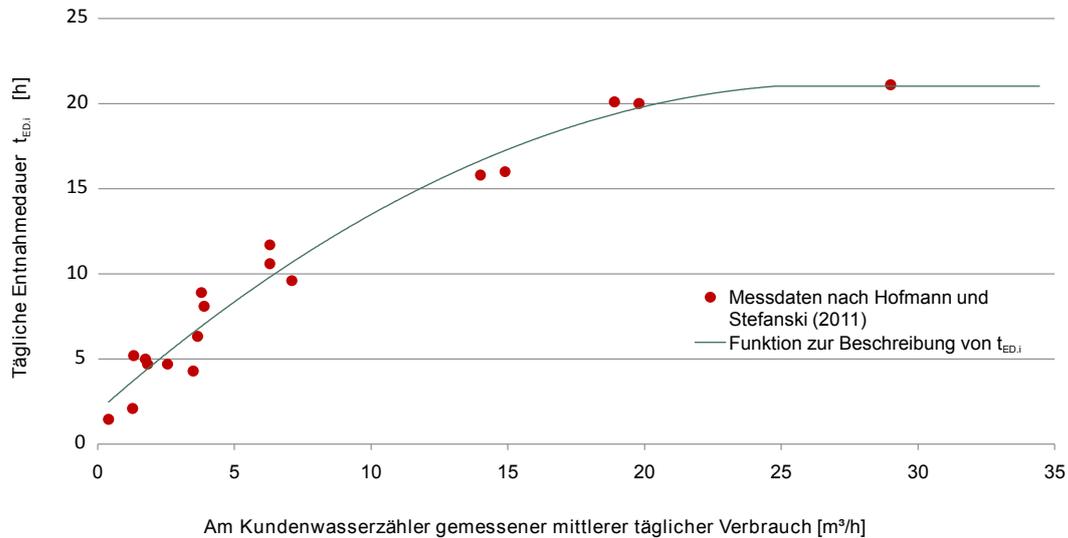


Abbildung 5.12: Zusammenhang zwischen täglicher Entnahmemenge und -dauer

Wasserverluste und es steigen die realen Wasserverluste.

Zählerabweichungen an Betriebswasserzählern ($Q_{VS.3}$) Nach einem ähnlichen Verfahren werden die Zählerabweichungen an BWZ $Q_{VS.3}$ bestimmt. Messwerte und Zählerstände von BWZ werden entweder per Fernwirktechnik direkt an das Leitsystem übertragen oder in regelmäßigen Intervallen (üblicherweise monatlich) vom Betriebspersonal des WVU abgelesen. Liegen die tatsächlichen Messwerte aus dem Prozessleitsystem in Minutenintervallen vor, ist der Vergleich mit den Zählercharakteristika und der Fehlerkurve jedes Messgerätes sehr einfach. Diese sind analog zu den KWZ in den Tabellen $[t_bwz_zaehlertyp]$ und $[t_bwz_fehlerkurven]$ abgelegt, deren Aufbau identisch zu den Tabellen in den Tabellen 5.14 und 5.15 ist. Alle Messwerte eines BWZ werden in die *WMA* eingelesen und mit dem Messbereich des Geräts verglichen. Die Summe der Produkte jedes einzelnen Messwertes mit der zugehörigen prozentualen Messabweichung aus der Fehlerkurve ergibt die positive oder negative Messabweichung des BWZ im Betrachtungszeitraum, wie Gleichung 5.11 veranschaulicht.

$$Q_{VS.3} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \times \Delta q_i}{100} \quad (5.11)$$

Darin sind $Q_{VS.3}$ die Messabweichung des BWZ [m^3], Q_i die Messwerte [m^3/h] und Δq_i die zugehörige Messabweichung [%]. BWZ, für die nur stündliche Zählwerte oder monatliche manuelle Ablesungen vorliegen, werden bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Schleichverluste ($Q_{VS.4}$) Die Ursachen für Schleichverluste sind in den Abschnitten 3.4.1.1 und 3.4.3 ausführlich beschrieben. Die genaue Höhe der Schleichverluste lässt sich auch mit den Informationen über den Wasserzählerpark nicht approximieren, da der Zustand der Hausinstallation die entscheidende Rolle spielt. Es wird daher ein Pauschalwert verwendet, der gegebenenfalls durch Erfahrungswerte ersetzt werden kann. Der Pauschalwert für $Q_{VS.4}$ beträgt mangels belastbarer Informationen zu Schleichverlusten in Deutschland 0,1 % von Q_A .

Wasserdiebstahl ($Q_{VS.5}$) Die Ursachen für Wasserdiebstahl und unzulässige Wasserentnahme sind im Abschnitt 3.4.4 ausführlich beschrieben. Auch die Höhe des Wasserdiebstahls lässt sich nicht simulieren oder näherungsweise bestimmen. Da Wasserdiebstahl in Deutschland ebenfalls eine untergeordnete Rolle zu spielen scheint, wird für $Q_{VS.5}$ ein Pauschalwert von 0,1 % von Q_A verwendet. Der Pauschalwert kann bei Bedarf angepasst werden.

5.5.5 Ermittlung der realen Wasserverluste Q_{VR}

Im nächsten Schritt werden für jede Bilanzierungszone die gesamten realen Wasserverluste Q_{VR} berechnet. Dazu werden die Rohrnetzabgabe Q_A und die scheinbaren Wasserverluste Q_{VS} von der Rohrnetzeinspeisung Q_N subtrahiert. Q_{VR} setzt sich aus vier bekannten Komponenten (bekannte Überläufe $Q_{VR.1}$ und Undichtheiten an Hochbehältern $Q_{VR.2}$; Wasserverluste aus bekannten Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen $Q_{VR.3}$ sowie an Anschlussleitungen $Q_{VR.4}$) und einer unbekannt Komponente $Q_{VR.5}$ zusammen. Zunächst werden die bekannten Komponenten quantifiziert und damit anschließend die gesuchte Höhe der Wasserverluste aus unbekannt Schäden ermittelt.

Bekannter Überlauf an Hochbehältern ($Q_{VR.1}$) Ob im Betrachtungszeitraum aufgrund mangelhafter Steuerung oder fehlerhafter Bedienung ein Behälterüberlauf stattgefunden hat, lässt sich auf zwei verschiedene Arten nachvollziehen. Entweder werden diese Vorfälle vom Betriebspersonal des WVU in einer Datenbank dokumentiert, die an das GIS angebunden ist. Oder es werden Warnmeldungen aus dem Prozessleitsystem ausgewertet, die von Füllstandsmessgeräten bei Behälterüberlauf gegeben werden. In beiden Fällen sind die Daten vom GIS in die Tabelle [t_hb_ueberlauf] zu überführen, deren Aufbau in Tabelle 5.16 dargestellt ist.

Tabelle 5.16: Tabelle [t_hb_ueberlauf]

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-----------|-------------------|---|
| id_anlage | | Eindeutige ID des Speicherbehälters |
| datum1 | [jjjj/mm/dd] | Startzeitpunkt des Behälterüberlaufs |
| datum2 | [jjjj/mm/dd] | Endzeitpunkt des Behälterüberlaufs |
| menge | [m ³] | Durch Überlauf verloren gegangene Wassermenge |
| gemessen | | Angabe ob Wassermenge geschätzt oder gemessen ist |

In der Tabelle [t_hb_ueberlauf] kann wahlweise das genaue Datum eines Überlaufereignisses oder ein Zeitraum, in dem Überlauf stattgefunden hat, angegeben werden. Mit den Informationen wird die verlorene Wassermenge $Q_{VR.1}$ aus der Differenz zwischen Einspeise- und Entnahmezähler im Zeitraum des Überlaufs berechnet.

Bekannte Undichtheit an Hochbehältern ($Q_{VR.2}$) Durch das WVU sind volumetrische Tests (s. Abschnitt 4.3.3) an den Hochbehältern durchzuführen. Die ermittelten Ergebnisse sind in der Tabelle [t_hb_dichtheit] abzulegen, deren Aufbau in Tabelle 5.17 dargestellt ist.

Mit den Informationen aus der Tabelle [t_hb_dichtheit] wird die durch Undichtheiten verlorene Wassermenge $Q_{VR.2}$ gemäß Gleichung 5.12 berechnet.

$$Q_{VR.2} = \sum_{i=1}^n \left(24 \times \frac{d_{h.i} \times A_{HB.i}}{t_{DP.i}} \right) \times t_{WB} \quad (5.12)$$

Tabelle 5.17: Tabelle $[t_hb_dichtheit]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-----------|----------------|--|
| id_anlage | | Eindeutige ID des Speicherbehälters |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Dichtheitsprüfung |
| dauer | $[h]$ | Dauer der Dichtheitsprüfung |
| delta_h | $[m]$ | Gemessene Absenkung des Behälterwasserspiegels |

Darin ist $d_{h,i}$ $[m]$ die Wasserspiegeldifferenz, $t_{DP,i}$ $[h]$ die Dauer der Dichtheitsprüfung, $A_{HB,i}$ die Grundfläche des Behälters i $[m^2]$ (aus $[t_hb_kenndaten]$) und t_{WB} die Dauer des Betrachtungszeitraums der Wasserbilanz $[d]$.

Verluste aus bekannten Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen ($Q_{VR.3}$) Wenn der Anteil der Wasserverluste, die aus bekannten Schäden entstanden sind, abgeschätzt werden können, lässt sich damit die Aussage über das noch vorhandene Potenzial weiterer Wasserverlustreduzierungsmaßnahmen präzisieren. Voraussetzung für die Abschätzung der Wasserverluste aus bekannten Leitungsschäden ist, dass das WVU Schäden an Rohrleitungen mit Wasseraustritt dokumentiert. Diese Angaben sind in der Tabelle $[t_schadensreparatur]$ zur Verfügung zu stellen, deren Struktur in Tabelle 5.18 dargestellt ist. Über die Zuordnung jedes Schadens zu einer bestimmten Leitung aus $[t_rohrleitungen]$ lässt sich bestimmen, wann in einer Bilanzierungszone ein Schaden an einer Haupt- oder Versorgungsleitung behoben wurde.

Tabelle 5.18: Tabelle $[t_schadensreparatur]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-----------------|----------------|---|
| id_schaden | | Eindeutige ID des Schadensereignisses |
| id_leitung | | Eindeutige ID die auf $[t_rohrleitungen]$ verweist |
| entstanden_am | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Entstehung des Schadens |
| gemeldet_am | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Schadensmeldung |
| behoben_am | $[jjjj/mm/dd]$ | Datum der Reparatur |
| personalaufwand | $[h]$ | Personalaufwand für Reparatur |

In der *WMA* sind verschiedene Ansätze implementiert, um anhand der vorliegenden Informationen die Wasserverluste aus bekannten Schäden zu bestimmen.

1. Analyse von Schäden mit langer Laufzeit und großer Leckrate

Wenn alle Wassermengen, die in eine Bilanzierungszone über BWZ eingespeist und entnommen werden, im Prozessleitsystem vorliegen (minütliche Messwerte oder stündliche Zählwerte), kann der Nachtmindestverbrauch einer Zone ermittelt werden. Dazu wird für jeden Tag innerhalb des Betrachtungszeitraums zwischen 01:00 Uhr und 05:00 Uhr der minimale Wert abgefragt. Das Ergebnis ist die Ganglinie des Nachtmindestverbrauchs in Abbildung 5.13.

Diese Ganglinie wird geglättet, indem ein Algorithmus Ausreißer nach oben aufspürt, die auf erhöhten Nachtverbrauch zurückzuführen sind. Die resultierende gestufte Ganglinie wird mit dem Zeitpunkt der Reparaturen aus der Tabelle $[t_schadensreparatur]$ verglichen. Fällt

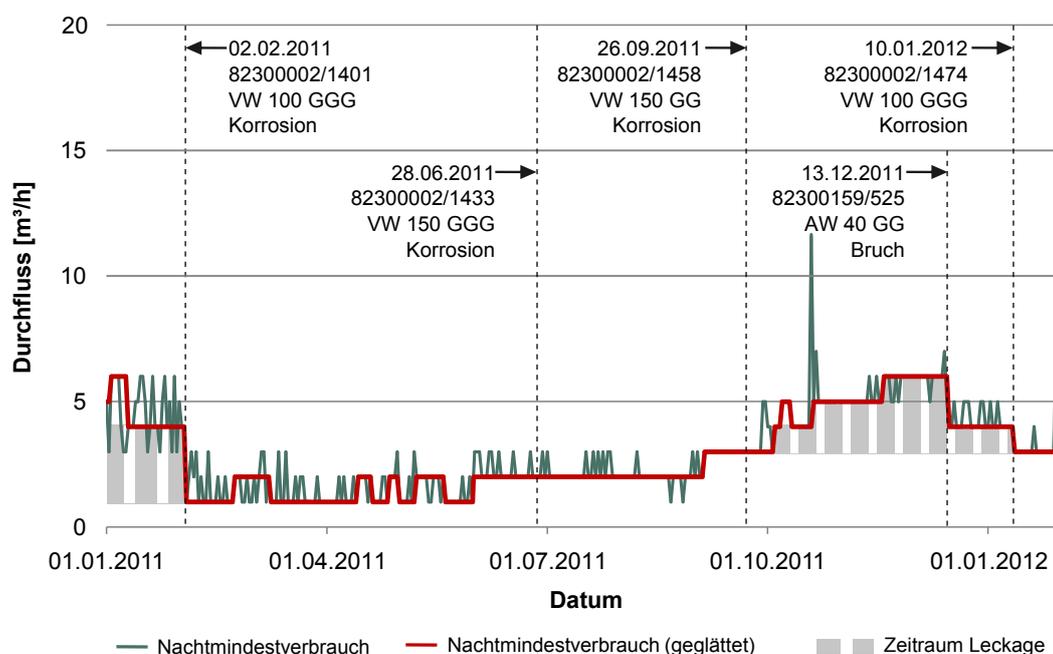


Abbildung 5.13: Jahresgang des Nachtmindestverbrauchs und bekannte Schäden

eine Reparatur zeitlich mit dem Absinken des Nachtmindestverbrauchs zusammen, kann von einem Zusammenhang ausgegangen werden. In diesem Fall wird die Differenz der Einspeisemenge vor und nach der Schadensreparatur registriert und ermittelt, wann das sich nach der Reparatur einstellende Niveau zuletzt aufgetreten war. Anhand des Niveauunterschieds werden die Laufzeit und die Leckrate des Schadens näherungsweise bestimmt. Da sich die Laufzeit eines Schadens über Beginn und Ende des Bilanzierungszeitraums hinaus erstrecken kann, wird die Nachtmindestganglinie auch für das vorangegangene und das nachfolgende Kalenderjahr untersucht, sofern die erforderlichen Eingangsdaten vorliegen.

2. Analyse von Schäden mit kurzer Laufzeit und großer Leckrate

Wie Abbildung 5.13 zeigt, wird nicht bei jeder Reparatur ein Absinken des Nachtmindestverbrauchs registriert. Dies kann zwei Ursachen haben: Entweder war die Leckrate des Schadens so klein, dass sie über die Einspeisemengen nicht identifiziert werden kann, oder die Laufzeit war sehr kurz (z.B. innerhalb eines Tages), so dass der Nachtmindestverbrauch nicht verändert wurde. Bei Schäden, die sehr schnell nach ihrer Entstehung entdeckt werden, kann davon ausgegangen werden, dass sie eine sehr hohe Leckrate haben. Deshalb wird im zweiten Schritt für alle verbleibenden Schäden die Einspeisemenge im Zeitraum zwischen Schadensmeldung und Schadensreparatur analysiert, wenn dieser Zeitraum unter 24 Stunden beträgt. Der in Abschnitt 5.5.3 beschriebene Ansatz zur Bestimmung der Löschwassermenge $Q_{AN.5}$ wird verwendet, um die Leckrate zu ermitteln.

3. Analyse von Schäden geringer Leckrate

Für die übrigen Schäden, die in der Schadensdatenbank erfasst sind und deren Leckrate und Laufzeit anhand der oben genannten Methoden nicht ermittelt werden können, werden Pauschalwerte verwendet, die bei Bedarf angepasst werden können. Der Pauschalwert für

die Laufzeit beträgt 30 Tage. Basierend auf empirischen Werten aus Heydenreich und Hoch (2008) wird der Pauschalwert von $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ als Leckrate an Haupt- und Versorgungsleitungen verwendet.

Wasserverluste aus bekannten Schäden an Anschlussleitungen ($Q_{VR.4}$) Die Wasserverluste aus bekannten Schäden an Anschlussleitungen werden analog zu $Q_{VR.3}$ ermittelt. Über die Zuordnung jedes Schadens aus $[t_schadensreparatur]$ zu einer bestimmten Leitung aus $[t_rohrleitungen]$ lässt sich bestimmen, welche Schäden an Anschlussleitungen aufgetreten sind.

Wasserverluste aus unbekanntem Schäden ($Q_{VR.5}$) Die Höhe der Wasserverluste aus unbekanntem Schäden $Q_{VR.5}$ ergibt sich abschließend gemäß Gleichung 5.13.

$$Q_{VR.5} = Q_N - Q_A - Q_{VS} - \sum_{i=1}^4 Q_{VR.i} \quad (5.13)$$

Der Vergleich von $Q_{VR.3}$, $Q_{VR.4}$ und $Q_{VR.5}$ zeigt, welcher Anteil der realen Wasserverluste von Schäden stammt, die das WVU im Betrachtungszeitraum erkannt und behoben hat, und wie groß die Restmenge realer Wasserverluste ist, die durch unbekannte Schäden im Netz verursacht werden.

5.5.6 Datenaustausch mit dem hydraulischen Modell

Nach der Berechnung der Wasserbilanz werden über die Austauschdatenbank ausgewählte Ergebnisse an das hydraulische Modell übergeben. Dies geschieht über die Tabelle $[t_wma_uebergabe_hm]$, die in Tabelle 5.19 dargestellt ist.

Tabelle 5.19: Tabelle $[t_wma_uebergabe_hm]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------|----------------|--|
| id_wasserzone | | Eindeutige ID der Zone |
| datum_start | $[jjjj/mm/dd]$ | Start des Untersuchungszeitraums |
| datum_ende | $[jjjj/mm/dd]$ | Start des Untersuchungszeitraums |
| q_n_min | $[m^3/h]$ | Minimale Gesamteinspeisung in die Zone |
| q_n_mittel | $[m^3/h]$ | Mittlere Gesamteinspeisung in die Zone |
| q_n_max | $[m^3/h]$ | Maximale Gesamteinspeisung in die Zone |
| q_vs_mittel | $[m^3/h]$ | Mittlere scheinbare Wasserverluste in der Zone |
| q_vr_mittel | $[m^3/h]$ | Mittlere reale Wasserverluste in der Zone |

Anhand der Informationen aus Tabelle 5.19 können mit dem hydraulischen Modell für jede Zone die Lastfälle der minimalen, mittleren und maximalen Wasserabgabe simuliert werden. Als Ergebnisse der Simulationsrechnungen können die minimalen, maximalen und mittleren Drücke an den Knoten des Leitungsnetzes sowie die minimalen, mittleren und maximalen Fließgeschwindigkeiten an allen Leitungssegmenten vom hydraulischen Modell an die WMA zurückgegeben werden. Diese Informationen fließen in die Berechnung von Kennzahlen (s. Abschnitt 5.6) sowie die Ursachenanalyse (s. Abschnitt 5.7) ein.

5.6 Modul PI - Kennzahlen

Nachdem die einzelnen Komponenten der Wasserbilanz ermittelt wurden (Modul WB), stehen die notwendigen Eingangsparameter für die Berechnung von Kennzahlen in Modul PI zur Verfügung. Für jede betrachtete Bilanzierungszone sowie für das Gesamtsystem wird ein Set aus Kennzahlen berechnet, das sich thematisch in die Gruppen allgemeine, finanzielle, betriebliche und ökologische Kennzahlen unterteilen lässt. Die ermittelten Kennzahlen bilden die Grundlage für die Analyse der Ursachen der Wasserverluste, die anschließend in Modul UA durchgeführt wird.

5.6.1 Allgemeine Kennzahlen

Für die Beschreibung der einzelnen Bilanzierungszonen werden folgende allgemeine Kennzahlen ermittelt (s. Abschnitte 2.4.2 und 2.4.3):

- Spezifische Rohrnetzeinspeisung q_N
- Mittlerer Versorgungsdruck P_m
- Hausanschlussdichte D_{AL}
- Absperrschieberdichte D_{AS}
- Mittleres Alter A_{HWVW} an HW und VW
- Mittleres Alter A_{AW} an AW
- Average Network Age Index NAX_{HWVW} an HW und VW
- Average Network Age Index NAX_{AW} an AW

5.6.2 Finanzielle Kennzahlen

Für die Bewertung der finanziellen Auswirkungen der Wasserverluste werden folgende Kennzahlen berechnet (s. Abschnitt 4.5.2):

- Nicht genutzte Wasserressourcen $WR1$
- Kaufmännische Wasserverluste $Fi46$
- Kaufmännische Wasserverluste in Relation zum Betriebsaufwand $Fi47$
- Kosten der realen Wasserverluste K_{VR}
- Kosten der scheinbaren Wasserverluste K_{VS}

Unter der Voraussetzung, dass Angaben zur Höhe der Kosten für Fremdbezug, Energie, Chemikalien sowie Personal und sonstige betrieblichen Kosten zur Verfügung stehen, können deren jeweilige Anteile an K_{VR} und K_{VS} für jede Zone separat ausgewiesen werden.

5.6.3 Betriebliche Kennzahlen

Für die technische Bewertung und den Vergleich der Wasserverluste einzelner Bilanzierungszonen werden folgende Kennzahlen berechnet (s. Abschnitte 2.4.3.5 und 4.5.3):

- Spezifische reale Wasserverluste q_{VR} (bzw. $Op24$)
- Verluste pro Hausanschluss und Tag $Op27$
- Reale Verluste pro Hausanschluss und Tag pro Meter Versorgungsdruck q_{VRP}
- Current Annual Real Losses $CARL$
- Unavoidable Annual Real Losses $UARL$
- Infrastructure Leakage Index ILI

- Leitungsschäden *Op31*,
- Anschlussleitungsschäden *Op32*

Für die Berechnung des UARL (s. Abschnitt 4.5.3.4) werden Angaben zum mittleren Versorgungsdruck P_m einer Bilanzierungszone benötigt. Stehen keine Ergebnisse aus der hydraulischen Simulation zur Verfügung, wird ein Pauschalwert von 5,0 *bar* angesetzt, der bei Bedarf für jede Bilanzierungszone angepasst werden kann. Sind Simulationsergebnisse des hydraulischen Modells vorhanden, so werden diese aus der Tabelle $[t_hm_druck]$ eingelesen, deren Struktur in Tabelle 5.20 dargestellt ist. Anhand des berechneten mittleren Drucks an jedem Knoten wird mit Gleichung 2.3 der mittlere Versorgungsdruck P_m einer Zone bestimmt.

Tabelle 5.20: Tabelle $[t_hm_druck]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-------------|----------------|--------------------------------------|
| id_zone | | Eindeutige ID der Bilanzierungszone |
| datum_start | $[jjjj/mm/dd]$ | Start des Untersuchungszeitraums |
| datum_ende | $[jjjj/mm/dd]$ | Ende des Untersuchungszeitraums |
| id_knoten | | Eindeutige ID des Knotens |
| p_min | $[m]$ | Minimaler Versorgungsdruck am Knoten |
| p_mittel | $[m]$ | Mittlerer Versorgungsdruck am Knoten |
| p_max | $[m]$ | Maximaler Versorgungsdruck am Knoten |

5.6.4 Ökologische Kennzahlen

Für die Bewertung der ökologischen Auswirkungen der Wasserverluste berechnet die *WMA* folgende Kennzahlen:

- Durch reale Wasserverluste verlorene Energie V_E
- Durch reale Wasserverluste erzeugte CO_2 -Emissionen E_{CO_2}

Um diese Kennzahlen zu ermitteln, werden in der Austauschdatenbank vorliegende Stromzählerablesungen aus der Tabelle $[t_sz_ablesungen]$ ausgewertet, deren Aufbau in Tabelle 5.21 dargestellt ist. Die Stromzählerablesungen werden anhand Tabelle $[t_sz]$ einer Komponente des Wasserversorgungssystems zugeordnet, beispielsweise einer Pumpe, einem Behälter oder einem BWZ. Die Struktur der Tabelle $[t_sz]$ ist in Tabelle 5.22 dargestellt.

Tabelle 5.21: Tabelle $[t_sz_ablesungen]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|----------------|----------------|--|
| id_zaeher | | Eindeutige ID des Stromzählers |
| energieeintrag | $[kWh/m^3]$ | Spezifischer Energieeintrag bei Fremdbezug |
| datum | $[jjjj/mm/dd]$ | Ablesedatum |
| zaehlerstand | $[kWh]$ | Ablesestand des Zählers |

Somit lässt sich der Energieeintrag und die Mischung von Wasser mit unterschiedlichem spezifischen Energiegehalt im gesamten Versorgungssystem nachvollziehen. Wird ein Teil des

Tabelle 5.22: Tabelle $[t_sz]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|--------------|---------|---|
| id_zaeher | | Eindeutige ID des Stromzählers |
| id_anlage | | Eindeutige ID der zugehörigen Komponente (Pumpe, Behälter etc.) |
| zaehlertyp | | Konventioneller Zähler oder Messwandlerzähler |
| uebersetzung | | Übersetzungsverhältnis des Messwandlers |

Wasseraufkommens eines WVU aus Fremdbezug gebildet, kann die darin enthaltene Energie anhand des Felds „*energieeintrag*“ der Tabelle $[t_sz_ablesungen]$ berücksichtigt und in der Kennzahl E_{CO_2} separat ausgewiesen werden. Um aus dem Energieeintrag Rückschlüsse auf die CO_2 -Emissionen ziehen zu können, wird ein Pauschalwert verwendet. Basierend auf Angaben des Umweltbundesamts (UBA) zu den spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix wird beispielsweise für das Jahr 2011 ein CO_2 -Emissionsfaktor von 566 g/kWh als Pauschalwert angenommen (UBA, 2012).

5.7 Modul UA - Ursachenanalyse

Anhand von Wasserbilanz und Kennzahlen können verschiedene Bilanzierungszonen innerhalb eines Wasserversorgungssystems miteinander verglichen und problematische Zonen identifiziert werden. Die Ursachenanalyse soll darüber hinaus Hinweise geben, warum sich die Wasserverluste in den Zonen unterscheiden und welche Faktoren zu ihrem Entstehen beitragen. Die Funktionalität der WMA ist im Rahmen dieser Arbeit auf die Analyse der Ursachen realer Wasserverluste beschränkt. Folgende Aspekte werden dabei untersucht:

- Laufzeit bekannter Schäden
- Leckrate bekannter Schäden
- Wasserverlustanteil unterschiedlicher Schadensstellen
- Schadensraten unterschiedlicher Leitungsgruppen
- Schadenswahrscheinlichkeit einzelner Rohrleitungen
- Grad der Rohrnetzüberwachung unterschiedlicher Bilanzierungszonen

5.7.1 Laufzeit bekannter Schäden

Abschnitt 5.5.5 beschreibt, wie anhand von Nachtmindestverbrauchsganglinie und Informationen aus der Schadensdatenbank die Laufzeit behobener Schäden bestimmt werden kann. Diejenigen Schäden, deren Schadenseintrittsdatum mithilfe des vorgestellten Ansatzes ermittelt werden konnte, werden im Rahmen der Ursachenanalyse näher untersucht.

Mittlere gesamte Laufzeit von Leitungsschäden Für jede Bilanzierungszone wird der Mittelwert der Laufzeit $t_{S,ges}$ in $[d]$ zwischen vermutetem Schadenseintritt und der Schadensreparatur ermittelt. Der Mittelwert wird separat für Haupt- und Versorgungsleitungen sowie für Anschlussleitungen bestimmt. Der Vergleich der mittleren Schadenslaufzeit einer Bilanzierungszone mit den Mittelwerten anderer Zonen und des Gesamtsystems sowie mit Zielvorgaben zeigt dem WVU, wo Rohrnetzüberwachung und Leckortungsmaßnahmen intensiviert werden sollten.

Zusammensetzung der Laufzeit von Leitungsschäden Anhand des ALR-Konzepts (s. Abschnitt 3.3.6) wird die Zusammensetzung der Laufzeit der Schäden analysiert. Für jede Bilanzierungszone wird der Mittelwert der Laufzeit zwischen vermutetem Schadenseintritt und Schadensmeldung (*Awareness*, $t_{S,A}$ [d]) sowie zwischen Schadensmeldung und Reparatur (*Location and Repair*, $t_{S,LR}$ [d]) ermittelt. Der Mittelwert wird separat für Haupt- und Versorgungsleitungen sowie für Anschlussleitungen bestimmt. Die Zusammensetzung der Laufzeit gibt Aufschluss darüber, ob ein WVU mehr in die Früherkennung von neuen Leckagen investieren sollte (z.B. durch kontinuierliche Rohrnetzüberwachung oder regelmäßige elektroakustische Kontrollen) oder ob zu viel Zeit zwischen Schadensmeldung und -reparatur vergeht.

5.7.2 Leckrate bekannter Schäden

Anhand der Nachtmindestverbrauchsganglinie wurde im Modul WB die Leckrate von Leitungsschäden näherungsweise bestimmt (s. Abschnitt 5.5.5). Es wird nun über alle verfügbaren Schäden hinweg analysiert, ob Zusammenhänge zwischen der Höhe der Leckrate und den jeweiligen Randbedingungen eines Schadens erkennbar sind. Aufgrund der starken Druckabhängigkeit der Leckrate, (s. Abschnitt 3.3.3.8), wird die ermittelte Leckrate auf die Leckrate pro Meter Versorgungsdruck an der Schadensstelle umgerechnet. Dazu wird der vom hydraulischen Modell berechnete mittlere Druck an der Schadensstelle aus der Tabelle $[t_hm_druck]$ eingelesen (s. Tabelle 5.20). Die Leckrate q_s [$m^3/h/m$] kann beispielsweise für unterschiedliche Schadensstellen, Schadensarten oder Werkstoffe gebildet werden:

- Mittlere Leckrate an Haupt- und Versorgungsleitungen
- Mittlere Leckrate an Anschlussleitungen
- Mittlere Leckrate von Korrosionsschäden
- Mittlere Leckrate von Brüchen und Rissen
- Mittlere Leckrate an Graugussleitungen
- Mittlere Leckrate an Duktulgussleitungen
- Mittlere Leckrate an PE-Leitungen

5.7.3 Wasserverlustanteil unterschiedlicher Schadensstellen

Um dem WVU Aufschluss darüber zu geben, welche Schadensstelle (s. Abschnitt 3.3.2) den größten Teil der realen Wasserverluste verursacht, werden anhand der Ergebnisse der Wasserbilanz die prozentualen Anteile der Wasserverlustkomponenten $Q_{VR.1}$ bis $Q_{VR.5}$ verglichen. Diese Analyse gibt Hinweise darüber, ob die realen Wasserverluste innerhalb einer bestimmten Zone hauptsächlich den Haupt- und Versorgungsleitungen, den Anschlussleitungen oder den Wasserbehältern zuzuordnen sind und wie groß der Anteil der Verluste aus unbekanntem Schäden ist. Stellt $Q_{VR.5}$ einen geringen Anteil der realen Wasserverluste einer Bilanzierungszone, deutet dies darauf hin, dass das WVU den größten Teil der detektierbaren Leckagen schnell erkennt und behebt.

5.7.4 Schadensraten unterschiedlicher Leitungsgruppen

Die Entwicklung und der aktuelle Stand der Schadensraten unterschiedlicher Leitungsgruppen eines Wasserversorgungsnetzes werden bestimmt. Voraussetzung ist, dass Leitungsgruppen definiert wurden und in der Tabelle $[t_leitungsgruppen]$ abgelegt sind, deren Struktur in Tabelle 5.23 abgebildet ist. Weiterhin wird die Tabelle $[t_leitungsbestand]$ eingelesen, die in

Tabelle 5.24 gezeigt wird. In dieser Tabelle ist die historische Entwicklung des Bestands jeder Leitungsgruppe dokumentiert.

Tabelle 5.23: Tabelle $[t_leitungsgruppen]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-----------|---------|--|
| gruppe | | Name der Leitungsgruppe |
| werkstoff | | ID des Werkstoffs, der der Leitungsgruppe zugeordnet ist |
| von_bj | | Untere Baujahrgrenze |
| bis_bj | | Obere Baujahrgrenze |
| von_dn | | Untere Durchmessergränze |
| bis_dn | | Obere Durchmessergränze |

Tabelle 5.24: Tabelle $[t_leitungsbestand]$

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|--------|---------|--|
| gruppe | | Name der Leitungsgruppe |
| jahr | | Bezugsjahr |
| laenge | $[km]$ | Gesamtlänge der Leitungen einer Leitungsgruppe |

Informationen zu Schadensereignissen werden vom GIS in der Tabelle $[t_schaeden]$ bereitgestellt, deren Aufbau in Tabelle 5.25 abgebildet ist. Jeder Schaden ist einer Leitung aus dem GIS-Leitungskataster zugeordnet (s. Tabelle 5.26). Somit können jedem Schaden zusätzlich zu den Informationen aus der Tabelle $[t_schaeden]$ weitere, leitungsgebundene Informationen zugewiesen werden, z.B. Leitungsart (HW, VW, AW) oder Umwelteinflüsse (Bodeneigenschaften, Verkehrsbelastung etc.) und die Zugehörigkeit eines Schadens zu einer Bilanzierungszone bestimmt werden. Für jedes Jahr, für das Angaben in $[t_leitungsbestand]$ vorliegen, wird die Anzahl der Schäden pro Leitungsgruppe ermittelt und nach Schadensursachen gruppiert. Für jedes betrachtete Jahr wird die Schadensrate jeder Leitungsgruppe berechnet. Für jede Leitungsgruppe wird aus den Werten der fünf zurückliegenden Jahre die mittlere jährliche Schadensrate S [$Schäden/km/a$] gebildet (s. Abschnitt 2.4.3.5). Weiterhin werden für jede Leitungsgruppe die ursachenspezifischen Schadensraten infolge Bodenbewegung (S_{BB}), betrieblicher Ursachen (S_{BU}) und Korrosion (S_{KO}) in [$Schäden/km/a$] berechnet.

Für jede Bilanzierungszone kann der Erwartungswert der jährlichen Schäden berechnet werden, indem die Schadensrate S jeder Leitungsgruppe mit der zugehörigen Leitungslänge in dieser Zone multipliziert wird. Dieser Erwartungswert kann mit der tatsächlichen Anzahl der Schäden im Betrachtungszeitraum verglichen werden, um zu bestimmen, ob eine Zone überdurchschnittlich viele Schäden aufweist.

5.7.5 Schadenswahrscheinlichkeit einzelner Rohrleitungen

In Abschnitt 3.3.3 wurde dargestellt, welche Einflussgrößen die Entstehung von Schäden an Rohrleitungen beeinflussen. Die Kenntnis der Schadenswahrscheinlichkeit unterstützt WVU dabei, innerhalb eines großen Leitungsnetzes potenzielle Schwachstellen identifizieren zu können, die das Entstehen von Wasserverlusten begünstigen. In Anlehnung an ein von Przygodda

Tabelle 5.25: Tabelle *[t_schaeden]*

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|--------------------|---------|--|
| id_schaden | | Eindeutige ID des Schadensereignisses |
| id_leitung | | ID die auf <i>[Rohrleitungen]</i> verweist |
| sp_baujahr | | Baujahr laut Schadensprotokoll |
| sp_werkstoff | | Werkstoff laut Schadensprotokoll |
| sp_nennweite | [mm] | Nennweite laut Schadensprotokoll |
| sp_aussenschutz | | Aussenschutz laut Schadensprotokoll |
| sp_innenschutz | | Innenschutz laut Schadensprotokoll |
| sp_bettung | | Sand, Kiessand, Aushubmaterial etc. |
| sp_zustand | | Gut, angegriffen etc. |
| sp_schadensart | | Bruch, Riss, Korrosion etc. |
| sp_schadensursache | | Bodenbewegung, Fremdeinwirkung etc. |

(2003) vorgestelltes Konzept zur Risikobewertung von Pipelineanlagen wird eine Vorgehensweise zur Bewertung der Schadenswahrscheinlichkeit von Leitungssegmenten genutzt, die im Folgenden vorgestellt wird. Die Basis hierfür bilden das GIS-Leitungskataster und die Schadensdatenbank des WVU, die aus der Tabelle *[t_schaeden]* eingelesen wird (s. Tabelle 5.25).

In einem digitalen GIS-basierten Leitungskataster werden Wasserversorgungssysteme in einzelne Leitungssegmente einheitlicher Eigenschaften (Durchmesser, Material, Baujahr) zerlegt. Für jedes Leitungssegment können mithilfe gebräuchlicher GIS-Funktionalitäten (Überlagerung, Verschneidung, Umgebungsanalyse) die lokal vorherrschenden Umwelteinflüsse bestimmt werden. Das GIS stellt der WMA alle verfügbaren Leitungsinformationen über die Tabelle *[t_rohrleitungen]* zur Verfügung, deren Struktur in Tabelle 5.26 gezeigt wird. Falls dem WVU zusätzliche Leitungsinformationen vorliegen (z.B. Wandstärke, Innen- und Außenbeschichtung, KKS etc.), kann die Tabelle *[t_rohrleitungen]* ergänzt werden, um die Analysemöglichkeiten weiter zu verfeinern.

1. Plausibilitätsprüfung

Die Angaben aus der Tabelle *[t_rohrleitungen]* zu Werkstoff und Baujahr werden auf Widersprüche zu den Informationen der Schadensdatenbank überprüft. Liegt ein Schadensereignis vor dem Baujahr des zugehörigen Leitungssegments, wurde die ursprüngliche Leitung vermutlich ausgetauscht, aber nicht im GIS dokumentiert. In diesem Fall wird ein fiktives Leitungssegment mit den Leitungseigenschaften (Werkstoff, Durchmesser, Baujahr etc.) aus der Schadensdatenbank und den Umwelteinflüssen (Verkehr, Streustrom, Boden etc.) der aktuellen Leitung generiert. Der Ansatz zur Bewertung der Schadenswahrscheinlichkeit gliedert sich in fünf Schritte:

2. Einschränkung der Analyse auf gewählte Schadensarten

Wie in Abschnitt 3.3.4.1 gezeigt wird, können vier Schadensarten an Rohrleitungen unterschieden werden: Bruch, Riss, Korrosion sowie undichte Rohrverbindung. Die Schadensarten Bruch und Riss können zusammengefasst werden, da sie hauptsächlich durch die gleichen Schadensursachen ausgelöst werden und lediglich der unterschiedlichen Versagensform spröder bzw. zäher Werkstoffe Rechnung tragen. Da undichte Rohrverbindungen als Schadensart

Tabelle 5.26: Tabelle *[t_rohrleitungen]*

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|---------------------|---------|--|
| id_leitung | | Eindeutige ID des Leitungssegments |
| id_zone | | ID der Zone |
| anfangsknoten | | ID des Anfangsknotens aus <i>[t_knoten]</i> |
| endknoten | | ID des Endknotens aus <i>[t_knoten]</i> |
| laenge | [m] | Länge des Leitungssegments |
| leitungsart | | ZW, HW, VW oder AW |
| zustand | | In Betrieb, außer Betrieb, in Planung |
| nennweite | [mm] | Nennweite der Leitung |
| werkstoff | | Beschreibung des Leitungsmaterials |
| baujahr | [jjjj] | Baujahr des Leitungssegments |
| stilllegung | [jjjj] | Datum der Außerbetriebnahme |
| substanzwert | | Substanzwert des Leitungssegments |
| verlegetiefe | [m] | Verlegetiefe der Leitung |
| bettung | | Sand, Kiessand, Aushubmaterial, etc. |
| verkehrsbelastung | | Keine, gering, mittel, hoch |
| streustrombelastung | | Keine, gering, mittel, hoch |
| grundwasser | | Immer über GW-Spiegel, in GW-Wechselzone oder immer unter GW-Spiegel |
| bodenaggressivitaet | | Nicht aggressiv bis stark aggressiv |
| bodenkonsistenz | | Nichtbindig bis stark bindig |
| vorschaeden | | Anzahl der Vorschäden des Leitungssegments |

relativ selten sind (vgl. Abbildung 3.5) und entscheidende Einflussgrößen für ihr Auftreten sowohl schwer zu ermitteln sind (z.B. Druckstoß in langen, vermaschten Netzen) als auch von WVU in der Regel nicht im GIS dokumentiert werden, (z.B. Art der Verbindung, Verbindungsfehler, Verlegefehler), wird diese Schadensart in der Analyse nicht berücksichtigt.

3. Einschränkung der Analyse auf gewählte Schadensursachen

Für jede Schadensart gibt es mehrere charakteristische Schadensursachen, die wiederum von einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen abhängt, wie Abbildung 5.14 veranschaulicht. In Deutschland machen Korrosion, Bodenbewegungen und sonstige Ursachen gemeinsam 75 % der Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen bzw. 64 % der Schäden an Anschlussleitungen aus (s. Abbildung 3.5). Unter sonstigen Ursachen sind hauptsächlich betrieblich bedingte Schadensereignisse zu verstehen, die sich aus der vom WVU angewandten Instandhaltungsstrategie (Alter, Substanzwert, Anzahl von Vorschäden bis zum endgültigen Austausch eines Leitungsabschnitts) und der Fahrweise der Rohrnetze (Druckstöße, maximale Drücke, Höhe der Druckschwankungen) ergeben. Da Fremdeinwirkung und Mängel an Leitungen und Zubehör prozentual nur eine untergeordnete Rolle spielen und die zugehörigen Einflussgrößen (z.B. Tiefbau-Aktivität, Planungsfehler, mangelhafte Bauausführung) schwer zu erfassen sind, werden diese Ursachen von der Analyse der Schadenswahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Folglich wird die Schadenswahrscheinlichkeit infolge von Bodenbewegung und betrieblicher Ursachen für die Schadensarten Bruch und Riss, sowie infolge von Außen- und Innenkorrosion für die Schadensart Korrosion analysiert (in Abbildung 5.14 grün hinterlegt).

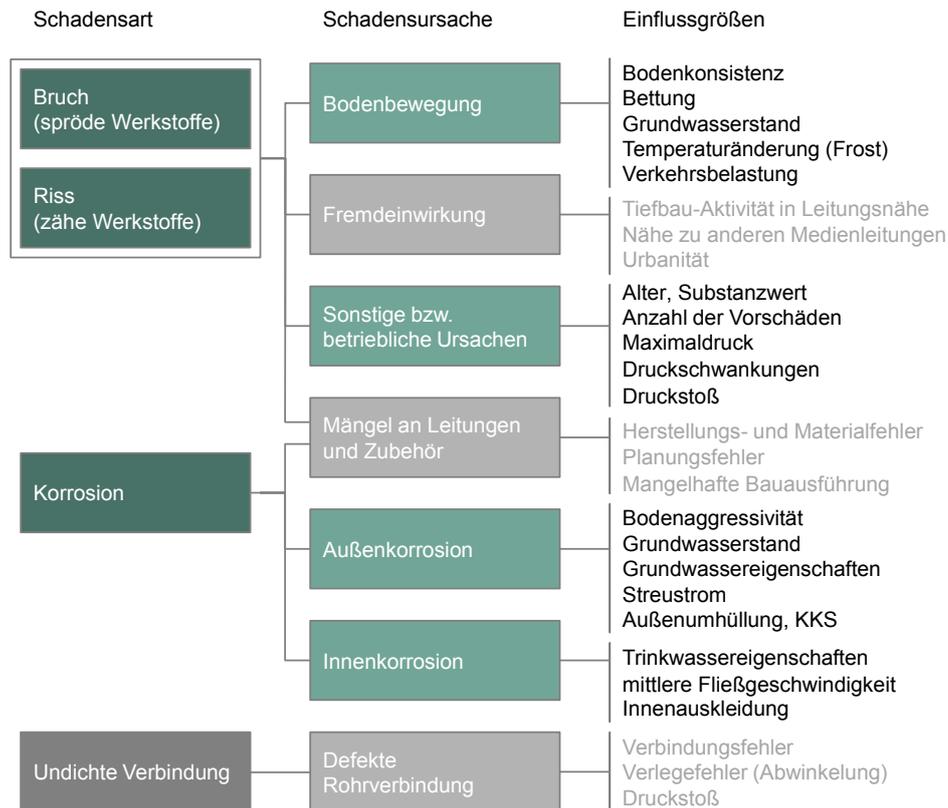


Abbildung 5.14: Zusammenhang zwischen Schadensarten, -ursachen und verschiedenen Einflussgrößen

4. Festlegung und Berechnung von Risikoparametern

Um die Schadenswahrscheinlichkeit von Leitungssegmenten innerhalb großer Rohrnetze, die komplexen und stark heterogenen inneren und äußeren Einflussgrößen unterliegen, einheitlich bewerten zu können, sind die unterschiedlichen Einflussgrößen zu skalieren. Dazu werden nach Przygodda (2003) dimensionslose Risikoparameter zur Beurteilung der Schadenswahrscheinlichkeit gebildet:

- Bodenbewegung R_{BB}
- Betriebliche Ursachen R_{BU}
- Außenkorrosion R_{AK}
- Innenkorrosion R_{IK}

Jeder Risikoparameter wird anhand der in Abbildung 5.14 aufgelisteten relevanten Einflussgrößen bewertet, sofern diese verfügbar sind. Die berücksichtigten Einflussgrößen werden durch eine Bewertungsvariable v_i repräsentiert. Tabelle 5.27 zeigt an einem fiktiven Beispiel, wie die Bewertungsvariablen v_i der Einflussgrößen Bodenkonsistenz und Bettung anhand der jeweiligen Bodeneigenschaften bestimmt werden.

Das Beispiel zeigt, dass in stark bindigem bzw. sehr stark bindigem Boden die Wahrscheinlichkeit eines Schadens gegenüber dem Referenzwert (sehr gering bindig) um den Faktor 1,3 steigt. Bettung der Rohre in gesiebttem oder unbehandeltem Aushubmaterial erhöht die Schadenswahrscheinlichkeit gegenüber dem Referenzwert (Bettung aus Sand oder Kiessand) in die-

Tabelle 5.27: Bestimmung der Bewertungsvariable

| Einflussgröße | Ausprägung | Bewertungsvariable v_i |
|---------------------------|-------------------------|--|
| Bodenkonsistenz (v_1) | sehr gering bindig | 1,0 |
| | gering bindig | 1,1 |
| | mittel bindig | |
| | stark bindig | 1,3 |
| | sehr stark bindig | |
| Bettung (v_2) | Sand oder Kiessand | 1,0 |
| | gesiebter Aushub | 1,2 |
| | wiederverfüllter Aushub | |

sem Beispiel um den Faktor 1,2. Die jeweiligen Faktoren sind mittels geeigneter statistischer Verfahren zu ermitteln und in der Tabelle *[t_bewertungsvariablen]* abzulegen, deren Aufbau Tabelle 5.28 zeigt. Przygodda (2003) empfiehlt, jeder Bewertungsvariable einen Gewichtungsfaktor η_{vi} zuzuordnen, um die unterschiedliche Relevanz der Einflussgrößen im Rahmen der Gefährdungsbildung eines Risikoparameters ausreichend zu berücksichtigen. Die Summe der Gewichtungsfaktoren eines Risikoparameters soll gleich 1 sein. Der Risikoparameter wird durch Aufsummieren der gewichteten Bewertungsvariablen berechnet, wie Gleichung 5.14 zeigt.

Tabelle 5.28: Tabelle *[t_bewertungsvariablen]*

| Feld | Einheit | Beschreibung |
|-----------------|----------------|--|
| einflussgroesse | | ID der Einflussgröße |
| ursache | | Zuordnung der Einflussgröße zu einer Schadensursache |
| auspraegung | | Beschreibung der Ausprägung |
| v | | Bewertungsvariable v_i |
| eta | | Gewichtungsfaktor η_{vi} |

$$R = \sum_{i=1}^n v_i \times \eta_{vi} \quad (5.14)$$

5. Bestimmung der relativen Schadenswahrscheinlichkeit

Nach der Berechnung der Risikoparameter wird für jedes Leitungssegment die individuelle Schadenswahrscheinlichkeit $S_{Segment}$ [*Schäden/km/a*] bestimmt. Dazu werden die Risikoparameter mit den zuvor bestimmten ursachenspezifischen Schadensraten (s. Abschnitt 5.7.4) multipliziert, wie Gleichung 5.15 zeigt. Die ursachenspezifische Schadensrate S_{KO} wird sowohl für Innen- als auch Außenkorrosion angewendet, da deren genaue Unterscheidung im Feld oft schwierig ist und daher häufig nicht differenziert im Schadensprotokoll erfasst wird.

$$S_{Segment} = R_{BB} \times S_{BB} + R_{BU} \times S_{BU} + R_{AK} \times S_{KO} + R_{IK} \times S_{KO} \quad (5.15)$$

Anschließend wird $S_{Segment}$ gemäß Gleichung 5.16 ins Verhältnis zur mittleren Schadensrate S der entsprechenden Leitungsgruppe (s. Abschnitt 5.7.4) gesetzt, woraus sich die dimensionslose Kennzahl der relativen Schadenswahrscheinlichkeit S_{rel} ergibt.

$$S_{rel} = \frac{S_{Segment}}{S} \quad (5.16)$$

Die Ergebnisse von S_{rel} können im GIS für jede einzelne Leitung visualisiert werden. Nimmt S_{rel} Werte größer 1 an, weist das betroffene Leitungssegment eine überdurchschnittlich hohe Wahrscheinlichkeit für einen Schadenseintritt und somit für die Entstehung von Wasserverlusten auf.

5.7.6 Grad der Rohrnetzüberwachung unterschiedlicher Bilanzierungszonen

Der Grad der Rohrnetzüberwachung wird zonenweise bestimmt. Dazu wird analysiert, welcher Anteil der Rohrnetzeinspeisung in Minutenintervallen überwacht wird (Messwerte), welcher Anteil in Stundenintervallen gemessen wurde (Zählwerte) und welcher Anteil lediglich in täglichen, monatlichen oder längeren Intervallen überwacht wird. Die Überwachung der Einspeisung hat großen Einfluss auf die Erkennbarkeit von Leckagen und damit auf deren Laufzeit.

6 Pilothaftige Umsetzung der automatisierten Wassermengenanalyse

6.1 Kapitelüberblick

Für die pilothafte Implementierung und Erprobung des entwickelten Ansatzes wurde das Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim gewählt. Die SWP begleiten das Forschungsprojekt *AWaRe* als Praxispartner und bieten ideale Voraussetzungen für die Erprobung der automatisierten Wassermengenanalyse: Zum Einen ist das Versorgungsgebiet aufgrund der topographischen Randbedingungen in 30 Versorgungszonen unterteilt, so dass eine zonenweise Bilanzierung und Analyse der Wasserverluste wichtig und sinnvoll ist. Zum Anderen ist das Wasserversorgungssystem der SWP vollständig und sehr detailliert in einem GIS dokumentiert. Es besteht zudem die Möglichkeit, weitere zentrale IT-Systeme wie das Leitsystem, die Kundenabrechnung oder das Auftragszentrum an dieses GIS anzubinden.

In Abschnitt 6.2 wird das Versorgungsgebiet der Stadtwerke Pforzheim vorgestellt. Es werden ausgewählte naturräumliche und infrastrukturelle Randbedingungen beschrieben, die den Betrieb der Wasserversorgung und die Entstehung von Schäden und Wasserverlusten beeinflussen. Das Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim wird in Abschnitt 6.3 vorgestellt. Grundlegende Eigenschaften der Anlagen zur Gewinnung, Aufbereitung, Förderung, Speicherung und Verteilung des Trinkwassers an die Abnehmer werden beschrieben. Anschließend wird ein Überblick über die Wasserverlustsituation in Pforzheim gegeben. In Abschnitt 6.4 wird die Anbindung der *WMA* an die IT-Systeme der SWP beschrieben. Die angebundenen IT-Systeme und die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten werden dargestellt. In Abschnitt 6.5 werden die verschiedenen Pilotzonen vorgestellt. Abschnitt 6.6 gibt einen Überblick über den Testbetrieb des Werkzeugs.

6.2 Versorgungsgebiet der Stadt Pforzheim

6.2.1 Demographie

Laut Statistischem Jahrbuch der Stadt Pforzheim waren am 31. Dezember 2010 insgesamt 119.781 Einwohner gemeldet. Somit zählt Pforzheim zu den Großstädten Deutschlands (Pforzheim, 2010). Die Stadt gliedert sich in die Kernstadt mit mehreren Stadtteilen sowie in fünf ehemals eigenständige Gemeinden im Süden und Osten der Stadt, die in den 1970er Jahren eingemeindet wurden: Eutingen (mit dem Neubaugebiet Mäuerach), Büchenbronn, Hohenwart, Huchenfeld und Würm (Pforzheim, 2010). Aktuell leben ca. 93.366 Einwohner (80,4 %) in den Ortsteilen der Kernstadt (Pforzheim, 2010). Die übrigen 22.766 Einwohner (19,6 %) leben in den umliegenden Ortsteilen Büchenbronn (6.234), Eutingen (7.816), Hohenwart (1.709), Huchenfeld (4.170) und Würm (2.837) (vgl. Abbildung 6.4). Abbildung 6.1 zeigt, dass die Bevölkerung der Stadt in den Nachkriegsjahren stark angewachsen ist.

Zwischen 1971 und 1975 wurden die oben genannten umliegenden Ortsteile eingemeindet, was zu einem weiteren sprunghaften Anstieg der Einwohnerzahl führte. Danach folgte

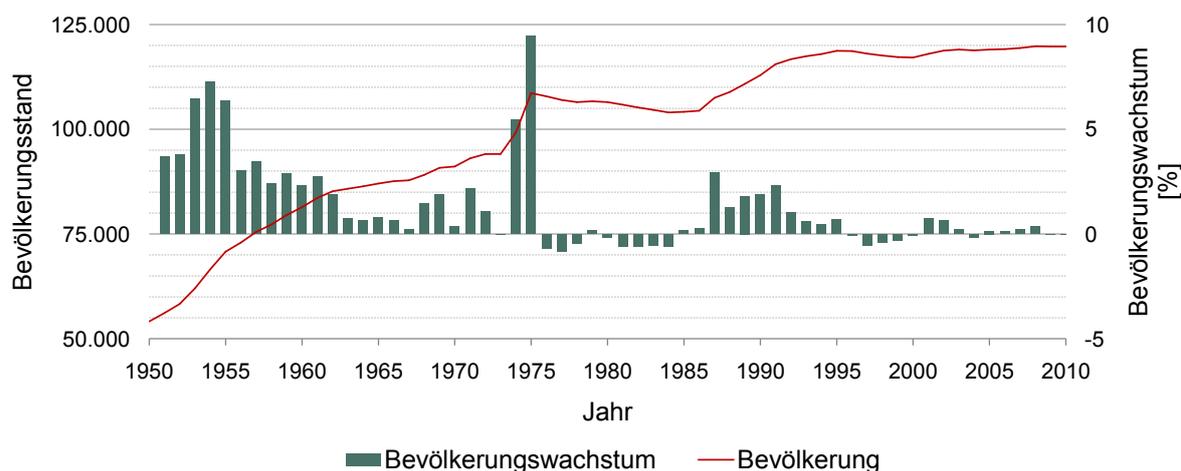


Abbildung 6.1: Bevölkerungsentwicklung der Stadt Pforzheim, 1950 bis 2010¹

eine Stagnationsperiode bis zum Ende der 1980er Jahre, als im Zuge der deutschen Wiedervereinigung die westdeutschen Städte von der Migration aus den neuen Bundesländern profitierten. Seit 1993 sind die Wachstumsraten wieder unter ein Prozent gesunken und die Bevölkerungszahl stagniert bei knapp unter 120.000 Einwohnern.

6.2.2 Geografie

Das Stadtgebiet Pforzheims wird durch seine ausgeprägte Topographie bestimmt: Von Süden kommend haben sich die mäandrierenden Flüsse Enz, Nagold und Würm über hundert Meter tief in ein Plateau eingeschnitten, auf dem die Ortsteile Hohenwart, Büchenbronn, Huchenfeld und Würm liegen. Der Stadtkern Pforzheims liegt nördlich dieses Plateaus in einer Talmulde, die sich von Osten nach Westen entlang der Enz erstreckt. Jenseits der Enz steigt das Stadtgebiet zur Bauschlotter Platte hin an und wird im Norden durch den Verlauf der Bundesautobahn A8 begrenzt. Der höchste Punkt innerhalb der Gemarkungsgrenzen liegt am Südwestrand auf dem Gipfel der Büchenbronner Höhe (607,8 müNN). Der tiefste Punkt (235,0 müNN) befindet sich am nordöstlichen Rand der Stadt, wo die Enz die Gemarkung verlässt.

6.2.3 Geologie

Geologische Situation Pforzheim liegt im Bereich der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft. Der Untergrund baut sich hier ausgehend vom kristallinen Grundgebirge schichtweise von Buntsandstein über Muschelkalk und Keuper hin zu quartären Deckschichten auf. Das Stadtgebiet gliedert sich in zwei Bereiche: Nördlich der Enz trifft man überwiegend auf Muschelkalk, während südlich des Flusses der Buntsandstein vorherrscht (Armbruster u. a., 2004). In den Flusstälern von Nagold, Enz und Würm wurde durch Erosionsvorgänge mittlerer Buntsandstein angeschnitten, die Plateaus liegen im Bereich des oberen Buntsandsteins. Nördlich der Enz baut sich der Untergrund schichtweise von unterem über mittleren und oberen Muschelkalk hin zum Keuper auf. Die Abfolge, räumliche Lage und Verbreitung der Gesteinsschichten im Untergrund und ihre hydraulischen Eigenschaften bestimmen laut Armbruster u. a. (2004) wesentlich das Vorkommen und die Bewegung von Grundwasser.

¹Quelle: Pforzheim (2010)

In Pforzheim wechseln wasserdurchlässige, grundwasserleitende Schichten wie jungquartäre Flusskiese und -sande, oberer und unterer Muschelkalk sowie mittlerer und unterer Buntsandstein mit Grundwassergeringleitern wie beispielsweise quartären Deckschichten, künstlichen Auffüllungen, mittlerem Muschelkalk und oberem Buntsandstein ab.

Bodenaggressivität Um die Gefährdung metallischer Rohrleitungen durch Außenkorrosion beurteilen zu können (s. Abschnitt 3.3.3.5), erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) des Regierungspräsidiums Freiburg eine Einschätzung der Bodenaggressivität im Versorgungsgebiet der SWP. Dies geschah auf Grundlage der Bodenkarte von Baden-Württemberg im Maßstab 1:50.000 (BK50). Da diese nicht flächendeckend zur Verfügung steht, wurde für fehlende Bereiche die Geologische Karte von Baden-Württemberg im gleichen Maßstab (GK50) hinzugezogen. Die in BK50 und GK50 kartierten Bodeneinheiten und geologischen Einheiten wurden den vier Bodenaggressivitäts-Klassen gemäß Tabelle 3.2 zugeordnet. Die Aussagen zur Bodenklasse beziehen sich auf den Tiefenbereich zwischen 0,8 und 1,5 m unter der Geländeoberfläche. Da die Daten für den Maßstabsbereich 1:50.000 erhoben wurden, ist mit einer gewissen räumlichen Unschärfe zu rechnen. Weiterhin können insbesondere im Siedlungsbereich Auffüllungen vorhanden sein, deren Zusammensetzung und kleinräumige Verbreitung unbekannt ist (Quelle: Dr. Frank Waldmann, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Referat 93 Landesbodenkunde, persönliche Mitteilung, 13.09.2012). Den Leitungssegmenten wurden die folgenden Attribute zur Aggressivität der umgebenden Böden zugeteilt:

- praktisch nicht aggressiv (Ia)
- schwach aggressiv (Ib)
- aggressiv (II)
- stark aggressiv (III)

Bodenkonsistenz Um das Risiko von Rohrschäden infolge von Bewegungsvorgängen im Boden (s. Abschnitt 3.3.3.6) beurteilen zu können, wurde die Bodenkonsistenz der Böden im Untersuchungsgebiet analysiert. Hierzu wurde für die in der BK50 kartierten Böden anhand ihres Sand-, Ton- und Schluffgehaltes gemäß den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung die Bindigkeit bestimmt (Sponagel u. a., 2005). Auch hier wurden die Lücken der BK50 im Bereich bebauter Flächen, für die keine Bodenkartierung durchgeführt wurde, mit Hilfe von Informationen über Deckschichten aus der GK50 geschlossen. Die in der GK50 kartierten geologischen Einheiten wurden gemäß den Vorgaben aus DIN 18196 *Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke* und DIN 1054 *Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau* in bindige bzw. nichtbindige Böden unterteilt (DIN (2011), DIN (2010)). Die oben gemachte Aussage über die Unschärfe der Daten gilt gleichermaßen für die ermittelte Bodenkonsistenz. Den Leitungssegmenten wurden die folgenden Attribute zur Konsistenz der umgebenden Böden zugeteilt:

- sehr gering bindig
- gering bindig
- mittel bindig
- stark bindig
- sehr stark bindig

Grundwasser Um den Einfluss wechselnder Grundwasserstände auf Korrosions- und Setzungsvorgänge an Rohrleitungen einschätzen zu können (s. Abschnitt 3.3.3.6), wurde auf Informationen der *Hydrogeologischen Erkundung (HGE) Enztal - Pforzheim* zurückgegriffen (Armbruster u. a., 2004). Grundwasserstände reagieren zeitlich verzögert auf Niederschlagsereignisse: Hohe Niederschläge im Winterhalbjahr führen dazu, dass maximale Grundwasserstände im Frühjahr erreicht werden. Im Herbst befindet sich das Grundwasser auf seinem niedrigsten Stand, da einerseits die Sommermonate niederschlagsärmer sind und andererseits aufgrund der Wachstumsperiode der Vegetation die Versickerungsrate reduziert wird. Im Rahmen der HGE wurden je eine Stichtagsmessung der Grundwasserstände im Oktober 2000 und im Mai 2001 durchgeführt. In diese Stichtagsmessungen wurden insgesamt 477 Messstellen (darunter 53 Messstellen an Oberflächengewässern) einbezogen. Aus den gemessenen Wasserständen wurden für die Grundwasservorkommen in den Enzkiesen, im Muschelkalk und im Buntsandstein jeweils getrennte Grundwassergleichenpläne für den maximalen und den minimalen Grundwasserstand erstellt (Armbruster u. a., 2004).

Die Grundwassergleichenpläne wurden in das GIS der SWP übernommen, wo eine Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell (DGM) und den Rohrleitungen unter Berücksichtigung der Verlegetiefe stattfand. Den Leitungssegmenten wurden die folgenden Attribute zur Lage des Grundwassers zugeteilt:

- Leitung immer oberhalb des Grundwasserspiegels
- Leitung im Bereich wechselnder Grundwasserstände
- Leitung immer unterhalb des Grundwasserspiegels

Die gewonnenen Erkenntnisse zu Bodenaggressivität, Bodenkonsistenz und Grundwasserstand fließen in die Analyse der Schadensursachen an Rohrleitungen ein (s. Abschnitt 6.3.3.2).

6.2.4 Infrastruktur

Straßenverkehr Wie in Abschnitt 3.3.3.10 gezeigt wurde, sind Belastungen aus dem Straßenverkehr, insbesondere dem LKW-Verkehr, als eine wichtige Ursache für Schäden an Rohrleitungen durch Setzungen und Bodenbewegungen zu sehen. Der gesamte Kraftfahrzeugbestand im Untersuchungsgebiet umfasst circa 60.000 Fahrzeuge, darunter ca. 52.600 PKW, 3.700 Krafträder und ca. 2.300 LKW (Pforzheim, 2010) .

Um die aus dem Verkehr resultierende unterschiedliche Belastung verschiedener Leitungsabschnitte beurteilen zu können, wurde auf den Verkehrsentwicklungsplan (VEP) 2008 der Stadt Pforzheim zurückgegriffen (Kopperschläger und Wenzel, 2008). Im Rahmen der Erhebung von verkehrlichen Grundlagendaten für die Straßenlärmkartierung wurden von Kopperschläger und Wenzel (2008) mithilfe von Verkehrszählungen und Simulationen die Verkehrsstärken des Tages- und Nachtbereiches, differenziert nach PKW- und Schwerverkehr ermittelt. Der VEP gibt somit für die wichtigsten Straßen im Stadtgebiet Pforzheims an, von wie vielen PKW und LKW diese pro Tag befahren werden. Die linienförmigen Informationen des VEP wurden in das GIS der SWP übernommen und dort auf die Verkehrsflächen der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) übertragen. Durch die Verschneidung des Rohrleitungsnetzes mit den Flurstücksflächen der ALK ist es möglich, jedem Leitungssegment die zugehörige Verkehrsbelastung zuzuweisen:

- keine Verkehrsbelastung (unbebaute Flurstücke)
- nur PKW-Verkehr (ALK-Verkehrsflächen ohne Angaben aus dem VEP)
- geringe Verkehrsbelastung (< 100 LKW/d)

- mittlere Verkehrsbelastung (101 bis 500 LKW/d)
- hohe Verkehrsbelastung (501 bis 1.000 LKW/d)
- sehr hohe Verkehrsbelastung (> 1.000 LKW/d)

Schienerverkehr Wie in Abschnitt 3.3.3.5 erläutert, können Streuströme in der Umgebung von gleichstrombetriebenen Straßenbahnen zu einer Beschleunigung der Korrosionsprozesse führen. Da in Pforzheim die letzte Straßenbahnlinie im Jahr 1964 stillgelegt wurde, konnte diese Einflussgröße in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt gelassen werden.

Sonstige Infrastruktur Mittelspannungs- (MS) und Hochspannungsleitungen (HS), die in unmittelbarer Nähe metallischer Leitungen verlegt sind, können ebenfalls Korrosionsprozesse beschleunigen. Da die SWP neben der Wasserversorgung auch für die Versorgung ihrer Kunden mit Strom, Gas und Fernwärme zuständig sind, ist die Lage der MS- und HS-Leitungen im GIS genau dokumentiert. Über eine Umgebungsanalyse lässt sich daher ermitteln, wie groß der Abstand einer Rohrleitung zur nächsten MS- bzw. HS-Leitung ist. Den Leitungsegmenten wurden die folgenden Attribute zur Streustrombelastung zugeteilt:

- keine Streustrombelastung (Abstand > 10 m)
- geringe Streustrombelastung (Abstand 5 bis 10 m)
- mittlere Streustrombelastung (Abstand 1 bis 5 m)
- hohe Streustrombelastung (Abstand < 1 m)

Die gewonnenen Erkenntnisse zu Verkehrs- und Streustrombelastung fließen in die Analyse der Schadensursachen an Rohrleitungen ein, deren Ergebnisse in Abschnitt 6.3.3.2 zusammengefasst werden.

6.3 Wasserversorgung der Stadt Pforzheim

6.3.1 Die Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG

Aufgaben Die Kernaufgaben der Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG sind der Handel und der Netzbetrieb mit Strom und Gas in Pforzheim und der Region sowie die Versorgung von Kunden in der Stadt Pforzheim mit Fernwärme und Trinkwasser (SWP, 2013a). Zusätzlich bieten die SWP laut ihrem Geschäftsbericht Dienstleistungen im Bereich der kaufmännischen und technischen Betriebsführung bei Beteiligungsgesellschaften und städtischen Eigenbetrieben sowie Beratungsleistungen an Dritte bei betriebswirtschaftlichen und technischen Aufgabenstellungen. Gesellschafter des Unternehmens sind die Stadt Pforzheim mit einem Gesellschaftsanteil von 65 % und die Thüga AG mit einer Beteiligung von 35 % (SWP, 2013a).

Organisation Gemäß der gesetzlichen Regelungen zur strukturellen Entflechtung von Energieversorgungsunternehmen ist das Unternehmen laut SWP (2013a) unterhalb der Geschäftsführung in vier Hauptabteilungen gegliedert: Kaufmännische Hauptabteilung (KH), Services (HS), Markt (HM) und Netzbau/Netzbetrieb (NBB). Im Jahr 2012 waren laut Geschäftsbericht insgesamt 410 Mitarbeiter bei den SWP beschäftigt, davon 53 im Bereich der Wasserversorgung (SWP, 2013a).

Kennzahlen der Wasserversorgung Abbildung 6.2 zeigt die Entwicklung der Wasserabgabe in Pforzheim: Aufgrund des nachlassenden pro-Kopf-Wasserverbrauchs sank die Wasserabgabe an Endverbraucher zwischen 1999 und 2012 von 6,7 Mio. m^3 auf 6,2 Mio. m^3 . Der Anteil des Wassers aus Eigengewinnung sank im gleichen Zeitraum von 49,3 % auf 27,8 %.

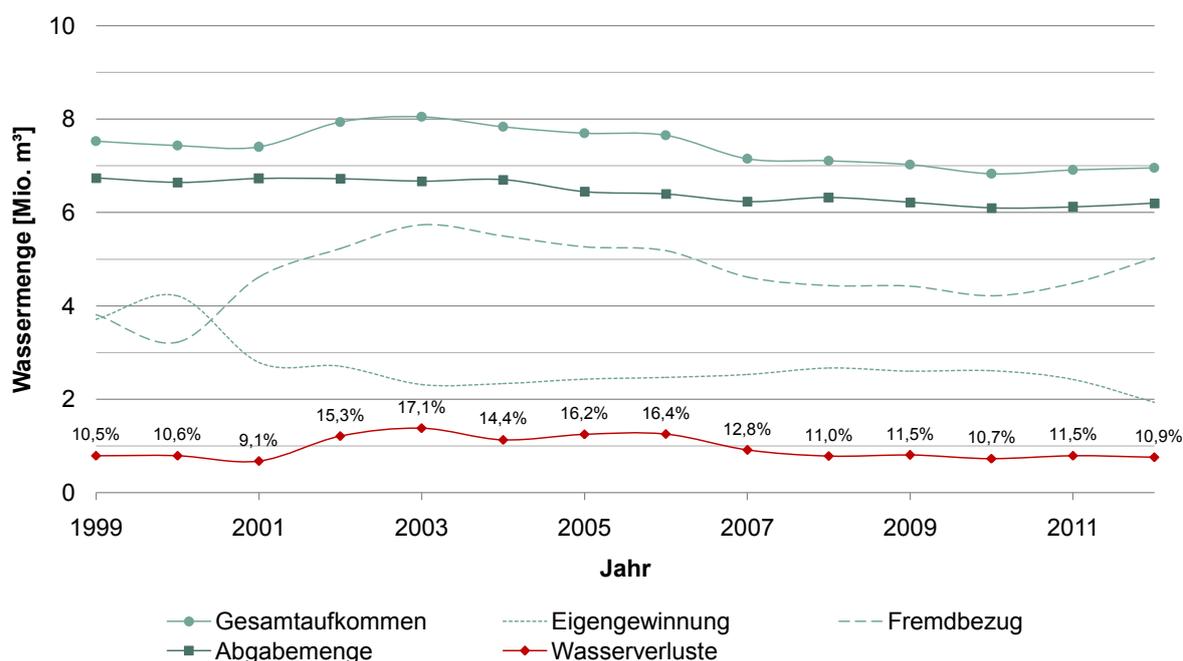


Abbildung 6.2: Entwicklung der Wasserabgabe in Pforzheim²

Die spezifische Rohrnetzeinspeisung sank von 16.991 $m^3/km/a$ im Jahr 1999 auf 15.159 $m^3/km/a$ im Jahr 2012. Somit hat das Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim gemäß der Definition aus DVGW (2003a) eine großstädtische Versorgungsstruktur (s. Abschnitt 2.4.2.1). Laut der Geschäftsberichte der SWP aus den Jahren 1999 bis 2012 wurden jährlich zwischen 1,63 und 5,84 Millionen Euro in die Erneuerung und den Ausbau der Leitungsnetze und der sonstigen Sachanlagen investiert. Die mittlere Investitionsrate von 6.800 Euro pro Kilometer Versorgungsleitung ist somit mehr als doppelt so hoch wie der bundesweite Durchschnitt nach Lauruschkus u. a. (2006) (s. Abschnitt 2.2.2.6).

6.3.2 Wasserversorgungssystem

6.3.2.1 Gewinnung

Wie aus Abbildung 6.2 ersichtlich ist, stammt nur ein Teil des Pforzheimer Trinkwassers aus Eigengewinnung, während ein steigender Anteil vom Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV) bezogen wird. Einen Teil ihres Wassers gewinnen die SWP aus vier Quellen (Glas-, Kohl-, Dettings- und Jakobsquelle) im Grösseltal (SWP, 2001). Weiterhin verfügen die SWP über vier Brunnenreihen mit insgesamt 15 Tiefbrunnen in der Enzaue im Osten der Stadt. Zwei weitere Brunnen befinden sich im Nagoldtal zwischen den Ortschaften Huchenfeld und Büchenbronn. Als Mitte der 1950er Jahre festgestellt wurde, dass die Schüttung der Brunnen nachließ und die Wasserentnahmen die Grundwasserneubildung

²Quelle: Geschäftsberichte der SWP 2000 bis 2012, s. <http://www.stadtwerke-pforzheim.de/de/90.php>

überstiegen, wurde mit der Planung zur Anbindung an eine Fernwasserversorgung begonnen. 1964 wurde das Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim an das Netz der BWV angeschlossen (SWP, 2001). Abbildung 6.3 zeigt, wie sich die Zusammensetzung von Eigengewinnung und Fremdbezug seit 1999 entwickelt hat.

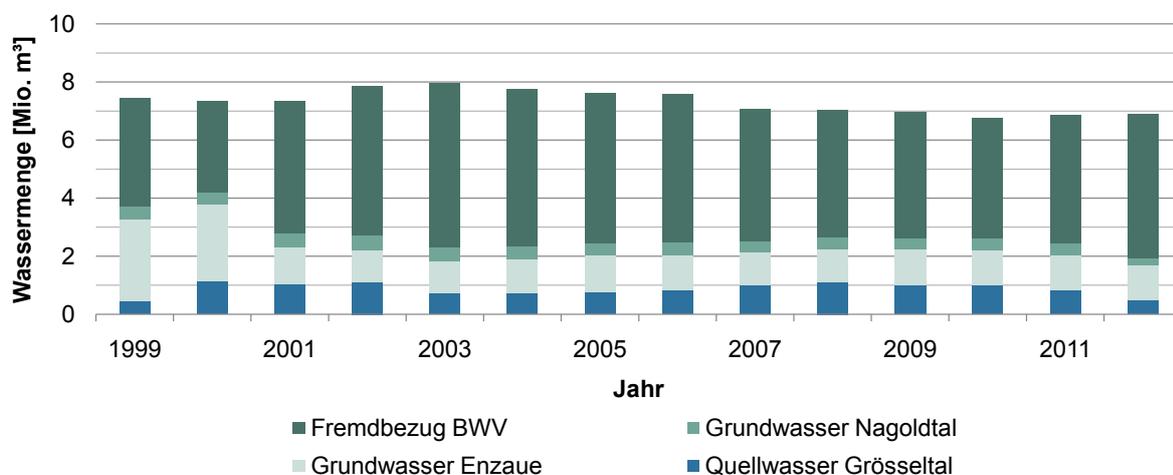


Abbildung 6.3: Entwicklung von Eigengewinnung und Fremdbezug in Pforzheim³

Die reduzierte Gewinnung aus den Quellen im Grösseltal im Jahr 2012 ist auf Qualitätsprobleme des Rohwassers aufgrund starker Niederschläge zurückzuführen. Ebenfalls in 2012 wurde die Förderung der Brunnen im Nagoldtal zurückgefahren, da die Wasserwerke Büchenbronn und Huchenfeld im Nagoldtal zusammengelegt und modernisiert werden (SWP, 2012b).

Der Energieverbrauch für die Grundwasserhebung betrug in den Jahren 2009 bis 2012 durchschnittlich ca. 354 MWh (SWP, 2013b). Der spezifische Energieverbrauch ergibt sich somit im Mittel zu $0,22 \text{ kWh/m}^3$. Der spezifische Energieverbrauch des Fremdbezugs an Bodenseewasser liegt bei ca. $1,2 \text{ kWh/m}^3$ (Lehmann u. a., 2010).

6.3.2.2 Aufbereitung

Die SWP verfügen über drei Aufbereitungsanlagen, in denen das gewonnene Quell- und Grundwasser aufbereitet sowie teilweise mit Bodenseewasser gemischt wird. Es werden vier verschiedene Wässer in das Verteilungsnetz eingespeist. Abbildung 6.4 zeigt die Verteilung des Wassers unterschiedlicher Herkunft in Pforzheim. Tabelle 6.1 zeigt für die unterschiedlichen Wässer eine Auswahl der Wassergüteparameter, die einen Einfluss auf die Entstehung von Leitungsschäden haben können (s. Abschnitt 3.3.3.7).

Wasserwerk Friedrichsberg Das gewonnene Grundwasser aus der Enzaue wird im Wasserwerk Friedrichsberg aufbereitet, das das Stadtzentrum Pforzheims mit Wasser versorgt. In SWP (2001) ist die Aufbereitungsanlage des Wasserwerks Friedrichsberg wie folgt beschrieben: Zuerst wird das Grundwasser aus den Tiefbrunnen zur Teiloxidation von organischen Inhaltsstoffen und zur Abtötung von Keimen ozoniert. Anschließend werden Flockungsmittel zugegeben und Eisen und Mangan in Mehrschichtfiltern entfernt. Danach werden organische Chlorverbindungen über Aktivkohlefilter entfernt und das Wasser zur Anhebung des

³Quelle: Geschäftsberichte der SWP 2000 bis 2012, s. <http://www.stadtwerke-pforzheim.de/de/90.php>

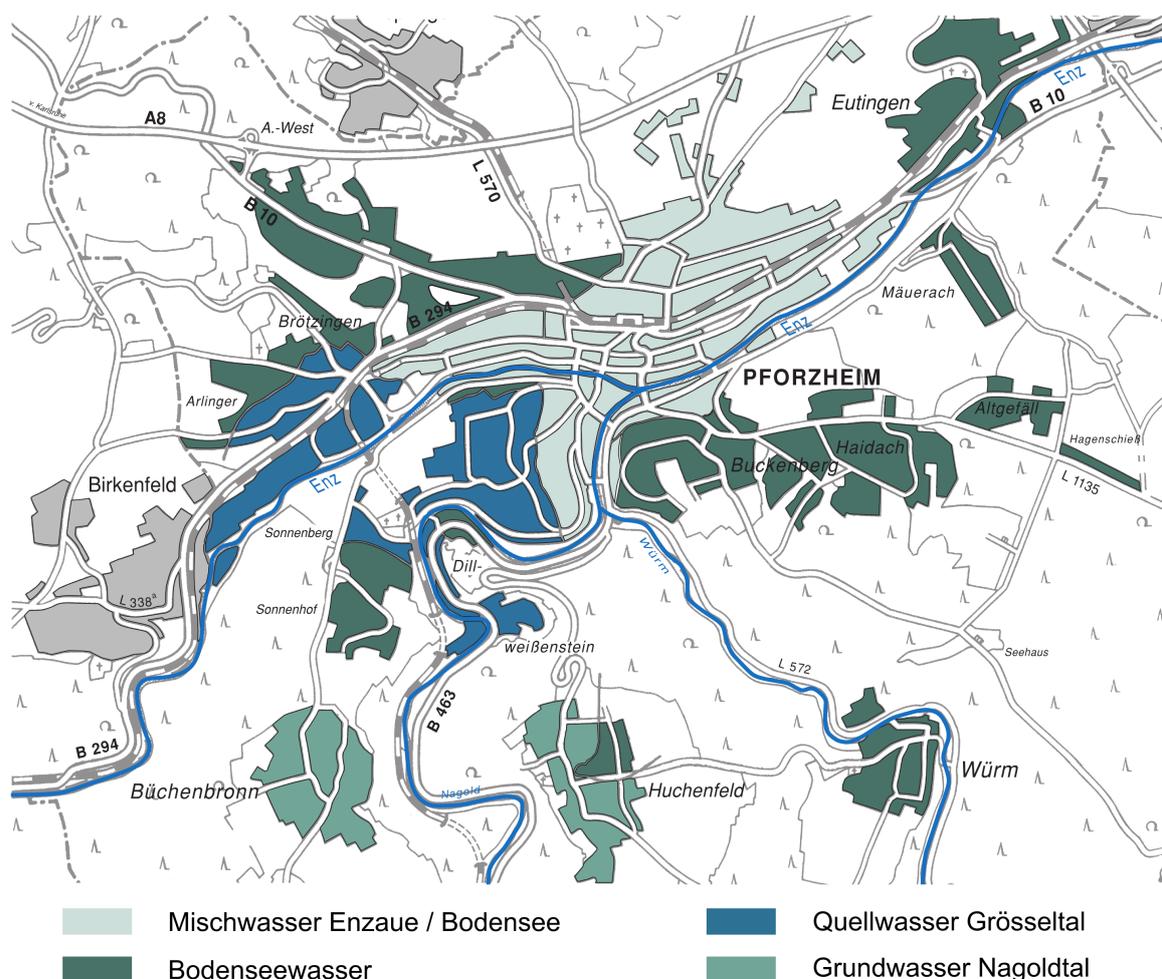


Abbildung 6.4: Verteilung von Wasser unterschiedlicher Herkunft im Versorgungsgebiet der Stadt Pforzheim⁴

pH-Wertes in einem Flachbettbelüfter entsäuert. Abschließend wird das Wasser zum Schutz vor Wiederverkeimung mit Chlorgas oder Chlordioxid desinfiziert. Um das stark kalkhaltige Grundwasser zu enthärten, wird es am Ende des Aufbereitungsprozesses in einem Verhältnis von 60 % Bodenseewasser zu 40 % Enzauewasser gemischt (SWP, 2001).

Wasserwerk Sonnenberg Im Wasserwerk Sonnenberg mit einer Kapazität von 240 m³/h wird dem Quellwasser aus dem Grösseltal ein Flockungsmittel zudosiert. Anschließend werden die gebildeten Partikel über Mehrschichtfilter entfernt. Nach der Filtration wird das Wasser durch Zugabe von Natriumhypochlorit desinfiziert. Dem aufbereiteten Grundwasser wird im Hochbehälter Sonnenberg Bodenseewasser zugemischt.

Wasserwerk Büchenbronn Zur Zeit werden die im Süden Pforzheims gelegenen Ortsteile Huchenfeld und Büchenbronn mit Wasser aus zwei Tiefbrunnen über zwei separate Pumpwerke mit Wasser versorgt. Die Aufbereitung besteht aus Entsäuerung und Desinfektion. Aktuell

⁴Quelle: SWP (2013c)

werden die Anlagen zusammengelegt und erneuert. Das zukünftige Wasserwerk Büchenbronn erhält laut SWP (2013c) eine gemeinsame Entsäuerungsanlage für beide Stadtteile mit einer Kapazität von ca. $58 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabelle 6.1: Wassergüteparameter der unterschiedlichen Wässer

| Parameter | Einheit | Grenzwert (TrinkwV) | Enzaue / BWV | Bodenseewasser | Grösseltal / BWV | Nagoldtal Büchenbronn | Nagoldtal Huchenfeld |
|----------------|----------------------------|---------------------|--------------|----------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| pH-Wert | [–] | $> 6,5 < 9,5$ | 7,62 | 8,14 | 7,80 | 8,76 | 8,05 |
| Gesamthärte | [mmol/l] | - | 2,35 | 1,60 | 0,40 | 0,86 | 1,40 |
| Säurekapazität | [mmol/l] | - | 3,55 | 2,51 | 0,54 | 1,43 | 2,45 |
| Calcium | [mg/l] | - | 67,1 | 49,3 | 13,4 | 16,3 | 50,2 |
| Nitrat | [mg/l] | 50 | 11,9 | 4,6 | 6,7 | 10,9 | 4,5 |
| Sulfat | [mg/l] | 250 | 32,0 | 33,5 | 9,6 | 8,1 | 34,7 |
| Chlorid | [mg/l] | 250 | 24,2 | 7,6 | 11,2 | 17,1 | 7,9 |

Quelle: SWP (2013c)

Aus Tabelle 6.1 ist ersichtlich, dass der pH-Wert aller Wässer im Versorgungsgebiet die Bildung schützender Deckschichten begünstigt. Allerdings sind die Wässer in Pforzheim weich bis mittelhart, was korrosionsfördernd wirken kann. Auffällig ist das Grösseltal-BWV-Mischwasser, das sehr weich ist und zudem über eine geringe Säurekapazität und einen niedrigen Calciumgehalt aufweist. Nitrat-, Sulfat- und Chloridgehalte sind bei allen Wässern weit unter den zulässigen Grenzwerten und hinsichtlich Korrosion unbedenklich.

Der Energieverbrauch für die Wasseraufbereitung betrug in den Jahren 2009 bis 2012 durchschnittlich ca. 228 MWh (SWP, 2013b). Der spezifische Energieverbrauch ergibt sich somit im Mittel zu $0,09 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

6.3.2.3 Förderung

Wie bereits in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, besitzt das Stadtgebiet von Pforzheim eine ausgeprägte Topographie mit über 250 m Höhenunterschied zwischen dem höchsten und dem tiefsten Hausanschluss. Um die Versorgungsdrücke innerhalb der empfohlenen Richtwerte zu halten, wurde das Wasserversorgungsnetz daher in 30 Versorgungszonen unterteilt, die in bis zu vier Ebenen gestaffelt sind: Tiefzone (TZ), sowie 1., 2. und 3. Hochzone (HZ). Um die Höhenunterschiede zu überwinden, muss das Wasser stellenweise gepumpt werden, wofür insgesamt 18 Pumpwerke bereitstehen (SWP, 2013a). Das zentrale Pumpwerk befindet sich im Wasserwerk Friedrichsberg, das am Ufer der Enz auf 256 müNN gelegen ist. Von hier wird Enzaue-Bodensee-Mischwasser in die drei Hochbehälter Stückelhalden (318 müNN), Wolfsberg (335 müNN) und Rod (318 müNN) gefördert, die die innerstädtischen Tiefzonen Mitte und Ost sowie die 1. Hochzone Nord versorgen. Das Pumpwerk Stückelhalden fördert

das Wasser weiter in die Hochbehälter Wartberg Erde (374 *müNN*) und Wartberg Turm (394 *müNN*), an die die 2. und 3. Hochzone Nord angeschlossen sind. Im Nagoldtal befinden sich die Pumpwerke Büchenbronn (290 *müNN*) und Huchenfeld (299 *müNN*), die aufbereitetes Grundwasser in die auf über 400 *müNN* gelegenen zugehörigen Ortsteile fördern. Zur Versorgung der Hochzone Büchenbronn wird das vom Pumpwerk Büchenbronn kommende Wasser von HB Kreuzstein (485 *müNN*) aus zum HB Eichberg (521 *müNN*) weitergefördert.

Die übrigen Pumpwerke dienen der Notversorgung und werden vom Leitsystem nur dann automatisch zugeschaltet, wenn der Füllstand eines Hochbehälters einen festgelegten Grenzwert unterschreitet. Die Übergabe von Wasser der BWV erfolgt an den hoch gelegenen Behältern Seehaus (445 *müNN*), Reutwald (461 *müNN*), Berg (406 *müNN*) und Kieselbronn Turm (384 *müNN*), von wo es gravitär in tiefer liegende Behälter und Versorgungszonen weitergeleitet wird.

Der Energieverbrauch für die Wasserförderung betrug in den Jahren 2009 bis 2012 durchschnittlich ca. 1.463 *MWh* (SWP, 2013b).

6.3.2.4 Speicherung

Im Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim gibt es 29 Speicherbehälter mit einer Gesamtkapazität von ca. 33.000 m^3 (SWP, 2013a). Jeder Versorgungszone ist mindestens ein Behälter zugeordnet. Die Behälter lassen sich nach ihrer Funktion folgendermaßen gruppieren:

- Reinwasserbehälter: 2 Stück, Kapazität 6.990 m^3
- Durchlaufbehälter: 19 Stück, Kapazität 23.370 m^3
- Gegenbehälter: 4 Stück, Kapazität 3.130 m^3
- Druckunterbrecher: 2 Stück, Kapazität 50 m^3
- Vorlagebehälter: 2 Stück, Kapazität 30 m^3

Der Energieverbrauch für die Stromversorgung der Wasserbehälter betrug in den Jahren 2009 bis 2012 durchschnittlich ca. 180 *MWh* (SWP, 2013b).

6.3.2.5 Verteilung

Haupt- und Versorgungsleitungen Das moderne Wasserversorgungsnetz der Stadt Pforzheim geht auf das Jahr 1875 zurück, in dem das Quellwasserwerk Grösseltal und 29 *km* gusseiserner Rohrleitungen in Betrieb genommen wurden (SWP, 2001). Bis zum Jahr 2012 ist das Rohrnetz laut Betriebsbericht der SWP auf eine Länge von 458 *km* Haupt- und Versorgungsleitungen und 212 *km* Anschlussleitungen angewachsen (SWP, 2012a). Die aktuelle Werkstoffzusammensetzung und Altersstruktur des Rohrnetzes aus Haupt- und Versorgungsleitungen ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Wie Abbildung 6.5 zeigt, dominieren laut SWP (2012a) vier Werkstoffgruppen:

- Graugussleitungen (GG) wurden in Pforzheim bis zum Jahr 1964 verlegt und machen zur Zeit ca. 16 % der Haupt- und Versorgungsleitungen aus. Die Analyse der Schadensdaten zeigt, dass ein großer Anteil aller Schäden an GG-Leitungen entsteht, verursacht insbesondere durch Bodenbewegungen.
- Ab 1965 wurde der Grauguss durch Duktigussleitungen (GGG) der 1. Generation abgelöst, die bis 1980 in Pforzheim verlegt wurden. Der Anteil dieser Leitungen am Rohrnetz betrug 2012 etwa 29 %. GGG-Leitungen der 1. Generation sind aufgrund des mangelnden Korrosionsschutzes Hauptverursacher von Leitungsschäden in Pforzheim.

- Nach 1980 wurde Duktilguss der 2. Generation verbaut. Dieser Werkstoff wird bis heute für Leitungen mit DN100 und größer verwendet, sein Anteil am Leitungsnetz betrug im Jahr 2012 ca. 26 %.
- Seit Ende der 1960er Jahre werden Leitungen aus PE verbaut. Seit Mitte der 1990er Jahre ist PE der Werkstoff mit der höchsten Zuwachsrate. Der Anteil an PE-Leitungen stieg von 8 % im Jahr 2001 auf 23 % im Jahr 2012.

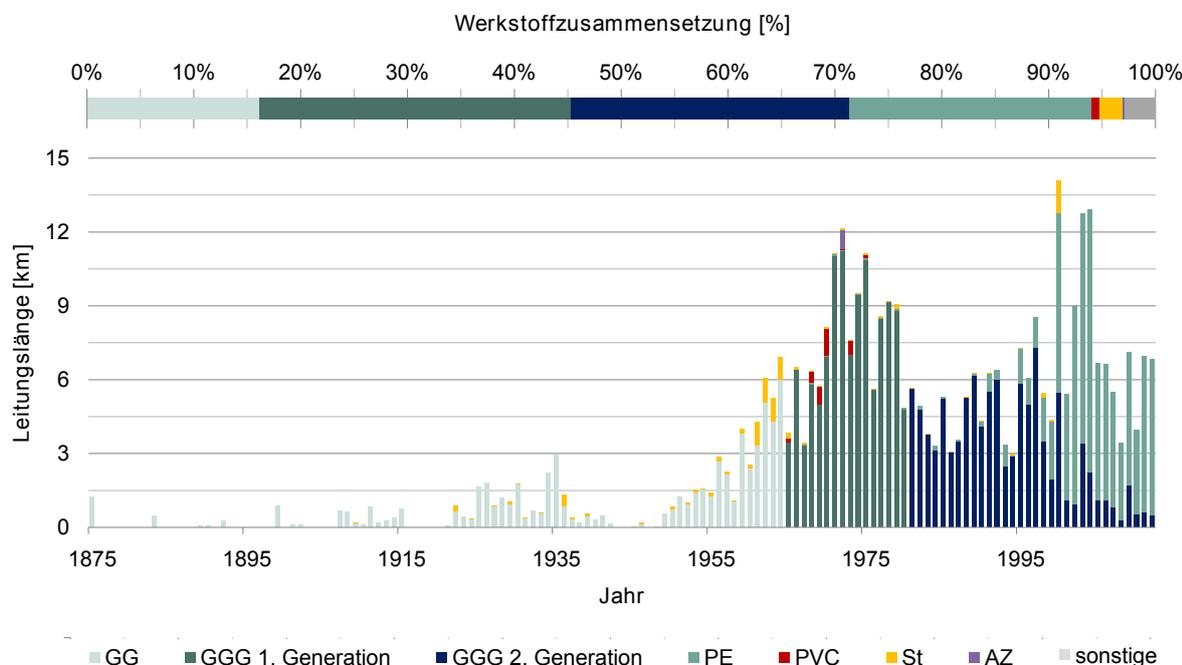


Abbildung 6.5: Altersstruktur (unten) und Werkstoffzusammensetzung (oben) der HW und VW der SWP im Jahr 2012⁵

Die übrigen Haupt- und Versorgungsleitungen bestehen aus Stahl (St, 2,1 %), Asbestzement (AZ, 0,2 %) und PVC (0,8 %). Von ca. 2,9 % der Leitungen ist der Werkstoff unbekannt. Seit dem Jahr 2000 werden fast ausschließlich Leitungen aus PE (für Durchmesser bis DN 200) und GGG (ab DN 100) verbaut (SWP, 2012a). Die Auswertung des aktuellen Betriebsberichts der SWP zeigt, dass der Bestand an Leitungen aus Grauguss und Duktilguss der 1. Generation seit 2005 jährlich um durchschnittlich vier Kilometer reduziert wird. Die Erneuerungsrate bei den Haupt- und Versorgungsleitungen beträgt somit ca. 1 %. Zusätzlich zu den erneuerten Leitungen werden jedes Jahr im Mittel zwei Kilometer neuer Leitungen gebaut (SWP, 2012a).

Anschlussleitungen Die Gesamtlänge aller Anschlussleitungen betrug im Jahr 2012 ca. 212 km (SWP, 2012a). Die aktuelle Werkstoffzusammensetzung und Altersstruktur der Anschlussleitungen ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Anschlussleitungen hauptsächlich aus Stahl (21 %) und PE (66 %) bestehen. Die übrigen Leitungen bestehen aus Grauguss (2,0 %) sowie Duktilguss der 1. und 2. Generation (1,6 %

⁵Quelle: SWP (2012a)

bzw. 1,2 %). Für ca. 8,5 % der Leitungen sind Material und Alter unbekannt. Seit Beginn der 1990er Jahre werden ausschließlich Anschlussleitungen aus PE verlegt, um die korrosionsanfälligen Stahlleitungen zu ersetzen (SWP, 2012a). Laut Betriebsbericht liegt die jährliche Erneuerungsrate seit 2005 bei ca. zwei Kilometern pro Jahr bzw. 1,0 % (SWP, 2012a). Die Erneuerungsrate für Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen liegt somit nur knapp über dem bundesweiten Durchschnitt von 0,9 % und verfehlt damit die von Kröfges (2009) geforderte Marke von 2,0 % (s. Abschnitt 2.2.2.6).

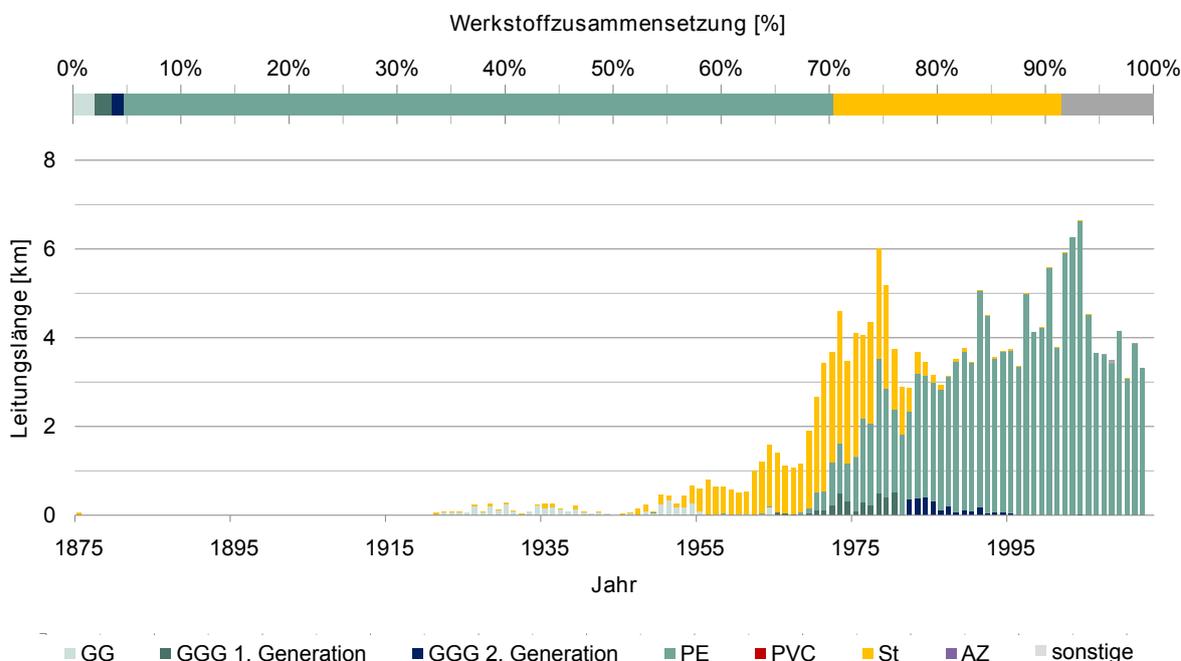


Abbildung 6.6: Alterstruktur (unten) und Werkstoffzusammensetzung (oben) der AW der SWP im Jahr 2012⁶

6.3.2.6 Kunden und Wasserabgabe

Laut Geschäftsbericht des Jahres 2012 sind im Wasserversorgungssystem der SWP insgesamt 17.456 Hausanschlüsse und 19.725 Kundenwasserzähler installiert (SWP, 2013a). Die mittlere Hausanschlussdichte des Gesamtsystems beträgt somit 38 AL/km . Die spezifische Wasserabgabe inklusive Industriebedarf liegt bei circa 140 Liter pro Einwohner und Tag und somit leicht unter dem bundesweiten Durchschnitt (vgl. Tabelle 2.3). Die höchste Wasserabgabe lag 2012 laut SWP (2013a) bei 24.933 m^3/d , während die mittlere Wasserabgabe ca. 16.700 m^3/d (6,1 Mio. m^3/a) beträgt.

6.3.2.7 Betrieb und Überwachung

In Abschnitt 6.3.2.3 wurde die Unterteilung des Wasserversorgungsnetzes in 30 Druck- und Versorgungszonen beschrieben. Insgesamt sind 94 Betriebswasserzähler (BWZ) zur Überwachung des Versorgungsnetzes installiert. Diese befinden sich an den Einspeisepunkten aus den Wasserwerken und den vier Übergabestellen der BWV (jeweils zwei hintereinandergeschaltete

⁶Quelle: SWP (2012a)

BWZ). Weiterhin sind BWZ an fast allen Einspeisepunkten der einzelnen Versorgungszonen installiert, meist an den Entnahmeleitungen der Hochbehälter. Von den genannten 94 BWZ senden 75 Mess- und Zählwerte an die zentrale Leitstelle der SWP. Insgesamt 56 BWZ werden vom Betriebspersonal monatlich ausgelesen. Die Zählerstände werden in einer Excel-Tabelle gesammelt. Acht der installierten BWZ werden zur Zeit weder automatisch noch manuell abgelesen.

Druckmessgeräte sind in der Regel nur in Wasserwerken und Pumpstationen installiert. In den Versorgungszonen wird der Druck nicht gemessen. Aussagen über den Versorgungsdruck, die für die Berechnung von Kennzahlen benötigt werden, können daher nur aus Simulationsergebnissen des hydraulischen Modells gewonnen werden. Zur Zeit liegen noch keine Ergebnisse zu den Versorgungsdrücken in den einzelnen Zonen vor.

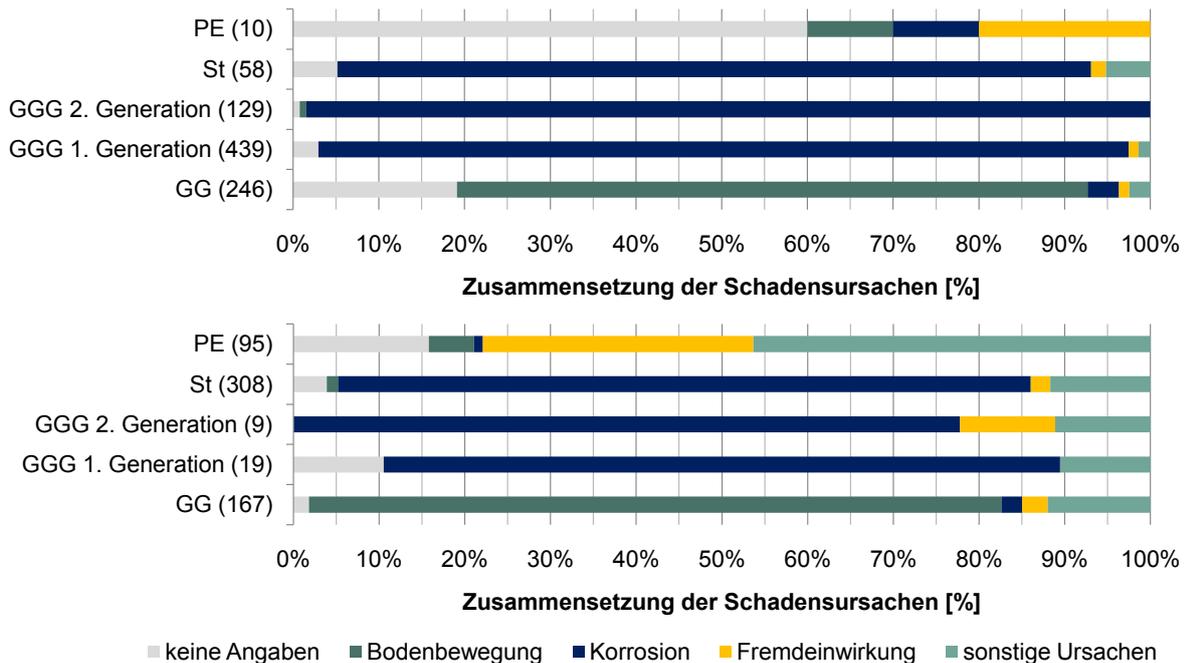


Abbildung 6.7: Schadensursachen an HW und VW (oben) sowie AW (unten) der SWP in den Jahren 2002 bis 2012. Anzahl der Schäden pro Werkstoff in Klammern (⁷)

6.3.3 Schadenssituation

6.3.3.1 Schadensdokumentation

Eine detaillierte Dokumentation der Schäden und Schadensursachen liegt bei den SWP für die Jahre 1994 bis 2012 vor. Schäden weiter zurückliegender Jahre sind nur teilweise bekannt, außerdem sind keine Schadensprotokolle vorhanden, die Auskunft über die Schadensursache geben könnten. Der historische Leitungsbestand der unterschiedlichen Werkstoffe ist allerdings erst ab dem Jahr 2002 bekannt, in dem der Aufbau des GIS begann. Mithilfe des GIS konnten Informationen der Schadensprotokolle aus den Jahren 2002 bis 2012 mit den Daten der betroffenen Rohrleitungen überlagert werden, um Informationen über Leitungsdurchmesser, Material und Baujahr zu erhalten. Es wurden insgesamt 882 Schäden an Haupt- und

⁷Quelle: SWP (2012a).

Versorgungsleitungen sowie 598 Schäden an Anschlussleitungen ausgewertet.

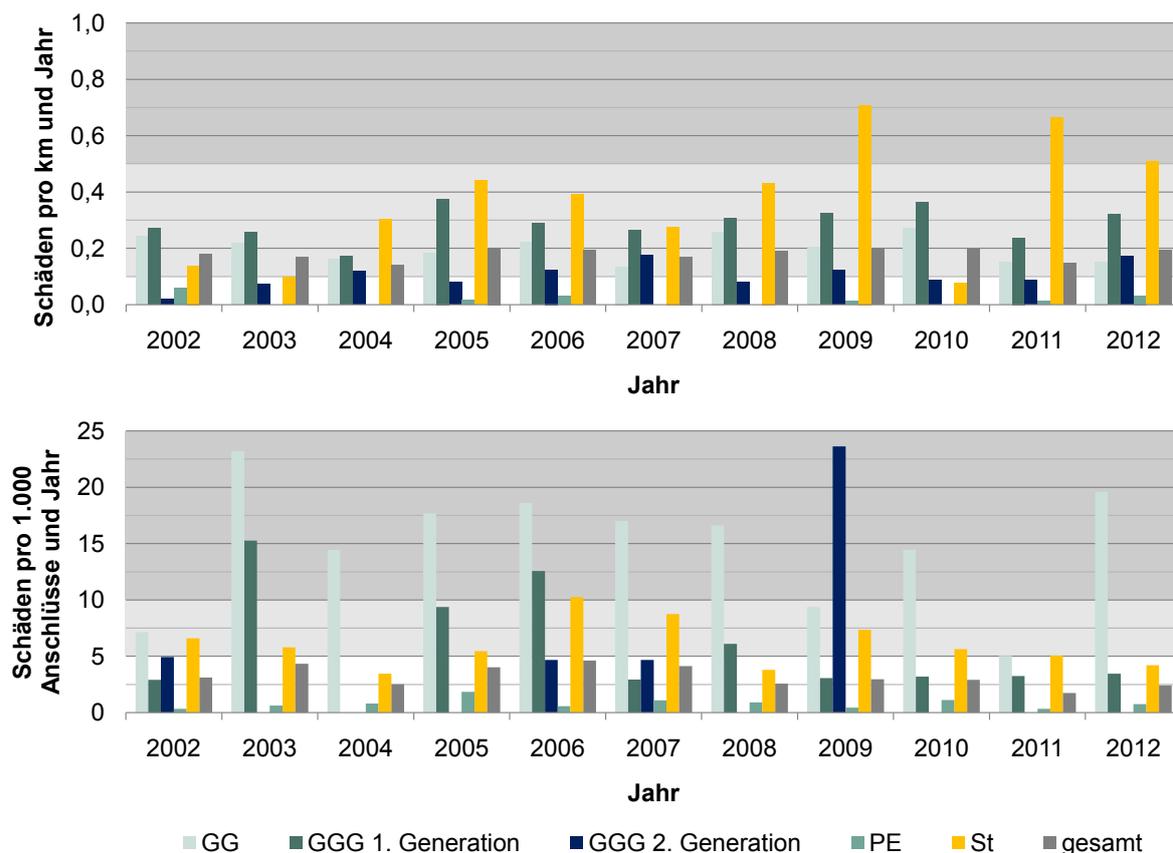


Abbildung 6.8: Schadensraten an HW und VW (oben) sowie AW (unten) der SWP in den Jahren 2002 bis 2012⁸

Die Analyse dieser Schadensdaten ergab einen deutlichen Zusammenhang zwischen Werkstoff und Schadensursache, wie Abbildung 6.7 zeigt. Bei Leitungen aus Stahl und Duktulguss der ersten und zweiten Generation ist in 80 bis 90 % der Fälle Korrosion für den Schaden verantwortlich. Bei Grauguss handelt es sich dagegen in 70 bis 80 % der Schäden um Brüche oder Risse, die durch Bodenbewegungen verursacht werden. Beim Werkstoff PE sind aufgrund der geringen Fallzahlen nur die Schäden an Anschlussleitungen auswertbar. Rund ein Drittel der Schäden werden durch Fremdeinwirkung verursacht, ca. 46 % der Schäden haben sonstige Ursachen (undichte Verbindungen, Bettungsfehler, Mängel an Leitungsteilen etc.).

Die Untersuchung der Schadensraten ergab, dass bei den Haupt- und Versorgungsleitungen insbesondere die Werkstoffe Duktulguss der 1. Generation und Stahl von hohen Schadensraten betroffen sind (s. Abbildung 6.8). Duktulguss der 1. Generation ist alleine für fast die Hälfte aller Schäden verantwortlich. Auch die Schadensrate an Graugussleitungen liegt häufig über der durchschnittlichen Gesamtschadensrate. Leitungen aus PE und Duktulguss der 2. Generation dagegen haben meist niedrige Schadensraten. Die durchschnittliche Schadensrate bleibt über den gesamten betrachteten Zeitraum nahezu gleich.

Bei den Anschlussleitungen fällt auf, dass insbesondere Graugussleitungen hohe Schadensraten haben, wie Abbildung 6.8 verdeutlicht. Alle anderen Werkstoffe haben meist niedrige

⁸Quelle: SWP (2012a)

bis mittlere Schadensraten. Betrachtet man die durchschnittliche Gesamtschadensrate an Anschlussleitungen, zeigt sich ein Rückgang der Schäden im Zeitraum von 2002 und 2012.

6.3.3.2 Analyse der Schadensursachen

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Stipendiums wurden von Spirovska (2014) Schadensprotokolle der Stadtwerke Pforzheim ausgewertet und mit den im GIS verfügbaren Daten zu Einflussfaktoren (s. Abschnitt 6.2) verknüpft. Ziel der Untersuchung war, ob und wie stark die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Schadensarten durch Umweltfaktoren wie beispielsweise Verkehrsbelastung oder Bodeneigenschaften beeinflusst wird. Dazu wurden Schäden der Jahre 1994 bis 2012 mit den Schadensursachen Korrosion und Bodenbewegung an den vier wichtigsten Werkstoffgruppen Grauguss, Duktilguss, PE und Stahl des Pforzheimer Wasserversorgungssystems untersucht (s. Abschnitt 6.3.2.5).

Tabelle 6.2: Einflussgrößen der Schadensursache Korrosion

| Einflussgröße | Ausprägung | Bewertungsvariable v_i | | |
|-------------------------------------|--|--------------------------|------|------|
| | | GG | GGG | St |
| v_1 Bodenaggressivität, | praktisch nicht aggressiv | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | schwach aggressiv | | | |
| | aggressiv | 1,09 | 1,09 | 1,03 |
| | stark aggressiv | | | |
| v_2 Streustrom- belastung, | keine (MS/HS in > 10 m) | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | gering (MS/HS in 5 bis 10 m) | | | |
| | mittel (MS/HS in 1 bis 5 m) | 1,01 | 1,00 | 1,00 |
| | hoch (MS/HS in < 1 m) | | | |
| v_3 Lage zum Grund- wasser, | immer über GW-Spiegel in GW-Wechselzone | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | immer unter GW-Spiegel | 1,51 | 1,00 | 1,00 |

Quelle: Spirovska (2014)

Für die Untersuchung verwendete Spirovska (2014) die Software *Casses* des französischen Umweltforschungsinstituts CEMAGREF. *Casses* ist ein Werkzeug zur Vorhersage von Schäden an Rohrleitungen. *Casses* verwendet dazu ein auf Zählprozessen basierendes statistisches Modell (das LEYP-Modell - Linear Extended Yule Process, s. Renaud u. a. (2011)), das sowohl das Alter und die Charakteristika der Leitungen als auch Umwelteigenschaften und die Anzahl vorausgegangener Schäden berücksichtigt. In den Tabellen 6.2 und 6.3 sind die Ergebnisse der Untersuchungen von Spirovska (2014) zusammengefasst.

Wie aus den Tabellen ersichtlich, wurden jeweils mehrere Ausprägungen einer Einflussgröße zu einer Referenzgruppe kombiniert ($v_i = 1,00$). Mithilfe von *Casses* wurde ermittelt, um wie viel höher die Schadenswahrscheinlichkeit der übrigen kombinierten Ausprägungen gegenüber dieser Referenzgruppe ist (vgl. Abschnitt 5.7.5). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Schadensanfälligkeit spröder GG-Leitungen in stark bindigen Böden zunimmt und dass insbesondere bei PE- und Stahlleitungen eine hohe Verkehrsbelastung zu einer Zunahme der Schadenswahrscheinlichkeit führt. Die Ergebnisse zum Einfluss des Grundwassers sind nur eingeschränkt aussagekräftig, da sich nur knapp 3,5 % der gesamten Leitungslänge unter dem Grundwasserspiegel oder in der Zone wechselnder Grundwasserstände befindet. Ein signifi-

Tabelle 6.3: Einflussgrößen der Schadensursache Bodenbewegung

| Einflussgröße | Ausprägung | Bewertungsvariable v_i | | | |
|-----------------------------|---|--------------------------|------|------|------|
| | | GG | GGG | PE | St |
| Lage zum Grundwasser, v_3 | immer über GW-Spiegel in GW-Wechselzone | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | immer unter GW-Spiegel | 1,51 | 1,00 | 1,49 | 1,00 |
| Bodenkonsistenz, v_4 | sehr gering bindig | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | gering bindig | | | | |
| | mittel bindig | | | | |
| | stark bindig | 1,24 | 1,04 | 1,12 | 1,00 |
| sehr stark bindig | | | | | |
| Verkehrsbelastung, v_5 | keine | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | nur PKW-Verkehr | | | | |
| | gering (< 100 LKW/d) | 1,07 | 1,00 | 1,45 | 1,28 |
| | mittel (101 bis 500 LKW/d) | | | | |
| hoch (501 bis 1000 LKW/d) | 1,07 | 1,00 | 1,45 | 1,28 | |
| sehr hoch (> 1000 LKW/d) | | | | | |

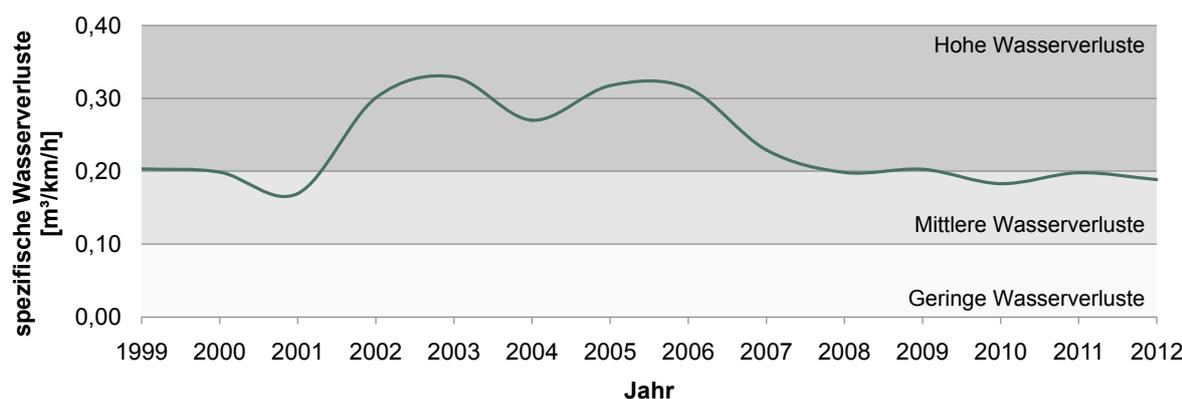
Quelle: Spirovská (2014)

kanter Einfluss der Bodenaggressivität und der Streustrombelastung auf die Entstehung von Korrosionsschäden lässt sich anhand der Untersuchungsergebnisse nicht erkennen. Weitere Einflussgrößen wurden in der Untersuchung nicht berücksichtigt, da sie zu diesem Zeitpunkt nicht zur Verfügung standen (Anzahl der Vorschäden, Druckverhältnisse, Fließgeschwindigkeiten) oder im GIS der SWP nicht flächendeckend vorliegen (Rohrbettung). Für zukünftige Untersuchungen sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Es sollten separate Leitungsgruppen für Duktulguss der 1. und der 2. Generation gebildet werden.
- Der Einfluss des Rohrdurchmessers und der Leitungsart (HW, VW, AW) sollten berücksichtigt werden.
- Die Einflussgrößen wurden bisher im GIS den Rohrleitungen zugewiesen und anschließend auf die Schäden an einer Leitung übertragen. Da eine Leitung unterschiedlichen Ausprägungen einer Einflussgröße ausgesetzt sein kann, sollte diese besser direkt den Schäden zugewiesen werden.

6.3.4 Wasserverlustsituation

Die Auswertung der Geschäftsberichte der SWP aus den Jahren 2000 bis 2012 ergab, dass die Wasserverluste in diesem Zeitraum zwischen 9,1 und 17,1 % der Rohrnetzeinspeisung schwankten, wie Abbildung 6.2 zeigt. In den Jahren 2006 und 2007 wurden große Investitionen für Sanierungsmaßnahmen im Leitungsnetz aufgewendet. Die Wasserverluste konnten in der Folge spürbar gesenkt werden. Seit 2008 stagnieren die Wasserverluste jedoch im Bereich zwischen 10,7 und 11,5 % der Rohrnetzeinspeisung (vgl. Abbildung 6.2). Abbildung 6.9 zeigt, dass die spezifischen Wasserverluste in den zurückliegenden fünf Jahren an der Grenze vom mittleren zum hohen Bereich stagnieren.

Abbildung 6.9: Entwicklung der spezifischen Wasserverluste im Versorgungsgebiet der SWP⁹

Basierend auf den in COSVega verfügbaren Informationen wurden Wasserbilanzen des Gesamtsystems für die Jahre 2011 und 2012 erstellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Es gibt Abweichungen zu den in den Geschäftsberichten genannten Zahlen, die auf unterschiedliche Berücksichtigung der Weiterverteiler zurückzuführen sind. Q_{VS} wurde gemäß der bei den SWP üblichen Praxis zu 1,5 % von Q_A angesetzt.

Tabelle 6.4: Wasserbilanz des Versorgungsgebiets Pforzheim, 2011 und 2012

| Komponente | Jahr 2011 | | Jahr 2012 | |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| | [m ³] | [%] | [m ³] | [%] |
| Systemeinspeisung Q_S | 7.148.160 | | 7.302.829 | |
| - BWV | 4.638.574 | | 5.254.200 | |
| - Eigengewinnung | 2.509.586 | | 2.048.629 | |
| Abgabe an Weiterverteiler | 220.495 | | 224.225 | |
| Rohrnetzeinspeisung Q_N | 6.927.665 | 100,0 | 7.078.604 | 100,0 |
| Rohrnetzabgabe Q_A | 6.241.402 | 90,1 | 6.376.267 | 90,1 |
| - abgerechneter Verbrauch | 6.182.177 | 89,2 | 6.315.356 | 89,3 |
| - Eigenbedarf Wasserwerke | 49.000 | 0,7 | 50.831 | 0,7 |
| - Leitungsspülungen | 10.225 | 0,2 | 10.080 | 0,1 |
| Wasserverluste Q_V | 686.263 | 9,9 | 702.337 | 9,9 |
| - scheinbare Wasserverluste Q_{VS} | 93.621 | 1,4 | 95.644 | 1,3 |
| - reale Wasserverluste Q_{VR} | 592.642 | 8,5 | 606.693 | 8,6 |

Quelle: COSVega (2014)

Für die Schätzung des durch die realen Wasserverluste entstandenen wirtschaftlichen Schadens kann die Höhe der Umlage der Bodenseewasserversorgung für die Lieferung bis zu den Übergabestellen angesetzt werden. Die Umlage betrug im Jahr 2012 laut Pressemitteilung der BWV 0,446 Euro pro Kubikmeter (BWV, 2012). Somit betragen die Kosten der realen Wasserverluste K_{VR} in 2012 ca. 271.000 Euro. Wird für den Schaden aus scheinbaren Wasserverlusten der Arbeitspreis von 2,38 Euro pro Kubikmeter (MUKE-BW, 2012) ange-

⁹Quelle: Geschäftsberichte SWP 2000 bis 2012, s. <http://www.stadtwerke-pforzheim.de/de/90.php>; Höhe der scheinbaren WV unbekannt

nommen, beliefen sich deren Kosten K_{VS} in 2012 auf ca. 228.000 Euro. In Summe ergibt sich ein wirtschaftlicher Schaden von 499.000 Euro in 2012.

6.4 Erstellung der Austauschdatenbank

6.4.1 Anbindung an IT-Systeme der SWP

Die notwendigen Eingangsdaten für die Wassermengenanalyse bei den SWP stammen aus verschiedenen IT-Systemen und Datenbanken. Diese wurden über Sichten und Abfragen an das GIS COSVega angebunden, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben. COSVega prüft und homogenisiert die Eingangsdaten und stellt diese in einer Austauschdatenbank zusammen. Die Austauschdatenbank setzt sich aus 30 Tabellen zusammen, die in Abbildung 5.4 aufgelistet sind. Abbildung 6.10 veranschaulicht, aus welchen IT-Systemen und Datenbanken im Fall der SWP die Eingangsdaten dieser Tabellen stammen. Im Folgenden werden die Besonderheiten der einzelnen Datenquellen und erforderliche Vorarbeiten für die Anbindung beschrieben.

COSVega Das bei den SWP eingesetzte GIS COSVega enthielt bereits bei Beginn des Projekts ein sehr detailliertes Netzinformationssystem. Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen sowie KWZ und Abnehmer waren darin vollständig und lagemäßig exakt erfasst. Die Zugehörigkeit der genannten Komponenten zu einer Versorgungszone wurde anhand der Topologie des Leitungsnetzes korrekt berechnet. Anlagen wie Wasserwerke, Pumpstationen und Hochbehälter waren dagegen nur stark vereinfacht (als jeweils ein Element mit einer Reihe beschreibender Sachdaten) abgebildet. Wichtige Einbauteile wie Schieber, Behälterkammern, Füllstandsmessgeräte oder BWZ waren nicht repräsentiert. Für die Anbindung wurden daher zunächst alle relevanten Einbauteile aus den Anlagenschemata des Prozessleitsystems in das GIS übernommen. Die genaue Geometrie der Behälterkammern (Grundfläche, Höhe) wurde anhand von Bau- und Bestandsplänen erfasst und in das GIS übertragen. Die Messgeräte für Durchfluss und Füllstand wurden mit den zugehörigen Messwerten in den Datenbanken der manuellen Zählerablesungen und dem Prozessleitsystem verknüpft. Weiterhin wurde festgestellt, dass im GIS nur ein Teil der Schäden an Haupt- und Versorgungsleitungen und keine Schäden an Anschlussleitungen erfasst wurden. Außerdem wurden im GIS nur Datum und Lage des Schadens geführt, nicht aber die Ursachen und weitere Details aus der Schadens Erfassung. Eine vollständige Schadensdatenbank wird im Auftragszentrum der SWP (s. SLT.inplast) geführt. Die vorhandenen Datenbestände der beiden IT-Systeme wurden abgeglichen, ineinander überführt und durch Angaben aus Schadensprotokollen vervollständigt. Für die Analyse der Ursachen von Leitungsschäden und Wasserverlusten werden Informationen zu Umwelteinflüssen benötigt, die bisher nicht im GIS der SWP geführt wurden. Die in den Abschnitten 6.2.3 und 6.2.4 beschriebenen Informationen zu Bodenaggressivität, Bodenkonsistenz (Bindigkeit), Grundwasser und Verkehrsbelastung wurden daher nach COSVega überführt und mit den Rohrleitungsdaten verschnitten.

ids HIGH-LEIT Da das Prozessleitsystem entscheidend für den sicheren und reibungslosen Betrieb der Wasserversorgung ist, unterliegt es hohen Sicherheitskriterien. Das Prozessleitsystem ids HIGH-LEIT ist bei den SWP daher auf einem separaten Server installiert, der gegen Zugriffe von außen abgesichert ist. Die geplante Anbindung mittels eines lesenden Zugriffs auf die archivierten Messwerte und Meldungen ist somit nicht möglich. Stattdessen werden die erforderlichen Eingangsdaten von ids HIGH-LEIT zyklisch (alle 24 Stunden) auf

einen anderen Server ausgespielt, wo sie anschließend von COSVega abgeholt und in die Austauschdatenbank übertragen werden. Dabei handelt es sich nicht um die optimale Lösung, da aufgrund der minütlichen Durchfluss- und Füllstandsmesswerte von circa 100 Messgeräten sehr große Datenmengen redundant gehalten werden, was eigentlich durch den Zugriff per Sicht vermieden werden sollte.



Abbildung 6.10: Erstellung der Austauschdatenbank über Sichten auf IT-Systeme, isolierte und externe Datenbanken

Meldungen aus dem Leitsystem HIGH-LEIT werden in COSVega aus Textdateien eingelesen und an die Austauschdatenbank übergeben, um die Tabellen [t_hb_ueberlauf], [t_zustand_pumpen] und [t_zustand_armaturen] zu erzeugen. Um in den Eingangsdaten bestimmte Textelementen zu identifizieren und in eine neue Struktur zu übersetzen, werden in COSVega sogenannte Parser verwendet. Abbildung 6.11 zeigt beispielhaft, wie das Meldebuch des Leitsystems nach Behälterüberläufen durchsucht wird. Im GIS ist für jeden Behälter die zugehörige Meldungs-ID des Leitsystems abgelegt, die einen Überlauf anzeigt (ML1583 im Beispiel aus Abbildung 6.11). Das Meldebuch wird nach diesen Meldungs-IDs (Spalte lpld)

durchsucht und der Inhalt der Spalte Text analysiert: Das Wort ÜBERLAUF signalisiert den Beginn eines Überlaufs und das Wort NORMALSTAND dessen Ende. Die zugehörigen Zeiten werden aus der Spalte LSZeitpunkt in die Tabelle [t_hb_ueberlauf] übertragen.

```
#EintragsNr;LSZeitpunkt;UstZ;QuitZ;QuitUser;AktionUser;Text;Bereich;Klasse;IpId;UstNr;RecNr;Status;Kommentar;
...
401;31.05.2011 21:23:20.022;-;-;-;DU HANFACKER EINLAUFSCHIEBER AUF ;2;Betrieb;ML10802;129;50;-;
402;31.05.2011 21:24:56.013;-;-;-;HAGENSCHIESS ... WASSERSTAND BEHALTER ÜBERLAUF ;2;Alarm;ML1583;134;20;Q;
403;31.05.2011 21:24:56.013;-;-;-;A1;Alarmvorschrift 3 in Alarmschlange eingetragen ;2;Betrieb;ML1583;134;20;-;
404;31.05.2011 21:25:00.294;-;-;-;A1;Anruf Cityruf (Nr. 7323463) gestartet ;2;Betrieb;ML1583;134;20;-;
405;31.05.2011 21:25:31.544;-;-;-;TWA SONNENBERG UV-ANLAGE UV-DESINFEKTION AUS ;2;Betrieb;ML11065;172;352;-;
...
431;31.05.2011 21:44:48.188;-;-;-;A1;Cityfunknr 7323463 angenommen ;2;Betrieb;ML11860;137;0;-;
432;31.05.2011 21:45:28.906;-;-;-;HAGENSCHIESS ... WASSERSTAND BEHALTER NORMALSTAND ;2;Betrieb;ML1583;134;20;-;
435;31.05.2011 21:49:35.122;-;-;-;WW FRIEDRICHSBERG ANFAHRKLAPPE HZN P 1 DROSSEL ;2;Betrieb;ML11458;173;440;-;
```

Abbildung 6.11: Eingangsdaten zu Behälterüberläufen aus dem Leitsystem ids HIGH-LEIT

SLT.inplast Wie bereits geschildert, werden Schadensdaten aus der Software SLT.inplast in das GIS überführt. Weiterhin von Interesse für die Wassermengenanalyse sind Angaben zu Leitungsspülungen und zu Reparaturarbeiten, die ebenfalls in SLT.inplast vorgehalten werden und in die Tabellen [t_vvu_bedarf_netze] und [t_reparaturen] der Austauschdatenbank überführt werden müssen. An Abbildung 6.12 wird die Vorgehensweise zum Auslesen der für die Wasserbilanz relevanten Aufträge aus dem Auftragszentrum veranschaulicht. Leitungsspülungen können einfach über die ID des jeweiligen Hydranten im GIS lagemäßig verortet werden, da beide Systeme identische IDs verwenden. Die Auftragsnummer (Spalte AANR) zeigt die Art der Maßnahme an. Um beispielsweise alle relevanten Turnusspülungen auszulesen, werden in Spalte AANR alle Einträge der Kennung 82300109 im Betrachtungszeitraum gesucht. Anhand der ID des Hydranten in der Spalte TITEL_GESAMT kann die Spülung einem Hydranten im GIS zugeordnet werden. Datum und Uhrzeit aus den Spalten ARBDATUM, VONZEIT und BISZEIT werden verwendet, um die Spülwasserentnahme $Q_{AN.2}$ zu ermitteln (vgl. Abschnitt 5.5.3).

```
AANR;UAANR;TITEL;ARBEND;ARBANF;STAND;STOERNR;TITEL_GESAMT;MITARBEITER;ISTMENGE;ARBDATUM;VONZEIT;BISZEIT;
...
82300023;235;vw erneuern <30m;22.09.11;22.09.11;7;;Bayernstraße 2.HZ NW;1;1,05;19.09.11;13:27;14:30;
82300002;1461;vw Leckbehebung;19.10.11;18.10.11;7;;Edisonstraße 1.HZ SW;2;0,95;18.10.11;10:11;11:08;
82300151;756;AW teilerneuern;19.10.11;18.10.11;7;;Kopernikusallee 37 AW 2.HZ Süd;3;2,95;18.10.11;09:34;12:31;
82300159;524;AW Leckbehebung;20.10.11;19.10.11;7;;Auerhahnstraße 8 AW 1.HZ SW;3;3,28;20.10.11;07:56;11:13;
82300109;23012;vw spülen-Turnus;19.10.11;7;;Arlingerstraße 2.HZ NW Hydrant 2851-0;2;0,4;19.10.11;09:36;10:00;
```

Abbildung 6.12: Eingangsdaten verschiedener Auftragsarten aus dem Auftragszentrum SLT.inplast

Da Reparaturarbeiten an Rohrleitungen in SLT.inplast nicht einer Leitungs-ID aus dem GIS zugeordnet werden, muss die Verknüpfung über die Adresse erfolgen. Dies geschieht anhand von Parsern, wie oben beschrieben. Dies ist bei Anschlussleitungen problemlos möglich, da in diesem Fall in SLT.inplast Straßename und Hausnummer geführt werden. Bei Haupt- und Versorgungsleitungen dagegen ist nur der Straßename bekannt. Die Verknüpfung entsprechender Reparaturarbeiten mit der zugehörigen Leitung im GIS kann daher nur über den Abgleich des Straßennamens, des Leitungsmaterials und -durchmessers und des Datums der Reparatur realisiert werden und ist daher fehleranfälliger.

Wilken ENER:GY Die Verbrauchsabrechnungssoftware Wilken ENER:GY war bereits vor Projektbeginn über eine Sicht an das GIS COSVega angebunden. Abnehmer und Kundenwasserzähler sind anhand der Adressinformationen lagegenau im GIS verortet und mit den zugehörigen Abrechnungsmengen und Zählerablesungen verknüpft.

Isolierte Datenbanken Zu den isolierten Datenbanken innerhalb der SWP sind hauptsächlich die monatlichen Ablesungen der BWZ und der Stromzähler in den Anlagen der Wasserversorgung zu zählen. Diese werden vom Betriebspersonal manuell durchgeführt und werden bisher in Excel-Tabellen archiviert. Im Rahmen des Projekts sollen diese Tabellen abgelöst werden. In Zukunft sollen die manuellen Ablesungen direkt in COSVega eingegeben werden, um somit der Austauschdatenbank zur Verfügung zu stehen. Weiterhin besteht bei den SWP bisher ein System zur Anlagendokumentation (BIK k3v), das aber nach Angaben der Mitarbeiter nicht genutzt wird. Zwischen den Angaben aus GIS, Leitsystem und Anlagendokumentation zu den Anlagen der Wasserversorgung bestanden teilweise erhebliche Widersprüche. Im Rahmen des Projekts wurden signifikante Informationen aus BIK k3v zu BWZ und Hochbehältern in das GIS überführt, nachdem diese Informationen von SWP-Mitarbeitern vor Ort überprüft worden waren. Weiterhin wurden Informationen zu KWZ (Typ, Hersteller, Dimensionierung, Fehlerkurve) aus der Kundenzählerdatenbank nach COSVega überführt.

Externe Datenbanken Im Rahmen des Projekts wurde umgesetzt, dass die Berufsfeuerwehr Pforzheim jährlich die Einsatzdokumentation der Brandereignisse des vergangenen Jahres an die SWP übergibt. Diese wird in die Austauschdatenbank übernommen.

6.4.2 Größe der Austauschdatenbank

Die Datenbank, die für die pilothafte Erprobung der *WMA* erstellt wurde, umfasst alle Daten, die für die Bilanzierung des Jahres 2012 benötigt werden. Da für die korrekte Annualisierung des Wasserverbrauchs auch die Messwerte des Vorjahres und des Folgejahres benötigt werden, umfasst der Datenbestand die Jahre 2011 bis 2013. Die Dateigröße der Austauschdatenbank im db3-Format beträgt 14,32 Gigabyte (*GB*). Die absolut dominierende Datenmenge befindet sich dabei in der Tabelle *[t_bwz_ablesungen]*, die die minütlichen und stündlichen Messwerte von 75 fernausgelesenen Betriebswasserzählern enthält, die alleine 14,26 *GB* beanspruchen. Alle anderen Datenbanken zusammen dagegen sind nur ca. 51,82 Megabyte (*MB*) groß.

6.5 Wahl der Pilotgebiete

6.5.1 Pilotgebiet 1: Huchenfeld und Würm

Pilotgebiet 1 umfasst zwei räumlich klar vom Stadtkern abgegrenzte Ortschaften, die sich etwa 1,5 *km* südlich von Pforzheim befinden. Diese Ortschaften, Huchenfeld und Würm, bieten sich als Pilotgebiet an, weil sie einerseits eine übersichtliche Größe und klar definierte Systemgrenzen haben und andererseits alle Elemente eines typischen Wasserversorgungssystems aufweisen: Wasser unterschiedlicher Herkunft (Tiefbrunnen Nagoldtal, Brunnen Klinge Würm und Fremdbezug BWV) wird an verschiedenen Punkten in das Rohrnetz eingespeist, es gibt fünf hydraulisch voneinander getrennte Versorgungszonen, vier Hochbehälter und einen Druckunterbrechertank, elf BWZ und eine Pumpstation. Tabelle 6.5 zeigt einige Kenndaten des Pilotgebiets.

Die Systemgrenzen des Pilotgebiets 1 werden durch drei Einspeisepunkte gebildet:

- Den Übergabepunkt der Bodensee-Wasserversorgung an HB Reutwald und HB Berg.
- Einspeisung des Brunnens Huchenfeld Nagoldtal in den HB Reutle.
- Einspeisung des Brunnens Klinge Würm in die Zone 65 (in 2011).

Tabelle 6.5: Kenndaten zu Pilotgebiet 1: Huchenfeld und Würm

| Insgesamt | Einheit | Zone | Zone | Zone | Zone | Pilot- gebiet 1 |
|--------------------|---------|------|------|-------|------|--------------------|
| | | 8+65 | 16 | 31 | 32 | |
| Länge HW / VW | [km] | 8,34 | 4,41 | 14,02 | 7,80 | 34,57 |
| Länge AW | [km] | 5,52 | 2,62 | 11,57 | 4,08 | 23,79 |
| Anzahl Abnehmer | | 478 | 204 | 912 | 287 | 1.881 |
| Mittl. Druck P_m | [m] | 48 | 47 | 43 | 39 | 44 |

Quelle: COSVega (2014)

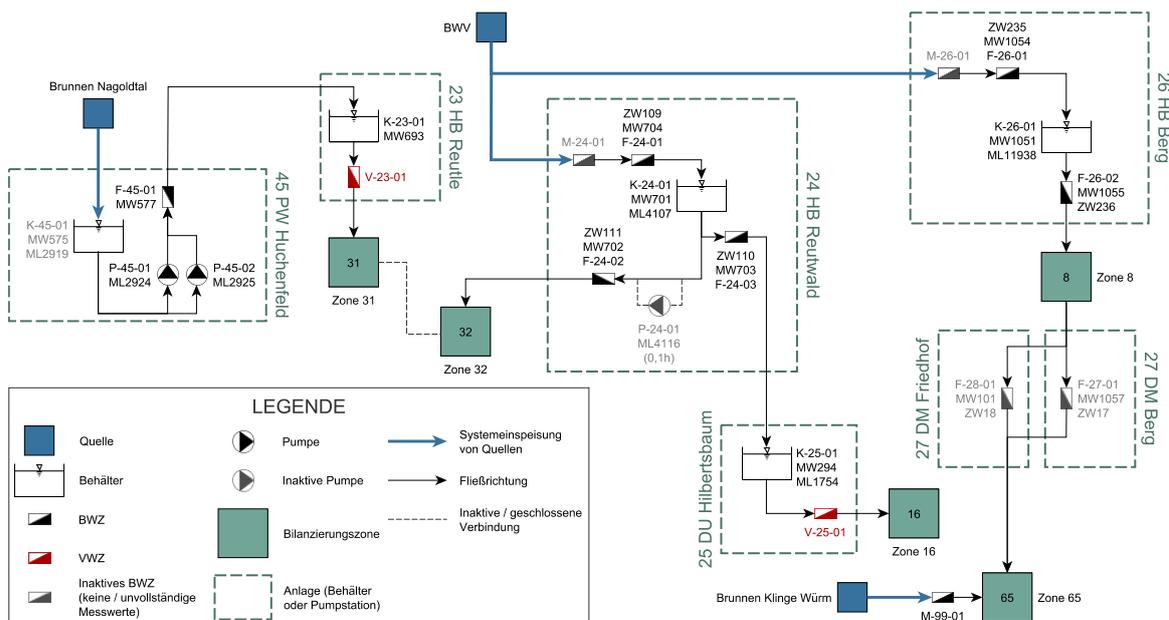


Abbildung 6.13: Topologie des Pilotgebiets 1 für die WMA

Beim Brunnen Klinge Würm handelt es sich um eine Notversorgung, die nur wenige Stunden im Jahr in Betrieb ist und dessen Einspeisung monatlich vom Betriebspersonal der SWP ausgelesen wird. In den Jahren 2011 und 2012 wurden zwei bestehende Druckunterbrecher-tanks zwischen den Zonen 8 und 65 durch Druckminderer (DM Berg und DM Friedhof) ersetzt. Da die BWZ an diesen Anlagen im Betrachtungszeitraum noch nicht im Betrieb waren, wurden die Zonen zu einer Zone zusammengezogen und gemeinsam bilanziert. Abbildung 6.13 zeigt schematisch die Topologie des Pilotgebiets, dessen Netzplan in Abbildung 5.2 dargestellt ist.

6.5.2 Pilotgebiet 2: Seehaus

Dieses Pilotgebiet umfasst den zentralen Hochbehälter HB Seehaus (Nennvolumen 5.600 m^3) und die von ihm versorgten Zonen im Zentrum, Süden und Nordwesten des Stadtgebiets. Vom HB Seehaus wird Wasser durch die 3. Hochzone Süd (Zone 18) hindurch an die Hochbehälter HB Hegenach und HB Hagenschieß weitergeleitet, an die wiederum die 1. und 2. Hochzone Süd (Zonen 6 und 14) angeschlossen sind. Außerdem wird Wasser gravitär zum

HB Wallberg geleitet, der in die 2. Hochzone Nordwest (Zone 13) einspeist. Über diese Zone wird der HB Brötzingen mit Wasser versorgt, der wiederum in die 1. Hochzone Nordwest (Zone 5) einspeist. Weiterhin wird Wasser aus dem HB Seehaus in den HB Rod geleitet. Dieser fungiert als Gegenbehälter der zentralen Tiefzone Mitte (Zone 60), die hauptsächlich Wasser aus dem Wasserwerk Friedrichsberg erhält. Außerdem gibt der HB Seehaus Bodenseewasser sowohl an den HB Sonnenberg als auch das Wasserwerk Friedrichsberg ab, um es dort mit Quell- bzw. Grundwasser zu mischen. Neben den fünf Behältern gibt es in Pilotgebiet 2 insgesamt 19 BWZ sowie drei Pumpstationen, die der Notversorgung und die meiste Zeit inaktiv sind. Tabelle 6.6 zeigt einige Kenndaten des Pilotgebiets.

Tabelle 6.6: Kenndaten zu Pilotgebiet 2: Seehaus

| Insgesamt | Einheit | Zone 5 | Zone 6 | Zone 13 | Zone 14 | Zone 18 | Zone 60 | Pilotgebiet 2 |
|--------------------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Länge HW / VW | [km] | 9,87 | 15,89 | 48,01 | 30,67 | 34,27 | 43,07 | 181,78 |
| Länge AW | [km] | 4,52 | 9,18 | 22,84 | 17,60 | 9,79 | 17,34 | 81,27 |
| Anzahl Abnehmer | | 414 | 751 | 1.544 | 1.297 | 606 | 1.858 | 5.794 |
| Mittl. Druck P_m | [m] | 47 | 50 | 52 | 54 | 59 | 54 | 53 |

Quelle: COSVega (2014)

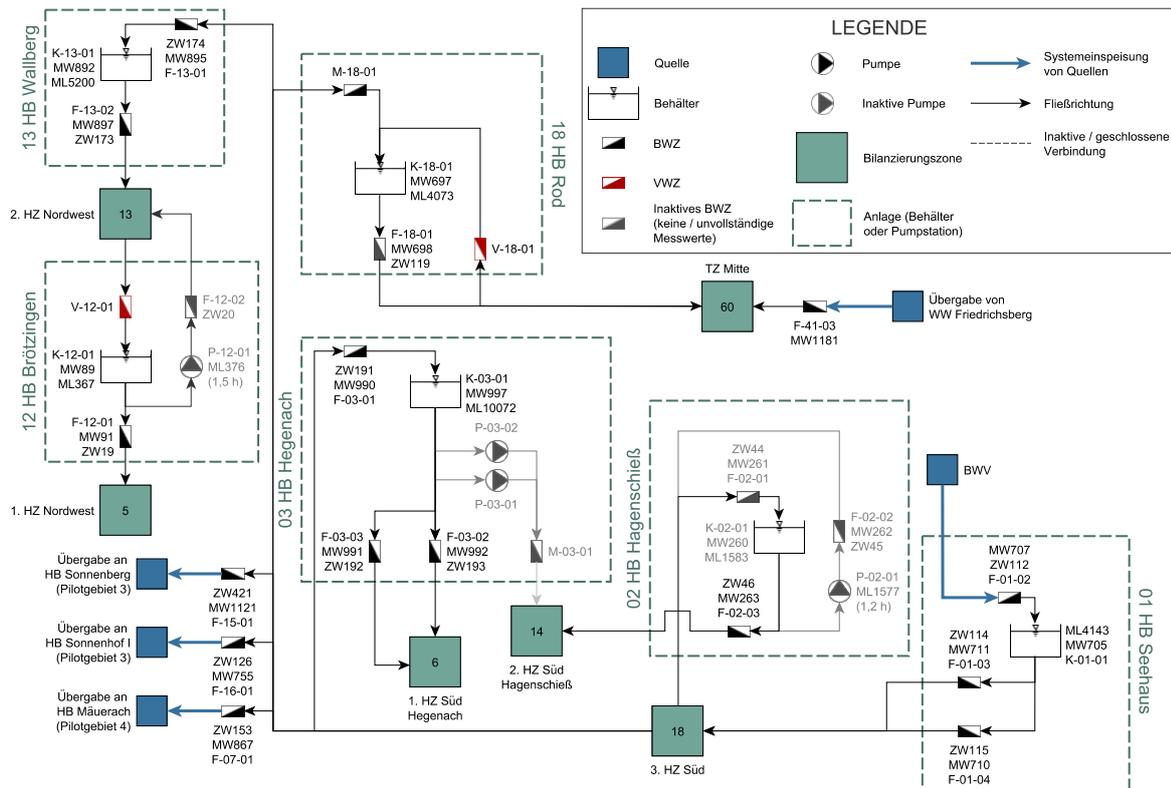


Abbildung 6.14: Topologie des Pilotgebiets 2 für die WMA

Es ist zu beachten, dass die Längenangabe für HW und VW in Zone 18 ca 14,99 km Zubringerleitungen enthält. Die Systemgrenzen des Pilotgebiets 2 werden durch zwei Einspeisepunkte und drei Entnahmepunkte gebildet:

- Einspeisung von BWV-Wasser aus dem HB Seehaus in die dritte HZ Süd.
- Einspeisung von BWV-Enzaue-Mischwasser aus WW Friedrichsberg in die TZ Mitte.
- Abgabe von BWV-Wasser an das WW Friedrichsberg (über HB Mäuerach).
- Abgabe von BWV-Wasser an den HB Sonnenberg.
- Abgabe von BWV-Wasser an den HB Sonnenhof I.

Der Einsatz von WVWZ ist nötig, um die Abgabe von Wasser aus Zone 13 an den HB Brötzingen zu bestimmen. Ein weiteres VWZ wird benötigt, um die Einspeisung aus der Zone 60 in den Gegenbehälter HB Rod zu erfassen. Am HB Hagenschieß sind die minütlichen Messwerte der BWZ unvollständig, so dass hier kein VWZ zum Einsatz kommen kann. Stattdessen wurde der HB Hagenschieß im Modell deaktiviert. Abbildung 6.14 zeigt schematisch die Topologie des Pilotgebiets.

6.5.3 Pilotgebiet 3: Sonnenberg

Dieses Pilotgebiet beinhaltet als zentrales Element den Hochbehälter Sonnenberg, der vier Zonen im Südwesten und Westen der Stadt versorgt. Wasser erhält der HB Sonnenberg aus dem Wasserwerk Sonnenberg, in dem Quellwasser aus dem Grösseltal aufbereitet wird. Dieses wird im HB Sonnenberg mit Bodenseewasser vermischt, das aus dem HB Seehaus stammt (vgl. Abschnitt 6.3.2.2). Vom HB Sonnenberg wird Wasser gravitär in die 1. Hochzone Südwest (Zone 7) eingespeist, die über einen Druckunterbrechertank die nachgeschaltete Tiefzone West (Zone 64) versorgt. Eine Pumpengruppe fördert bei Bedarf Wasser aus dem HB Sonnenberg zunächst zum HB Sonnenhof I, an den die 2. Hochzone Südwest (Zone 15) angeschlossen ist. Von diesem Behälter wird das Wasser durch die 3. Hochzone Südwest (Zone 19) zum HB Sonnenhof II gepumpt, der als Gegenbehälter dient. Tabelle 6.7 gibt einen Überblick über einige Kenndaten des Pilotgebiets.

Tabelle 6.7: Kenndaten zu Pilotgebiet 3: Sonnenberg

| Insgesamt | Einheit | Zone 7+64 | Zone 15 | Zone 19 | Pilot- gebiet 3 |
|--------------------|---------|--------------|------------|------------|--------------------|
| Länge HW / VW | [km] | 72,11 | 7,49 | 5,37 | 84,97 |
| Länge AW | [km] | 39,97 | 4,98 | 2,86 | 47,55 |
| Anzahl Abnehmer | | 3.336 | 476 | 211 | 4.023 |
| Mittl. Druck P_m | [m] | 53 | 49 | 40 | 52 |

Quelle: COSVega (2014)

Die Systemgrenzen des Pilotgebiets 3 werden durch drei Einspeisepunkte und drei Entnahmepunkte gebildet:

- Einspeisung von Quellwasser in das Wasserwerk Grösseltal.
- Einspeisung von BWV-Wasser aus dem HB Seehaus in den HB Sonnenberg.
- Einspeisung von BWV-Wasser aus dem HB Seehaus in den HB Sonnenhof I.
- Abgabe von aufbereitetem Grösseltalwasser zur Filtrerrückspülung im WW Sonnenberg.

- Abgabe von aufbereitetem Grösseltalwasser an die Gemeinde Waldrennach.
- Abgabe von BWV-Grösseltal-Mischwasser in Richtung Büchenbronn

Alle Einspeisemengen in das Pilotgebiet und alle Abgaben werden mithilfe von BWZ gemessen. Am HB Sonnenberg sind nicht alle Entnahme- und Einspeiseleitungen mit BWZ ausgestattet, so dass ein VWZ zur Bestimmung der Wassermengen eingesetzt werden muss. Das Messgerät F-17-01 am HB Sonnenhof I liefert erst ab August 2012 Mess- und Zählwerte. Die minütlich bzw. stündliche Einspeisung in Zone 19 lässt sich daher auch mit VWZ nicht ermitteln. HB Sonnenhof II wurde daher im Modell deaktiviert. Eine ähnliche Situation herrscht am DU Hanfacker, wo der BWZ F-14-01 nur monatlich ausgelesen wird. Ein Einsatz von VWZ und eine detaillierte Analyse der Einspeisemengen ist daher weder für Zone 7 noch für Zone 64 möglich, die aus diesem Grund zu einer Zone zusammengezogen und gemeinsam bilanziert werden. Abbildung 6.15 zeigt schematisch die Topologie des Pilotgebiets.

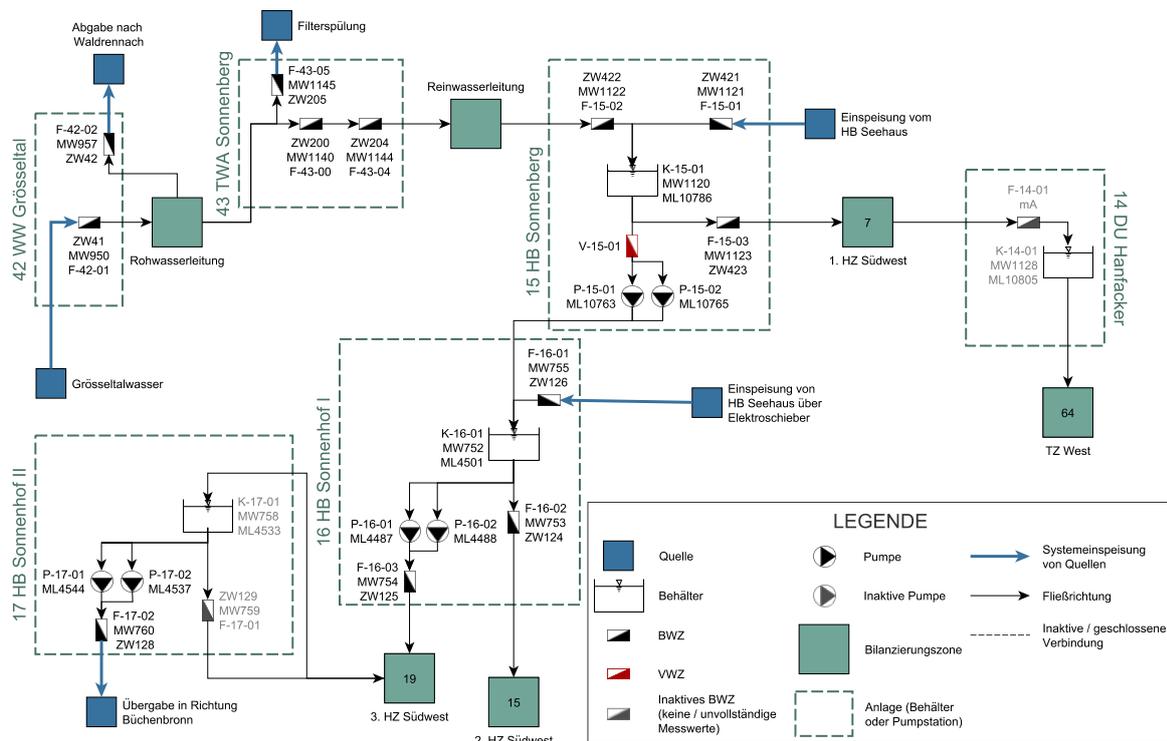


Abbildung 6.15: Topologie des Pilotgebiets 3 für die WMA

6.5.4 Pilotgebiet 4: Mäuerach

Pilotgebiet 4 umfasst drei Versorgungszonen: Tief- und Hochzone Mäuerach (Zonen 61 und 28) sowie Tiefzone Eutingen (Zone 58). Aus dem HB Seehaus fließt Bodenseewasser gravitär durch die 3. Hochzone Süd zum HB Vogelheerd. Von dort wird das Wasser an den HB Mäuerach weitergeleitet, an den die Hochzone Mäuerach und die Tiefzone Mäuerach angeschlossen sind. Aus letzterer fließt ein Teil des Wassers zum Wasserwerk Friedrichsberg, während ein anderer Teil über einen Zäblerschacht in der Ludwig-Wolf-Straße an die Tiefzone Eutingen

mit dem Gegenbehälter HB Hohlingsgrund abgegeben wird. Tabelle 6.8 gibt einen Überblick über einige Kenndaten des Pilotgebiets.

Tabelle 6.8: Kenndaten zu Pilotgebiet 4: Mäuerach

| Insgesamt | Einheit | Zone 28 | Zone 58 | Zone 61 | Pilotgebiet 4 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Länge HW / VW | [km] | 4,81 | 11,35 | 9,80 | 25,96 |
| Länge AW | [km] | 4,43 | 7,04 | 2,17 | 13,64 |
| Anzahl Abnehmer | | 319 | 752 | 122 | 1.193 |
| Mittl. Druck P_m | [m] | 39 | 52 | 52 | 49 |

Quelle: COSVega (2014)

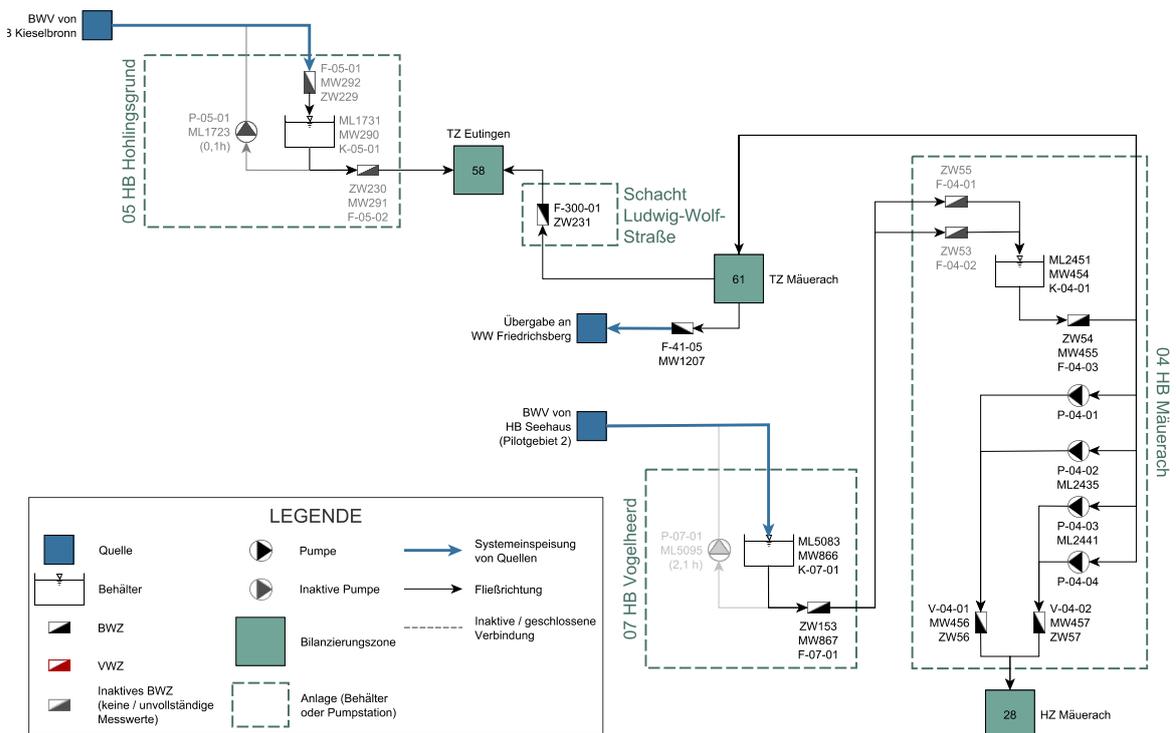


Abbildung 6.16: Topologie des Pilotgebiets 4 für die WMA

Es ist zu beachten, dass die Längenangabe für HW und VW in Zone 61 ca 5,05 km Zuzringerleitungen enthält. Die Systemgrenzen des Pilotgebiets 4 werden durch zwei Einspeisepunkte und einen Entnahmepunkt gebildet:

- Einspeisung von BWW-Wasser in den HB Vogelheerd.
- Einspeisung von BWW-Wasser aus dem HB Kieselbronn in den HB Hohlingsgrund.
- Abgabe von BWW-Wasser in Richtung Wasserwerk Friedrichsberg.

Alle Wassereinspeisungen und -abgaben in und aus dem Pilotgebiet werden mit BWZ erfasst. Abbildung 6.16 zeigt schematisch die Topologie des Pilotgebiets.

6.6 Testbetrieb

Für den Testbetrieb wurde von COS am 27.02.2014 der aktuelle, verifizierte Datenbestand des Leitungsnetzes, der Verbrauchsabrechnung, des Prozessleitsystems und des Auftragsmanagementsystems von den SWP übernommen und in eine Austauschdatenbank ausgespielt. In diese Austauschdatenbank im db3-Format wurde manuell die Topologie der vier Pilotgebiete integriert. Anschließend wurde eine Reihe von Testläufen mit der *WMA* an den Pilotgebieten durchgeführt, um die Arbeit verschiedener Funktionen zu testen. Die Ergebnisse der Testläufe sowie die Bewertung der Funktionalität der *WMA* werden in Abschnitt 7.2 dargestellt und diskutiert.

Für die Pilotgebiete wurde je nach Datenlage die Wasserbilanz der Jahre 2011 und/oder 2012 untersucht. Die Analyse der Wasserverluste im Jahr 2013 war leider nicht möglich, da zum Zeitpunkt der Ausspielung weder die Abrechnungsdaten noch ausreichend Kundenwasserzählerablesungen vorlagen. Für die Berechnung von Kennzahlen und für die Ursachenanalyse war vorgesehen, simulierte Fließgeschwindigkeiten und Drücke aus dem hydraulischen Modell in die Testrechnungen einzubinden. Allerdings lagen zum Zeitpunkt der Anfertigung der vorliegenden Arbeit noch keine Ergebnisse aus dem hydraulischen Modell vor, so dass für die Ermittlung von Kennzahlen auf Näherungswerte für den Versorgungsdruck zurückgegriffen werden musste. Die Ergebnisse der Wassermengenanalyse in den Pilotgebieten sind in Abschnitt 7.3 beschrieben.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 8 zusammengefasst und können in die Weiterentwicklung und Optimierung des Prototyps der *WMA* einfließen. Die Aufnahme des Testbetriebs der *WMA* und der anderen Komponenten von *AWaRe* in den Systemen der SWP ist ab dem dritten Quartal 2014 geplant.

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Kapitelüberblick

Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in zwei Teilen: in Abschnitt 7.2 werden allgemeine Erkenntnisse über die Funktionalität der *WMA* beschrieben, die aus der Durchführung der Wassermengenanalyse in den Pilotgebieten gewonnen wurden. Zunächst werden allgemeine Aspekte behandelt, wie zum Beispiel die Eigenschaften der Austauschdatenbank, die Güte der Eingangsdaten und notwendige Vorarbeiten für die Durchführung der Berechnungen. Anschließend wird die Funktionalität der drei Module WB, PI und UA behandelt. In Abschnitt 7.3 findet sich die Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten Wassermengenanalysen in den Pilotgebieten in Pforzheim. Die Gliederung der Ergebnisse orientiert sich an der Gliederung der Beschreibung des Werkzeugs in Kapitel 5. Das Kapitel endet mit der Bewertung der Wasserverlustsituation in den Pilotgebieten in Abschnitt 7.4.

7.2 Diskussion der Funktionalität der *WMA*

7.2.1 Allgemeine Funktionen

7.2.1.1 Austauschdatenbank

Ausspielen der Austauschdatenbank Nachdem die in Abschnitt 6.4.1 genannten IT-Systeme der SWP über Sichten an das GIS COSVega angebunden sind, kann die Austauschdatenbank von COS per Knopfdruck automatisiert erzeugt und ausgespielt werden. Bei der Ausspielung werden die in Abbildung 6.10 dargestellten Tabellen erstellt und in der Austauschdatenbank abgelegt. Damit sind alle für die Wassermengenanalyse benötigten Komponenten des Wasserversorgungssystems vorhanden. Die Dokumentation des Eigenbedarfs der Wasserwerke wurde bei den SWP bisher noch nicht an COSVega angebunden. Daher wird die Tabelle *[t_wvu_bedarf_werke]* nicht berücksichtigt. Einige spezifische Aspekte von Inhalten der Austauschdatenbank werden im Folgenden erläutert.

Eingangsdaten aus Textdateien Die Verwendung von Parsern ist notwendig, um Informationen aus Textdateien bestehender IT-Systeme auszulesen, deren Datenformat für andere Zwecke bestimmt ist (vgl. Abschnitt 6.4.1). Es ist aber nicht die ideale Lösung, da Veränderungen in der Struktur der Eingangsdaten Fehler in der Übertragung hervorrufen können. Außerdem können identifizierte Meldungen oder Aufträge aufgrund fehlender Informationen oder unterschiedlicher Schreibweisen in den verschiedenen IT-Systemen nicht immer eindeutig dem zugehörigen Element im GIS zugeordnet werden. Abbildung 6.12 zeigt, dass bei Maßnahmen an Anschlussleitungen der Straßename und die Hausnummer in der Spalte TITEL_GESAMT geführt werden. In diesem Fall ist die eindeutige Zuordnung im GIS möglich, vorausgesetzt die Schreibweise der Straßennamen ist in beiden IT-Systemen identisch, was nicht zwingend der Fall ist. Bei Maßnahmen an Versorgungsleitungen wird im Auftragszentrum nur der Straßename geführt. In diesem Fall wird versucht, zusätzlich über den

Vergleich des Auftragsdatums mit dem Baudatum der Leitung im GIS das betroffene Rohr zu identifizieren. Diese Methode ist jedoch fehleranfällig und zeigt in Pforzheim nur selten Erfolg, wie die Analyse der vergangenen 5 Jahre in Tabelle 7.1 zeigt. Während an Anschlussleitungen der Anteil identifizierter Reparaturmaßnahmen insgesamt bei 95 % liegt, beträgt er bei Versorgungsleitungen nur ca. 31 %.

Tabelle 7.1: Zuordnung von Reparaturmaßnahmen zu Rohrleitungen, 2008 bis 2012

| Jahr | Reparaturen an AW | | | Reparaturen an VW | | |
|--------|-------------------|---------|------------|-------------------|---------|------------|
| | gesamt | erkannt | Anteil [%] | gesamt | erkannt | Anteil [%] |
| 2008 | 47 | 44 | 94 | 0 | 0 | 0 |
| 2009 | 56 | 52 | 93 | 10 | 2 | 20 |
| 2010 | 58 | 55 | 95 | 9 | 3 | 33 |
| 2011 | 30 | 29 | 97 | 5 | 2 | 40 |
| 2012 | 46 | 45 | 98 | 2 | 1 | 50 |
| Gesamt | 237 | 225 | 95 | 26 | 8 | 31 |

Daten aus der Verbrauchsabrechnung Um die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse für die in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe Q_{AI} zu bewerten, werden die aus der Verbrauchsabrechnung stammenden Daten in den Tabellen $[t_abnehmer]$, $[t_verbrauchskurven]$, $[t_kwz]$ und $[t_kwz_ablesungen]$ überprüft. Die Prüfung zeigt, dass die Zuordnung der Abnehmer zu den Bilanzierungszonen zuverlässig funktioniert: von 19.255 aktiven Abnehmern konnten nur 14 (0,1 %) keiner Bilanzierungszone zugewiesen werden. Allerdings wurde 436 Abnehmern (2,3 %) keine Abnehmer-ID zugewiesen. Diese ist aber notwendig, um Kundenwasserzähler, Ablesungen und Verbräuche den Abnehmern und letztlich den Bilanzierungszonen zuzuweisen. Weiterhin sind in der Austauschdatenbank 462 Abnehmer enthalten, deren Status inaktiv ist und die keiner Zone zugeordnet sind, obwohl ihnen ein Wasserbrauch zugewiesen wurde. In 2012 macht dieser nicht zuzuordnende Wasserverbrauch für 211 Abnehmer insgesamt $86.870 m^3$ aus.

In Pilotgebiet 1 fielen zwei Abnehmer auf, deren jeweiliger Verbrauch deutlich die Einspeisung der zugehörigen Zonen übersteigt, was mehrere mögliche Ursachen haben kann: Entweder ist ein fehlerhafter Zahlenwert in der Verbrauchsabrechnung registriert, er wurde bei der Übertragung in die Austauschdatenbank verfälscht oder die Zuordnung der Abnehmer zu den jeweiligen Zonen ist nicht korrekt (z.B. Rechnungsadresse ungleich Verbrauchsadresse). Da beide Abnehmer in den Vorjahren deutlich niedrigere Verbräuche aufweisen, die mit den KWZ-Ablesungen übereinstimmen, hat der Fehler vermutlich eine der ersten beiden Ursachen. Diese beiden Fehler wurden nur aufgrund der hohen Jahresverbräuche (60.423 bzw. $98.902 m^3$) aufgedeckt. Es lässt sich mit den verfügbaren Informationen nicht nachvollziehen, ob und wie häufig weitere derartige Fehler in der Verbrauchsabrechnung bzw. der Austauschdatenbank auftreten (s. auch Abschnitt 7.2.2.2).

Die Zahl der Verbrauchsabrechnungen zeigt über die Jahre einen leichten aber kontinuierlichen Anstieg: Zwischen 2008 und 2012 sind jährlich zwischen 18.300 und 18.700 Kundenabrechnungen in der Austauschdatenbank registriert. Im Vergleich dazu variiert die Zahl der jährlichen Zählerablesungen an KWZ von Jahr zu Jahr stark, wie in Tabelle 7.2 zu sehen ist. Eine genauere Betrachtung der Ablesezeiten ergibt, dass die Schwankungen vornehmlich auf den Austausch von Kundenwasserzählern zurückzuführen ist, da beim Austausch die

Endablesung des alten KWZ und eine 0-ablesung des neuen KWZ in der Austauschdatenbank abgelegt werden. Die Zahl der abgelesenen Kundenwasserzähler bleibt hingegen über die Jahre annähernd konstant wie die äußerst rechte Spalte der Tabelle 7.2 zeigt.

Tabelle 7.2: Analyse der KWZ und KWZ-Ablesungen, 2008 bis 2012

| Jahr | Anzahl KWZ-Ablesungen | | Anzahl abgelesener KWZ | | |
|------|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|---------|
| | gesamt | Ablesung = 0 | gesamt | ausgetauscht | im Netz |
| 2008 | 26.657 | 2.092 | 20.817 | 1.787 | 19.030 |
| 2009 | 27.472 | 2.401 | 21.344 | 2.155 | 19.189 |
| 2010 | 36.356 | 7.544 | 24.691 | 5.611 | 19.080 |
| 2011 | 36.332 | 6.232 | 24.106 | 4.749 | 19.357 |
| 2012 | 29.640 | 3.774 | 22.508 | 3.399 | 19.109 |

Insgesamt 19.694 KWZ, die laut Verbrauchsabrechnung derzeit im Wasserversorgungssystem eingebaut sind, können ausnahmslos einem Abnehmer zugewiesen werden. Für die Berechnung von Q_{AI} werden aber auch KWZ betrachtet, die im Bilanzierungszeitraum ausgebaut wurden. Aufgrund des sechsjährigen Eichintervalls (vgl. Abschnitt 2.5.2.3) sind für die Wassermengenanalyse der Jahre 2011 und 2012 Zähler mit einem Eichdatum ab dem Jahr 2005 relevant. Von insgesamt 11.392 ausgebauten Zählern, die möglicherweise im Betrachtungszeitraum ausgebaut wurden, haben 196 Stück (1,7 %) keine Abnehmer-ID und sind daher nicht zuzuordnen. Diese Tatsache kann bei der Berechnung des aus Zählerablesungen ermittelten Wasserverbrauchs $Q_{AI,0}$ zu einer Unterschätzung der Rohrnetzabgabe führen.

Außerbetriebnahme von Leitungen Wenn eine Rohrleitung oder eine Armatur aus dem Wasserversorgungsnetz ausgebaut oder außer Betrieb genommen wird, verbleibt sie zwar im GIS, doch ihr Status wird durch die Mitarbeiter der Dokumentationsabteilung der SWP entsprechend angepasst. Leitungen und Armaturen, die nicht mehr in Betrieb sind, werden bei der Berechnung der Zonenzugehörigkeit in COSVega nicht berücksichtigt. Dies wirkt sich nachteilig auf verschiedene Funktionen der Wassermengenanalyse aus: Schäden und Reparaturmaßnahmen beziehen ihre Zuordnung zur Bilanzierungszone jeweils über das zugehörige Leitungssegment, Spülungen und Löschwasserentnahmen über einen Hydranten. Wurden das Leitungssegment oder der Hydrant ausgebaut, geht der Wasserverbrauch infolge Schäden, Reparaturen, Spülungen und Löschwasserentnahmen aus der Wasserbilanz verloren. Die Auswirkungen sind gerade bei Schäden kritisch, da insbesondere schadhafte Anschlussleitungen in der Regel nicht repariert, sondern direkt ausgetauscht werden. Kann ein Schaden keiner Bilanzierungszone zugewiesen werden, ist die Analyse von Leckrate und Lecklaufzeit für diesen Schaden nicht möglich (vgl. Abschnitt 5.5.5). Weiterhin wird in COSVega nicht das Datum der Außerbetriebnahme dokumentiert. Somit lassen sich historische Rohrnetzzustände nicht exakt ermitteln, was sich auf die Bildung von Wasserverlust-Kennzahlen auswirkt und die Ermittlung historischer Schadensraten verfälscht.

7.2.1.2 Güte der Eingangsdaten

Vollständigkeit der Mess- und Zählwerte von BWZ Allgemein wurde festgestellt, dass bei den fernwirktechnisch erfassten Mess- und Zählwerten häufig Unterbrechungen in den Messreihen auftauchen. Diese Lücken können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden, zum Beispiel Umbaumaßnahmen, Austausch oder Reparatur der Messgeräte, Ausfall der

Stromversorgung oder der Datenübertragung. Die Länge der Unterbrechungen kann wenige Stunden bis mehrere Monate betragen. Weiterhin wurde festgestellt, dass auch das Auslesen der Daten aus dem Leitsystem ins GIS fehlerbehaftet sein kann. So sind in der Ausspielung der Austauschdatenbank vom 27.02.2014 die Messwerte aller BWZ im Zeitraum vom 14.06. bis 01.07.2011 nicht vorhanden und für den Zeitraum vom 01.07. bis 31.07.2011 gleich Null. Nur in wenigen Fällen ist an den Kennungen der Messwerte erkennbar, dass eine Störung vorlag. Ist dies nicht der Fall, wird der Messwert als Nulldurchfluss interpretiert, was bei längeren Unterbrechungen zu signifikanten Fehlmengen führt, die die Bilanz einer Zone stark verfälschen.

Ein Problem bei den monatlichen manuellen Ablesungen von BWZ sind die Zählerüberläufe, die an insgesamt 56 manuell abgelesenen BWZ in Pforzheim durchschnittlich sechs Mal pro Jahr aufgetreten sind. Da weder das Datum des Überlaufs noch der Zählerhöchststand bekannt sind, ist der Durchfluss eines kompletten Monats unbekannt und kann von der WMA nur durch Interpolation näherungsweise bestimmt werden.

Güte der Mess- und Zählwerte von BWZ Bei den Mess- und Zählwerten sind einige Unregelmäßigkeiten aufgefallen, die ebenfalls die Aussagekraft der berechneten Ergebnisse beeinflussen, wie anhand der folgenden Beispiele verdeutlicht werden soll:

- Statt stündlicher Kubikmeterintervalle wird der Tagesmittelwert als ZW angegeben (z.B. BWZ F-13-02 vom 06.02.2012 bis zum 28.03.2012)
- Das Kubikmeterintervall des ZW erhöht sich plötzlich und dauerhaft um das zehnfache (z.B. BWZ F-24-02 am 14.09.2011)
- Einzelne Ausreißer um das 10- bis 1000-fache der mittleren Messwerte treten auf (z.B. BWZ-01-02 am 23.8.2012 bzw. BWZ F-17-02 am 13.8.2012)

Einige Ausreißer lassen sich eindeutig auf die Übertragungstechnik zurückführen, beispielsweise ein vereinzelt auftretender Zählwert von $16.777.216 \text{ m}^3$ (entspricht 2^{24} , dem Höchstwert eines 24-bit Wandlers). Sehr große Ausreißer können mithilfe von Filtern automatisiert erkannt und beseitigt werden. Die anderen genannten Unregelmäßigkeiten sind dagegen automatisiert nur schwer zu erkennen und führen zu großen Abweichungen in der Wasserbilanz und Problemen bei der Analyse der Nachtmindestverbrauchsganglinie.

Der Vergleich von manuellen Ablesungen und den Messwerten aus dem Leitsystem zeigt, dass die Summe der Zählwerte (ZW) in der Regel gut mit der Summe der monatlichen Ablesungen übereinstimmt. (Dabei ist anzumerken, dass die akkumulierten Zählerstände des Leitsystems nicht mit den realen Zählerständen an den BWZ übereinstimmen, da diese nicht synchronisiert sind.) Die Summe der Messwerte (MW) dagegen weicht in vielen Fällen signifikant von der Summe der Zählwerte desselben BWZ im gleichen Betrachtungszeitraum ab, wie Abbildung 7.1 illustriert. Von 22 untersuchten BWZ, an denen MW, ZW und manuelle Ablesungen vorlagen, liegt die Abweichung der manuellen Ablesungen zu den ZW in ca. 71 % der Fälle unter $\pm 0,5 \%$, bei MW hingegen nur in ca. 14 % der Fälle. Dies lässt sich unter anderem darauf zurückführen, dass die Messwerte für die Übertragung gerastert werden (vgl. Abschnitt 2.6.2): Bei BWZ mit einem großen Messbereich führt die geringe Auflösung älterer D/A-Wandler dazu, dass das Intervall zwischen zwei Übertragungswerten sehr groß wird. Unter Umständen wird auch dann ein positiver Messwert übertragen, wenn eigentlich kein Durchfluss stattfindet. Bei die Analyse werden daher für die Bildung der Wasserbilanz primär ZW verwendet. In manchen Fällen liegen für die Einspeisung in eine Bilanzierungszone teilweise oder ganz nur MW vor, so dass auf diese zurückgegriffen werden muss, was zu Fehlern in der Wasserbilanz führen kann.

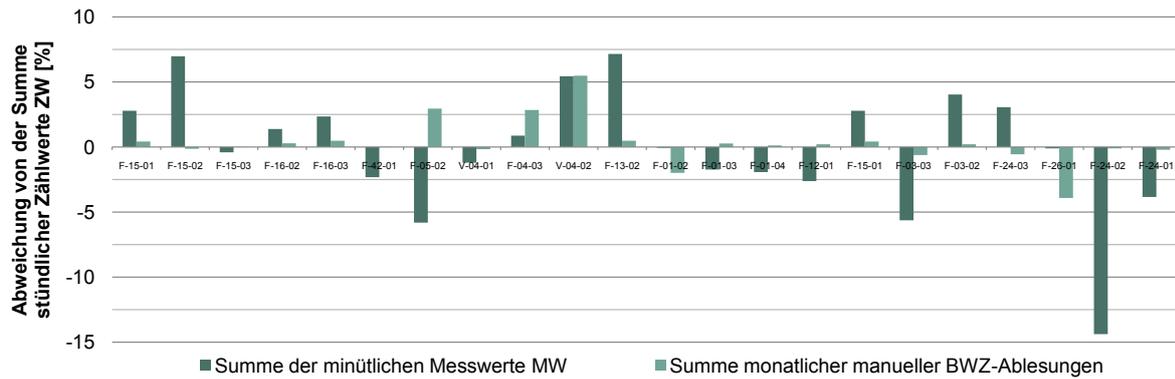


Abbildung 7.1: Abweichung minütlicher Messwerte und monatlicher Ablesungen gegenüber stündlicher Zählwerte

7.2.1.3 Manuelle Vorarbeiten

Vor der Durchführung einer Berechnung mit der *WMA* sind die einzelnen Komponenten des Untersuchungsgebiets durch Einträge in der Tabelle $[t_bwz]$ topologisch korrekt zueinander in Beziehung zu setzen. Dazu sind jedem BWZ über die Felder *von_zone* und *nach_zone* (vgl. Tabelle 5.1) die vorgeschaltete und nachgeschaltete Komponente des Wasserversorgungssystems anzugeben. In der Tabelle $[t_zonen]$ sind alle zu berücksichtigenden Elemente aufzunehmen und ihr Typ (Quelle, Bilanzierungszone etc., vgl. Abbildung 5.4) zu spezifizieren. Der Topologie wird das R&I-Fließschema des Leitsystems zugrundegelegt. Der Aufwand für die Erstellung der Topologie richtet sich nach der Anzahl der vorhandenen Elemente und BWZ des Untersuchungsgebiets.

In COSVega wird bei der Übernahme der Messwerte aus der Leitstelle geprüft, ob die Messreihen vollständig sind (Anzahl der gültigen Messwerte). Weisen die Messreihen eines BWZ im Betrachtungszeitraum große Lücken auf, oder existiert gar kein BWZ zwischen zwei Komponenten des Wasserversorgungssystems, kann der Benutzer in der Tabelle $[t_vwz]$ virtuelle Wasserzähler definieren und in die Topologie einbinden. Aufgrund der in Abschnitt 7.2.1.2 genannten Probleme mit unvollständigen Messreihen musste in den Pilotgebieten mehrfach auf VWZ zurückgegriffen werden.

Weiterhin sind vor der Durchführung von Berechnungen die Standardwerte für Wasserdiebstahl, Schleichverluste, Laufzeiten von Leckagen etc. in Tabelle $[t_benutzerangaben]$ zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Da weder Ergebnisse aus dem hydraulische Modell noch Druckmesswerte aus den Versorgungszonen vorlagen, wurde der mittlere Versorgungsdruck P_m gemäß Gleichung 2.3 manuell berechnet. Der Druck P_i jedes Knotens einer Zone wurde aus der Differenz zwischen mittlerem Behälterfüllstand und der Geländehöhe des Knotens ermittelt, Druckverluste infolge Rohrreibung wurden nicht berücksichtigt.

7.2.1.4 Rechenleistung der WMA

Wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, beträgt die Dateigröße der Austauschdatenbank für das gesamte Wasserversorgungssystem der Stadt Pforzheim ca. 14,32 GB. Die Datenmenge der Mess- und Zählwerte aller 75 fernausgelesenen BWZ beträgt ca. 4,75 GB pro Jahr. Für die bisherigen Testläufe wurde für jedes Pilotgebiet eine separate Austauschdatenbank erzeugt und nicht benötigte Messwerte entfernt, um die Laufzeit der Berechnungen zu verringern. Die Berechnungen wurden mit einem Rechner mit der 64-bit Version des Betriebssystems *Microsoft*

Windows 7 und 12 GB Arbeitsspeicher durchgeführt. Aufgrund des großen Arbeitsspeicherbedarfs der Wassermengenanalyse sind Berechnungen auf Prozessoren mit 32 bit Datenbreite nicht möglich, da hier nur maximal ca. 3 GB des Arbeitsspeichers adressiert werden können. Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die Rechenleistung der WMA, indem aufgezeigt wird wie viel Zeit für die Ausführung eines Bearbeitungsauftrages benötigt wird. Ausschlaggebend für die Rechenzeit ist die Anzahl der BWZ und die zeitliche Auflösung der Messwerte. So werden beispielsweise in Pilotgebiet 2 ca. 10 Minuten für das Einlesen der Messwerte der 15 BWZ benötigt, wobei der verfügbare Arbeitsspeicher voll ausgelastet ist.

Tabelle 7.3: Rechenleistung der WMA für verschiedene Pilotgebiete

| Austauschdatenbank | Anzahl Zonen | Anzahl aktive BWZ | Anzahl VWZ | Dateigröße [GB] | Rechenzeit [min] |
|--------------------|--------------|-------------------|------------|-----------------|------------------|
| Pilotgebiet 1 | 4 | 7 | 2 | 2,5 | ca. 7,5 |
| Pilotgebiet 2 | 6 | 15 | 2 | 4,6 | ca. 21,0 |
| Pilotgebiet 3 | 3 | 12 | 1 | 3,1 | ca. 10,0 |
| Pilotgebiet 4 | 3 | 7 | 0 | 2,2 | ca. 6,0 |

7.2.2 Funktionalität des Moduls WB

7.2.2.1 Ermittlung von Q_N

Einspeisung und Entnahme an BWZ ($Q_{N.1}$ und $Q_{N.3}$) Die Berechnung der Rohrnetzeinspeisung Q_N anhand von BWZ-Daten ($Q_{N.1}$, $Q_{N.3}$, s. Abschnitt 5.5.1) funktioniert gut, solange die Eingangsdaten in der geforderten Qualität und lückenlos vorliegen. Über den Vergleich der Jahressumme der ZW mit dem Ergebnis der manuellen Ablesungen lässt sich aus den Ergebnissen der WMA sehr schnell erkennen, ob ein BWZ im Bilanzierungszeitraum fehlerfrei gearbeitet hat oder nicht. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Summe der minütlichen Messwerte (MW) erheblich von den Zählwerten abweichen kann (s. Abbildung 7.1). MW sollten daher nur dann zur Bildung der Wasserbilanz herangezogen werden, wenn keine anderen Daten zur Verfügung stehen. In Abschnitt 7.2.2.5 wird gezeigt, dass Wasserverluste an Behältern in Pforzheim nur sehr geringe Mengen ausmachen. Der Vergleich der jährlich gemessenen Behältereinspeisung und -entnahme gibt daher Auskunft darüber, wie die Unsicherheit der BWZ-Zählwerte zu bewerten ist. Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse für Hochbehälter in den Pilotgebieten, an denen für alle Einspeisungen und Entnahmen ZW vollständig vorlagen. Die relative Unsicherheit kann demnach bis zu ca. 4,0 % betragen.

Einspeisung und Entnahme an VWZ ($Q_{N.2}$ und $Q_{N.4}$) Um fehlende BWZ und solche mit mangelhaften Messwerten zu ersetzen, wurden in den Pilotgebieten mehrfach VWZ eingesetzt. Ohne die Verwendung der VWZ ließe sich für Zonen zwar die Wasserbilanz über längere Zeiträume bilden, es könnte aber weder die Quantifizierung ungemessener Entnahmen (Spülungen, Löschwasser) noch die Analyse der Lecklaufzeiten und -raten durchgeführt werden. Die Verwendbarkeit von VWZ und die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse hängt von mehreren Faktoren ab: Verfügbarkeit von minütlichen Messwerten (MW), Auflösung der MW, Auflösung der Füllstandsmesswerte am Behälter sowie genaue Kenntnis der Behältergeometrie. Um den Einfluss dieser Faktoren auf die Ergebnisse der VWZ beurteilen zu können, wurden zwei Testrechnungen durchgeführt, bei denen die vorhandenen BWZ F-26-02

Tabelle 7.4: Vergleich der BWZ-Zählwerte für Behältereinspeisung und -entnahme

| Pilot- gebiet | Behälter ID | Jahr | Einspeise-BWZ [m ³] | Entnahme-BWZ [m ³] | rel. Unsicherheit u_A [%] |
|------------------|----------------|------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | HB 24-01 | 2011 | 107.508 | 109.522 | -1,87 |
| | HB 26-01 | 2011 | 94.010 | 107.508 | 2,10 |
| 2 | HB 01-01 | 2012 | 4.738.655 | 4.566.280 | 3,64 |
| | HB 03-01 | 2012 | 199.879 | 204.606 | -2,36 |
| | HB 13-01 | 2012 | 703.665 | 702.828 | 0,12 |
| 3 | HB 15-01 | 2012 | 1.056.633 | 1.073.071 | -1,56 |
| | HB 16-01 | 2012 | 315.015 | 314.447 | 0,18 |

und F-07-01 durch je ein VWZ ersetzt wurden. In den Abbildungen 7.2 bis 7.5 werden berechnete Durchflüsse dieser VWZ den tatsächlichen stündlichen Zählwerten bzw. minutlichen Messwerten der ersetzten BWZ gegenübergestellt.

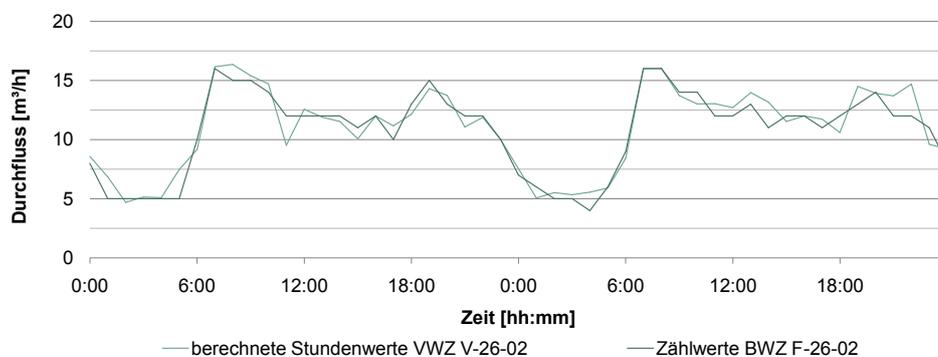


Abbildung 7.2: Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-26-02 mit stündlichen ZW

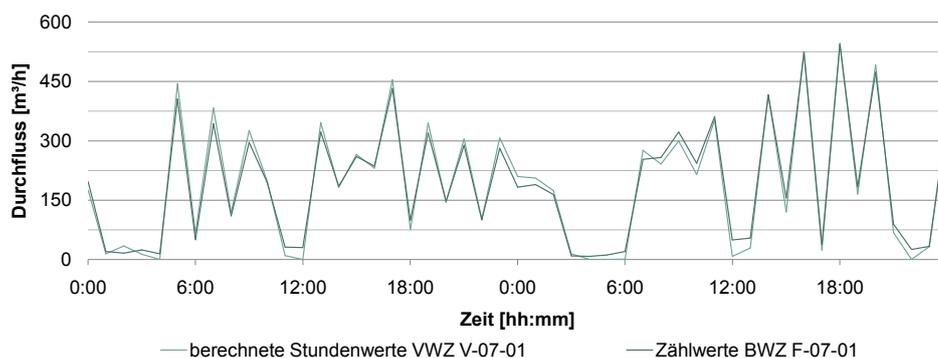


Abbildung 7.3: Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-07-01 mit stündlichen ZW

Bei BWZ F-26-02 handelt es sich um einen Woltmannzähler (Typ WP) DN 80. BWZ F-07-01 ist ein magnetisch-induktives Messgerät DN 400. Da BWZ F-26-02 einen viel kleineren Messbereich abdecken muss (ca. 0 bis 30 m³/h) als BWZ F-07-01 (ca. 0 bis 600 m³/h), ist die Auflösung der übertragenen ZW und MW deutlich feiner. Dies beeinflusst gemeinsam

mit der Auflösung der Füllstandsmesswerte der beiden Behälter deutlich die Güte der berechneten Durchflüsse, wie aus den Abbildungen ersichtlich ist. Die berechneten stündlichen Durchflussmengen geben die tatsächlich gemessenen Werte relativ gut wieder. Bei den minutlichen Durchflüssen dagegen gibt es starke Abweichungen, wie die Abbildungen 7.4 und 7.5 veranschaulichen. Diese lassen sich hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Füllstandsmessgeräte der Behälter leicht zeitversetzt auf Änderungen der Durchflüsse an BWZ reagieren, was zu starken Ausschlägen bei den berechneten Durchflüssen führt.

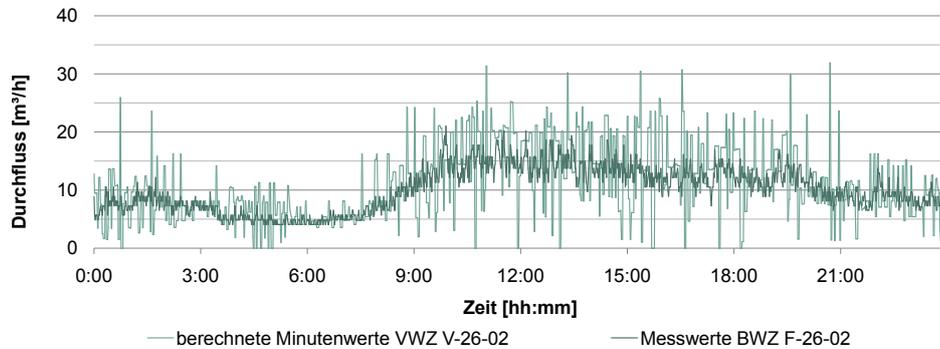


Abbildung 7.4: Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-26-02 mit minutlichen MW

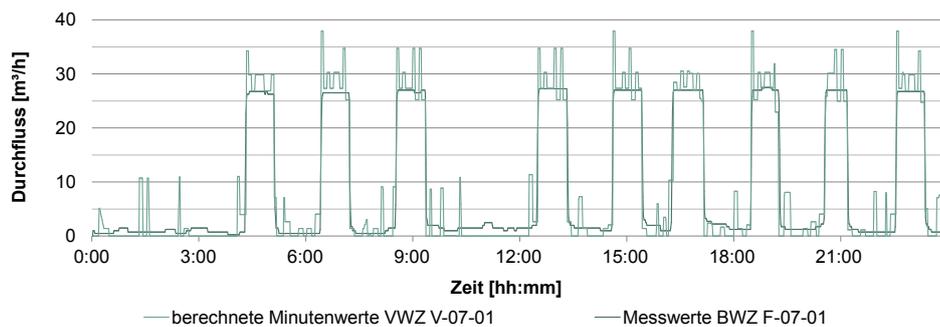


Abbildung 7.5: Vergleich berechneter Durchflüsse an VWZ V-07-01 mit minutlichen MW

In Pforzheim liegt die Auflösung der Füllstandsmesswerte an sieben Speicherbehältern unter $1,0\text{ cm}$. An den übrigen 22 Behältern kann die Auflösung bis zu $7,0\text{ cm}$ betragen. Die Grundfläche der Behälter in Pforzheim (mit Ausnahme von Wassertürmen, Druckunterbrechern und Pumpenvorlagebehältern) beträgt zwischen 100 und 1.000 m^2 . Beträgt die Auflösung der Füllstandsmessung $7,0\text{ cm}$, wird bei einer Wasserspiegeländerung innerhalb einer Minute eine Volumenveränderung um 7 bzw. 70 m^3 berechnet. Daraus resultieren simulierte Durchflüsse von 420 bis $4.200\text{ m}^3/h$, die zu den in Tabelle 7.5 dokumentierten Abweichungen beitragen.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die genaue Kenntnis der Behältergeometrie. In Pforzheim konnte diese für 19 der 29 Behälter exakt aus Bestandsplänen ermittelt werden, darunter drei Behälter mit Gewölben und über die Höhe veränderlicher Grundfläche. Für die übrigen Behälter konnte die Geometrie anhand unvollständiger Informationen nur näherungsweise bestimmt werden.

Tabelle 7.5 verdeutlicht, wie die Auflösung der eingehenden Füllstands- und Durchflussmesswerte die Güte der Ergebnisse eines VWZ beeinflussen. Liegen hoch aufgelöste Werte

vor, ist eine mittlere Abweichung für stündliche Durchflussmengen von unter 4,0 % erreichbar. Auch Tages- und Jahresmengen werden hinreichend genau berechnet. Unter schlechteren Randbedingungen, wie beispielsweise an V-07-01, werden insbesondere die minutlichen Ergebnisse der VWZ mit einer großen Unsicherheit behaftet, was sich direkt auf die Güte der berechneten Löschwasserentnahmen, Spülmengen und Behälterüberläufe auswirkt (s. Abschnitte 7.2.2.3 und 7.2.2.5).

Tabelle 7.5: Einfluss der Eingangsdaten auf die mittlere Abweichung der VWZ-Ergebnisse gegenüber der BWZ-Messwerte

| VWZ | mittlere Abweichung [%] | | | | Auflösung der minütl. Messwerte | |
|---------|-------------------------|---------|-------|-------|---------------------------------|-----------------|
| | /Minute | /Stunde | /Tag | /Jahr | des BWZ [m^3/h] | des HB [cm] |
| V-26-02 | -10,95 | -3,76 | -2,29 | -2,18 | 0,01 | 0,24 |
| V-07-01 | 41,26 | 14,15 | 4,03 | 4,02 | 5,00 | 5,00 |

Testrechnungen zeigen, dass VWZ idealerweise in Kombination mit einem Elektroschieber oder einer Pumpe eingesetzt werden, deren Betriebszustand (auf/zu bzw. an/aus) aus dem Leitsystem bekannt ist. Auf diese Weise wird erkannt, wann kein Durchfluss durch den VWZ stattfindet. Dies verhindert, dass am VWZ Durchflüsse berechnet werden, wenn die Volumenänderung infolge von Füllstandszu- oder abnahme nicht exakt mit der Einspeisung bzw. Entnahme am BWZ übereinstimmt. In den Behältern der SWP wird der Zulauf aber durch Schwimmerschieber geregelt, deren Betriebszustand nicht an das Leitsystem übertragen wird.

7.2.2.2 Ermittlung von Q_{AI}

Abgerechneter Wasserverbrauch ($Q_{AI,1}$) Die Ermittlung des abgerechneten Wasserverbrauchs $Q_{AI,1}$ erfolgt anhand der Daten aus der Verbrauchsabrechnungssoftware. Wie in Abschnitt 7.2.1.1 beschrieben wird, können 99,9 % der Abnehmer in Pforzheim einer Bilanzierungszone zugewiesen werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die berechneten Werte für $Q_{AI,1}$ in der Wasserbilanz vollständig sind. In fünf Zonen (Zonen 5, 8, 15, 28 und 32) ergab die Wassermengenanalyse einen Wasserverbrauch Q_{AI} , der über der jeweiligen Rohrnetzeinspeisung Q_N der Zone lag. In zwei Zonen ließ sich dies darauf zurückführen, dass einzelnen Abnehmern in der Verbrauchsabrechnung ein zu hoher Wasserverbrauch zugewiesen wurde:

- Zone 8: Abnehmer 439696771, Wasserverbrauch $105 m^3$ in 2011, $60.423 m^3$ in 2012
- Zone 32: Abnehmer 439702105, Wasserverbrauch $161 m^3$ in 2011, $98.902 m^3$ in 2012

Die identifizierten Abnehmer wurden manuell aus der Austauschdatenbank entfernt. In den anderen betroffenen Zonen wurden im Vergleich zum Vorjahr keine überhöhten Verbräuche festgestellt. Eine visuelle Überprüfung der Einspeiseganglinie wurde durchgeführt, um mögliche andere Ursachen zu identifizieren:

- Zone 5: Es wurden keine Auffälligkeiten an der Einspeiseganglinie festgestellt. Bei dem BWZ, mit dem die Einspeisung erfasst wird, handelt es sich um einen Woltmannzähler aus dem Jahr 1992. Möglicherweise führt Verschleiß an diesem BWZ zu Unterregistrierung der Durchflussmenge.

- Zone 15: Abnehmer 439718541 hat deutlich erhöhten Wasserverbrauch von 6.406 m^3 in 2012 (gegenüber 70 m^3 in 2011). Dies kann aber nicht die einzige Ursache sein, da die Differenz zwischen Q_{AI} und Q_N über 10.000 m^3 beträgt. Es wurden keine weiteren Auffälligkeiten an der Einspeiseganglinie und in den Abrechnungsdaten festgestellt.
- Zone 28: Zwischen dem 21.05.2012 und dem 31.05.2012 sank die Einspeisung deutlich ab. Möglicherweise war in diesem Zeitraum ein Zonentrennschieber geöffnet und die Versorgung fand teilweise aus einer Nachbarzone statt. Die Einspeisung wird von zwei alten Woltmann-Verbundzählern (Baujahr 1996) gemessen, so dass Zählerabweichungen auch in diesem Fall eine weitere mögliche Ursache darstellen.

Aus den vorliegenden Daten sind die beschriebenen Abweichungen nicht abschließend zu klären. In den Zonen 5, 15 und 28 ergibt die Wassermengenanalyse daher negative Werte für die realen Wasserverluste (s. Abschnitt 7.3.1.2). Verallgemeinernd lässt sich sagen, dass die beschriebenen fehlerhaften Abrechnungsdaten signifikanten Einfluss auf die ermittelten Wasserverluste haben. Sie sollten daher immer einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden. Um die fehlerhafte Zuordnung von Abnehmern zu Versorgungszonen zu verhindern, sollte die Abstimmung des GIS auf die Abrechnungssoftware überprüft werden.

Abgerechneter Wasserverbrauch von Pauschalkunden ($Q_{AI.2}$) Pauschalkunden gibt es in Pforzheim nicht, so dass $Q_{AI.2}$ in der Wassermengenanalyse unberücksichtigt blieb.

7.2.2.3 Ermittlung von Q_{AN}

Eigenbedarf des WVU in Wasserwerken und Behältern ($Q_{AN.1}$) Die Dokumentation des Wasserverbrauchs in Wasserwerken und zur Behälterreinigung ist derzeit noch nicht an COSVega angebunden, so dass keine Daten in der Tabelle $[t_wvu_bedarf_ww]$ (s. Abschnitt 5.5.3) der Austauschdatenbank zur Verfügung stehen.

Eigenbedarf des WVU für Leitungsspülungen ($Q_{AN.2}$) Tabelle 7.6 zeigt, dass die in der WMA implementierte automatisierte Identifizierung und Quantifizierung von Spülmengen insgesamt ca. 40 % der Spülmaßnahmen erfolgreich identifiziert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen in Tabelle 7.6 zeigen auch, dass die durchschnittliche Wasserentnahme pro Spülung zwischen $0,7$ und $4,7 \text{ m}^3$ liegt. Höhere mittlere Entnahmemengen ergaben sich in Zone 8+65 (in 2012), in Zone 13, in Zone 7+64 sowie in Zone 61. Die Überprüfung der Ergebnisse zeigten, dass die erhöhte mittlere Entnahme in Zone 8+65 durch eine Spülmaßnahme mit paralleler Wasserentnahme an drei Hydranten entstanden ist, bei der insgesamt etwa 90 m^3 entnommen wurden, was von der WMA korrekt erfasst wurde.

In Zone 13 zeigte sich dagegen, dass die automatisierte Quantifizierung der Spülmengen in großen Versorgungszonen mit über 1.000 Abnehmern und mehreren Einspeise- bzw. Entnahmepunkten keine zuverlässigen Ergebnisse mehr liefert. In Zone 13 wurden 79,2 % der Spülungen identifiziert. Die Überprüfung der einzelnen Spülereignisse zeigte jedoch, dass dies auf viele falsch positive Ergebnisse zurückzuführen ist, die durch die hohe Streuung der minutlichen Messwerte hervorgerufen werden. Abbildung 7.6 illustriert, dass in der relativ kleinen Zone 6 mit 751 Abnehmern die mittlere absolute Abweichung der Messwerte vom 10-Minuten-Mittelwert bei $1,13 \text{ m}^3/h$ liegt. In Zone 13 dagegen (1.544 Abnehmer) erzeugt die Streuung des Einspeise-BWZ eine mittlere absolute Abweichung von $4,46 \text{ m}^3/h$ bzw. von $6,17 \text{ m}^3/h$ in der Zeit von 7:00 bis 18:00 Uhr, in der die meisten Spülungen stattfinden. Starke

Tabelle 7.6: Ermittelte Spülmengen in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | Jahr | Messung Q_N | Anzahl Spülungen | | | Mittlere Spül- menge [m^3] |
|------------------|------|------|---|------------------|---------|------|-----------------------------------|
| | | | | gesamt | erkannt | [%] | |
| 1 | 8+65 | 2011 | BWZ | 37 | 21 | 56,8 | 4,7 |
| | 16 | 2011 | VWZ | 24 | 4 | 16,7 | 1,5 |
| | 31 | 2011 | VWZ | 62 | 0 | 0,0 | - |
| | 32 | 2011 | BWZ | 28 | 4 | 14,3 | 0,7 |
| 1 | 8+65 | 2012 | BWZ | 26 | 9 | 34,6 | 12,4 |
| | 16 | 2012 | VWZ | 13 | 5 | 38,4 | 3,0 |
| | 31 | 2012 | VWZ | 29 | 0 | 0,0 | - |
| | 32 | 2012 | BWZ | 16 | 8 | 50,0 | 1,1 |
| 2 | 5 | 2012 | BWZ | 91 | 70 | 76,9 | 2,6 |
| | 6 | 2012 | BWZ | 73 | 29 | 39,7 | 3,1 |
| | 13 | 2012 | BWZ/VWZ | 355 | 281 | 79,2 | 10,6 |
| | 14 | 2012 | BWZ (keine bzw. unvollständige Messwerte) | | | | - |
| | 18 | 2012 | BWZ (keine bzw. unvollständige Messwerte) | | | | - |
| | 60 | 2012 | BWZ (keine bzw. unvollständige Messwerte) | | | | - |
| 3 | 7+64 | 2012 | BWZ | 502 | 373 | 74,3 | 28,2 |
| | 15 | 2012 | BWZ | 73 | 29 | 39,7 | 2,0 |
| | 19 | 2012 | BWZ (keine bzw. unvollständige Messwerte) | | | | - |
| 4 | 28 | 2012 | BWZ | 16 | 4 | 25,0 | 2,75 |
| | 58 | 2012 | BWZ | 43 | 31 | 72,1 | 1,24 |
| | 61 | 2012 | BWZ | 21 | 9 | 42,9 | 11,0 |

positive Abweichungen werden von der WMA fälschlich als Spülung interpretiert und führen zu einer Überschätzung der Spülwasserentnahmen.

Weitere Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Spülmengen entstehen durch die fehlende Synchronisation der Uhrzeit zwischen Leitstelle und Auftragsmanagementsystem. Die Analyse der Einspeiseganglinie muss daher über einen längeren Zeitraum erfolgen als in Tabelle [t_wvu_bedarf_netze] angegeben. Dadurch steigt das Risiko, neben der Spülmenge fälschlicherweise auch andere Mengen zu erfassen. Insbesondere Druckunterbrechertanks, die Wasser an eine tiefer liegende Zone abgeben, zeigen eine ähnliche Durchflusscharakteristik wie Leitungsspülungen und können die ermittelten Spülmengen verfälschen. Dies zeigt sich in Zone 7+64, in der Wasser aus der höher gelegenen Zone 7 über den Druckunterbrechertank DU Hanfacker an Zone 64 abgegeben werden. Sowohl der Anteil identifizierter Spülungen als auch die mittlere Spülwasserentnahme sind hier deutlich erhöht (s. Tabelle 7.6).

Im übrigen legen die Ergebnisse nahe, dass die durchschnittliche Wasserentnahme bei einer Spülung nur etwa halb so hoch ist wie bei den SWP bisher angenommen. Die SWP gehen von einer durchschnittlichen Entnahme von $5,0 m^3/h$ aus. Das gewichtete Mittel der gültigen Ergebnisse liegt dagegen bei $2,6 m^3$ pro Spülung. Da kleinere Spülmengen, z.B. an Hydranten mit ungünstigen Druckverhältnissen, bei der automatisierten Wassermengenanalyse nicht identifiziert werden ist anzunehmen, dass der tatsächliche Mittelwert sogar noch geringer ist.

7 Ergebnisse und Diskussion

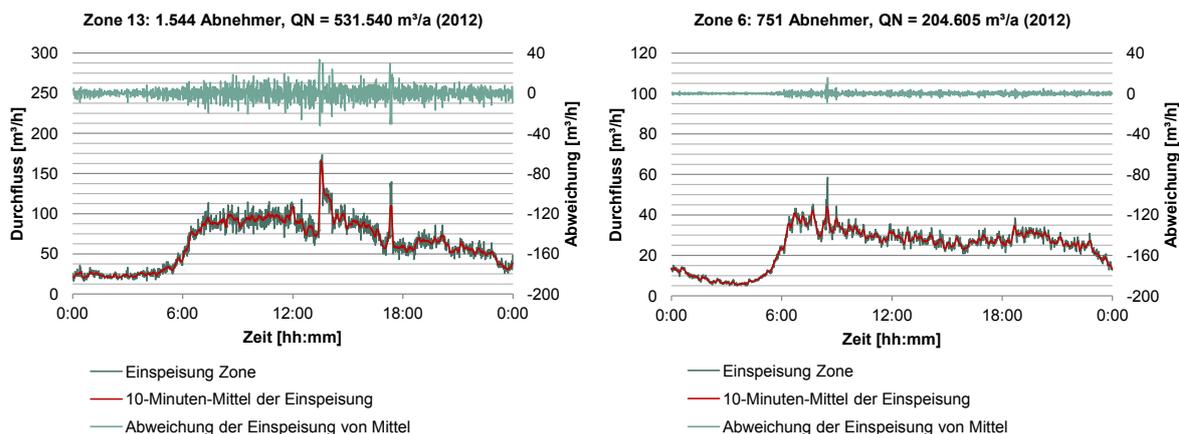


Abbildung 7.6: Streuung minutlicher Messwerte in Zone 13 (links) und Zone 6 (rechts)

Eigenbedarf des WVU für Arbeiten im Rohrnetz ($Q_{AN.3}$) Wie in Abschnitt 7.2.1.1 beschrieben, können anhand der Informationen aus dem Auftragszentrum nur ca. ein Drittel der Haupt- und Versorgungsleitungen im GIS identifiziert werden, an denen Rohrleitungsarbeiten durchgeführt wurden, während die Trefferquote an Anschlussleitungen bei ca. 95 % liegt. Die Ergebnisse der Wasserbilanzen in den Pilotgebieten zeigen, dass $Q_{AN.3}$ pro Zone weniger als 10 m^3 beträgt. Für das gesamte Versorgungsgebiet beträgt $Q_{AN.3}$ nur ca. 26 (in 2011) bzw. 67 m^3 (in 2012) und damit unter 0,001 % der Rohrnetzabgabe Q_A (vgl. Tabelle 6.4). Auch bei einer höheren Trefferquote für Arbeiten an Haupt- und Versorgungsleitungen ist kein signifikanter Anstieg zu erwarten. Der Anteil von $Q_{AN.3}$ ist um ein Vielfaches kleiner als die Unsicherheit der Rohrnetzeinspeisung. Allgemein lässt sich daher feststellen, dass Rohrleitungsarbeiten als Wasserbilanzkomponente vernachlässigt werden können.

Löschwassermenge ($Q_{AN.4}$) Zwischen 2009 und 2012 gab es nach Angaben der Feuerwehr Pforzheim pro Jahr durchschnittlich ca. 15 Mittel- und Großbrände im Stadtgebiet Pforzheims. Aus der übermittelten Einsatzdokumentation sind für jeden Brandeinsatz der Straßename und die Hausnummer bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der wahrscheinliche Entnahmehydrant anhand der Adresse manuell ermittelt. Um zukünftig den Bearbeitungsaufwand zu reduzieren, sollte COSVega um eine Funktion erweitert werden, die entweder den Entnahmehydranten über eine Umkreissuche um die Adresse des Brandeinsatzes ermittelt oder den Brand anhand der Adresse direkt einer Bilanzierungszone zuweist. In manchen Fällen entnimmt die Feuerwehr das Löschwasser aus Löschteichen oder nahe gelegenen Oberflächengewässern. Hierüber gibt die Einsatzdokumentation keinen Aufschluss, so dass dies eine mögliche Fehlerquelle darstellt. Weiterhin sind Übungen, die laut Korkmazer (2013) einen beträchtlichen Teil der Wasserentnahmen darstellen können, im Fall der Feuerwehr Pforzheim nicht dokumentiert. Tabelle 7.7 gibt einen Überblick über die ermittelten Löschwassermengen in den Pilotgebieten.

Aus den Ergebnissen der automatisierten Ermittlung von Löschwassermengen in den Pilotgebieten lassen sich mehrere Schlüsse ziehen: Generell lassen sich Löschwassermengen mit der in Abschnitt 5.5.3 vorgestellten Methode automatisiert ermitteln. Voraussetzung ist, dass sämtliche Einspeisungen und Entnahmen in die untersuchte Zone in Minutenintervallen vorliegen. Für die Quantifizierung von Großbränden können stündliche Messwerte ausreichen (z.B. Zone 7+64). In großen Zonen (z.B. Zone 60) ist die Löschwassermenge von Mittel-

Tabelle 7.7: Ermittelte Löschwasserentnahmen in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | Datum | Ereignis | Messung Q_N | Entnahme $[m^3]$ |
|------------------|-------------------------|------------|-------------|---|---------------------|
| 1 | 8+65 | 19.10.2011 | Großbrand | BWZ (MW) | 92,3 |
| | 8+65 | 28.01.2012 | Großbrand | BWZ (MW) | 16,6 |
| | 31 | 07.12.2012 | Mittelbrand | VWZ | 1,2 |
| | 32 | 15.12.2012 | Mittelbrand | BWZ (MW) | 2,0 |
| 2 | 60 | 29.01.2012 | Mittelbrand | BWZ (MW) | nicht erkannt |
| | 14 | 10.08.2012 | Mittelbrand | BWZ (keine bzw. unvollständige Messwerte) | |
| | 60 | 14.08.2012 | Mittelbrand | BWZ (MW) | nicht erkannt |
| | 60 | 04.10.2012 | Mittelbrand | BWZ (MW) | nicht erkannt |
| | 60 | 04.10.2012 | Mittelbrand | BWZ (MW) | nicht erkannt |
| | 14 | 16.12.2012 | Mittelbrand | BWZ (keine bzw. unvollständige Messwerte) | |
| 3 | 7+64 | 09.04.2012 | Großbrand | BWZ (ZW) | 155,0 |
| | 7+64 | 09.04.2012 | Mittelbrand | BWZ (ZW) | nicht erkannt |
| | 7+64 | 20.08.2012 | Mittelbrand | BWZ (ZW) | 67,4 |
| 4 | (keine Brände gemeldet) | | | | |

bränden im Verhältnis zur Schwankung der Rohrnetzeinspeisung mitunter so klein, dass von der WMA kein Ergebnis ermittelt wird. Die Spannweite der Löschwasserentnahme bei Großbränden reicht in den untersuchten Fällen von 11,3 bis 97,6 m^3 . Bei Mittelbränden wurden zwischen 1,2 und 12,9 m^3 entnommen. Im Verhältnis zur Rohrnetzabgabe Q_A beträgt die Löschwasserentnahme $Q_{AN,4}$ nur maximal 0,14 % (Zone 8+65).

Die Anzahl der analysierten Brände im Untersuchungszeitraum ist zu gering, um daraus allgemeine Schlüsse über die Höhe der Löschwasserentnahmen abzuleiten. Die untersuchten Brände lassen aber vermuten, dass die Wasserentnahmen zur Brandbekämpfung nur einen minimalen Anteil der Rohrnetzabgabe ausmachen. In Anbetracht der Unsicherheit der Ergebnisse kann die Ermittlung der Löschwasserentnahmen daher bei der Berechnung der Wasserverluste vernachlässigt werden. Ausnahmen sind Großbrände in Industrieunternehmen, in denen die Löschwassermenge laut Bockwoldt (1987) häufig mehrere tausend Kubikmeter betragen kann (s. Abschnitt 5.5.3).

7.2.2.4 Ermittlung von Q_{VS}

Abgrenzungsverluste ($Q_{VS,1}$) Für die Quantifizierung der Abgrenzungsverluste, die in einer Zone im Bilanzierungszeitraum entstanden sind, wird der abgerechnete Wasserverbrauch $Q_{AI,1}$ von dem aus Zählerablesungen berechneten Wasserverbrauch $Q_{AI,0}$ subtrahiert. Die Wassermengenanalyse der Pilotgebiete ergab, dass $Q_{AI,1}$ und $Q_{AI,0}$ in vielen Zonen signifikant voneinander abweichen, wie Tabelle 7.8 zeigt. Da $Q_{AI,0}$ auf zwei verschiedene Arten berechnet wird (zeitabhängig und proportional zur Einspeisemenge, vgl. Abschnitt 5.5.2) und die Ergebnisse beider Rechenwege nur minimal voneinander abweichen, ist es wahrscheinlich, dass der abgerechnete Wert buchhalterisch richtig ist, aber nicht der tatsächlich im Betrachtungszeitraum verbrauchten Wassermenge entspricht.

Die Wassermengenanalyse der Pilotgebiete ergab, dass in fünf der 20 untersuchten Zonen

Tabelle 7.8: Ermittelte Abgrenzungsverluste in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | Jahr | Wasserverbrauch | | Abgrenzungs- verluste $Q_{VS.1}$ [m^3] | Abweichung [%] |
|------------------|------|------|---------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------|
| | | | aus KWZ $Q_{AI.0}$ [m^3] | abgerechnet $Q_{AI.1}$ [m^3] | | |
| 1 | 8+65 | 2011 | 69.420,1 | 70.527,0 | -1.106,9 | -1,6 |
| | 16 | 2011 | 44.214,1 | 44.096,0 | 118,1 | 0,3 |
| | 31 | 2011 | 126.345,3 | 130.803,0 | -4.457,7 | -3,4 |
| | 32 | 2011 | 54.260,4 | 53.706,0 | 554,4 | 1,0 |
| 1 | 8+65 | 2012 | 71.202,4 | 71.290,0 | -87,6 | -0,1 |
| | 16 | 2012 | 47.264,6 | 46.165,0 | 1.099,6 | 2,4 |
| | 31 | 2012 | 132.752,3 | 134.931,0 | -2.178,7 | -1,6 |
| | 32 | 2012 | 54.646,1 | 56.254,0 | -1.607,9 | -2,9 |
| 2 | 5 | 2012 | 181.174,2 | 185.148,0 | -3.973,8 | -2,1 |
| | 6 | 2012 | 177.495,3 | 178.572,0 | -1.076,7 | -0,6 |
| | 13 | 2012 | 478.038,8 | 501.980,0 | -23.941,2 | -4,8 |
| | 14 | 2012 | 358.288,6 | 356.849,0 | 1.439,6 | 0,4 |
| | 18 | 2012 | 335.165,3 | 348.958,0 | -13.792,7 | -4,0 |
| | 60 | 2012 | 1.150.042,9 | 1.189.343,0 | -39.300,1 | -3,3 |
| 3 | 7+64 | 2012 | 857.818,1 | 825.409,0 | 32.409,1 | 3,9 |
| | 15 | 2012 | 59.004,6 | 62.760,0 | -3.755,4 | -6,0 |
| | 19 | 2012 | 97.075,7 | 94.702,0 | 2.373,7 | 2,5 |
| 4 | 28 | 2012 | 49.071,8 | 50.655,0 | -1.583,2 | -3,1 |
| | 58 | 2012 | 158.628,6 | 164.977,0 | -6.348,4 | -3,8 |
| | 61 | 2012 | 33.426,3 | 35.910,0 | -2.483,7 | -6,9 |

$Q_{AI.1}$ um weniger als $\pm 1,0$ % von $Q_{AI.0}$ abweicht und somit eine gute Übereinstimmung erreicht wird (s. Tabelle 7.8). In zwölf Zonen betrug die Abweichung von $Q_{AI.1}$ zu $Q_{AI.0}$ weniger als $\pm 4,0$ % und befindet sich damit noch im von Osmancevic (2010) genannten Bereich (s. Abschnitt 3.4.2). In drei Zonen (Zonen 13, 15 und 61) liegt die Abweichung zwischen $\pm 4,0$ % und $\pm 7,0$ % und damit in einer Größenordnung, die z.B. von Renaud u. a. (2009) auch bei französischen WVU beobachtet wurde (s. Abschnitt 3.4.5). Anhand der vorliegenden Daten lässt sich nicht feststellen, inwieweit die festgestellten Abweichungen zwischen $Q_{AI.1}$ und $Q_{AI.0}$ tatsächlich Abgrenzungsverluste sind bzw. welcher Anteil davon auf Datenhandhabungsfehler in der Verbrauchsabrechnung zurückzuführen ist.

Zählerabweichungen an Kundenwasserzählern ($Q_{VS.2}$) Anhand des in Abschnitt 5.5.4 vorgestellten Ansatzes wird ein Näherungswert der Zählerabweichungen $Q_{VS.2}$ an KWZ gebildet. In der Austauschdatenbank sind für ca. 80 % der KWZ vollständige Informationen zu Messbereich und Fehlerkurve abgelegt. Der Vergleich der berechneten mittleren Durchflussmenge der KWZ mit den zugehörigen Fehlerkurven ergibt, dass je nach Zone zwischen 43 bis 86 % der KWZ in den Pilotzonen hauptsächlich im unteren Messbereich (zwischen Q_1 und Q_2) arbeiten. Da im unteren Messbereich in der Regel ein positiver Messfehler entsteht (vgl. Abbildung 2.5), ist die Summe der positiven Zählerabweichungen in allen Zonen höher als die Summe der negativen Zählerabweichungen. Das Ergebnis für $Q_{VS.2}$ aus der

Wassermengenanalyse der Pilotgebiete weicht in allen Zonen nur geringfügig voneinander ab und beträgt zwischen 0,3 und 0,8 % des aus Zählerablesungen berechneten Wasserverbrauchs $Q_{AI,0}$. Ob der verwendete Ansatz gültig ist und wie verlässlich die Ergebnisse sind, sollte Ziel weitergehender Untersuchungen sein. In diesem Zusammenhang wird auf eine neue Studie von Arregui u. a. (2014) verwiesen, die Zusammenhänge zwischen Alter, akkumulierter Durchflussmenge und der Messabweichung von Kundenwasserzählern aufzeigt.

Zählerabweichungen an Betriebswasserzählern ($Q_{VS,3}$) Die automatisierte Analyse der minutlichen Messwerte an Betriebswasserzählern soll Hinweise auf die Höhe der Zählerabweichungen geben (s. Abschnitt 5.5.4). Tabelle 7.9 zeigt die Ergebnisse aus den Pilotgebieten. Für 17 von insgesamt 40 BWZ in den vier Pilotgebieten ist in der Austauschdatenbank der Messbereich hinterlegt, die für die Analyse des Durchflussspektrums benötigt wird. Allerdings ist nur für 15 BWZ die Fehlerkurve bekannt, ohne die die Quantifizierung der Zählerabweichung nicht möglich ist.

Tabelle 7.9: Ermittelte Zählerabweichungen an BWZ in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012)

| Pilot- gebiet | BWZ ID | Jahr | Anteil der Messwerte [%] | | | Zählerabweichung | |
|------------------|-----------|------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------|
| | | | gleich 0 | Q_0 bis Q_2 | Q_2 bis Q_4 | $[m^3]$ | [%] |
| 1 | F-24-01 | 2011 | 54,6 | 0,0 | 45,4 | 1.238 | 1,2 |
| | F-24-02 | 2011 | 5,0 | 13,0 | 82,0 | 915 | 1,4 |
| | F-24-03 | 2011 | 72,4 | 0,0 | 27,6 | 654 | 1,4 |
| | F-26-01 | 2011 | 27,6 | 0,0 | 72,3 | 816 | 0,9 |
| | F-26-02 | 2011 | 2,3 | 0,0 | 97,7 | 1.323 | 1,4 |
| | F-45-01 | 2011 | 51,0 | 0,3 | 48,6 | 798 | 0,5 |
| 1 | F-24-01 | 2012 | 51,8 | 0,0 | 48,2 | 1.293 | 1,1 |
| | F-24-02 | 2012 | 7,7 | 12,8 | 79,5 | 932 | 1,4 |
| | F-24-03 | 2012 | 73,4 | 0,0 | 26,6 | 703 | 1,4 |
| | F-26-01 | 2012 | 28,8 | 0,0 | 71,0 | 824 | 0,9 |
| | F-26-02 | 2012 | 4,6 | 0,0 | 95,4 | 1.345 | 1,4 |
| | F-45-01 | 2012 | 51,1 | 0,2 | 48,6 | 777 | 0,5 |
| 2 | F-13-01 | 2012 | 66,0 | 0,7 | 33,3 | 1.912 | 0,3 |
| | F-01-02 | 2012 | 2,3 | 3,3 | 94,4 | -3.553 | -0,1 |
| | F-12-01 | 2012 | 8,4 | 25,0 | 66,6 | 2.304 | 1,3 |
| | F-16-01 | 2012 | 29,2 | 53,2 | 17,5 | Fehlerkurve unbekannt | |
| | F-03-03 | 2012 | 0,4 | 49,9 | 49,7 | 1.149 | 1,1 |
| | F-03-02 | 2012 | 0,2 | 83,2 | 16,6 | 1.341 | 1,3 |
| 3 | F-16-02 | 2012 | 3,8 | 96,1 | 0,0 | Fehlerkurve unbekannt | |
| | F-16-03 | 2012 | 29,0 | 33,0 | 38,0 | 2.107 | 0,8 |
| | F-16-01 | 2012 | 29,2 | 53,2 | 17,5 | Fehlerkurve unbekannt | |
| 4 | F-05-02 | 2012 | 27,8 | 22,2 | 50,0 | 1.423 | 1,2 |
| | F-04-02 | 2012 | 28,6 | 71,4 | 0,0 | 467 | 1,2 |
| | F-04-01 | 2012 | 66,6 | 33,4 | 0,0 | Fehlerkurve unbekannt | |

Aus Tabelle 7.9 ist ersichtlich, dass der Großteil der auswertbaren BWZ hauptsächlich im

oberen Messbereich, d.h. zwischen Q_2 und Q_4 misst. Bei fünf Messgeräten überwiegen allerdings Messwerte aus dem unteren Messbereich (F-03-02, F-03-03, F-16-01, F-16-02, V-04-01 und V-04-02). Diese Geräte sind möglicherweise überdimensioniert. Die Zählerabweichung liegt im Bereich von $-0,1$ bis $1,4$ % der registrierten Durchflussmenge. Nur in einem Fall kommt es zu einer negativen Zählerabweichung. Die in Abschnitt 7.2.2.1 festgestellten Abweichungen der BWZ werden unterschritten (vgl. Tabelle 7.4), vermutlich weil Alterung und Verschleiß eine signifikante Rolle spielen und in der WMA bisher unberücksichtigt bleiben.

Schleichverluste ($Q_{VS.4}$) und Wasserdiebstahl ($Q_{VS.5}$) Die Höhe der Schleichverluste und des Wasserdiebstahls wird automatisiert für jede Zone anhand von Standardwerten ermittelt.

Tabelle 7.10: Ermittelter Behälterüberlauf $Q_{VR.1}$ in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012)

| Pilot- gebiet | Behälter ID | Jahr | Dauer [hh:mm] | Entnahme [m ³] | Messwerte zur Bestimmung von $Q_{VR.1}$ |
|------------------|----------------|------|------------------|-------------------------------|--|
| 1 | HB 23-01 | 2011 | - | - | keine Meldung zu Überlauf |
| | HB 24-01 | 2011 | 00:01 | 0,2 | BWZ (minütlich) |
| | HB 25-01 | 2011 | 00:05 | 0,6 | BWZ (minütlich) + VWZ |
| | HB 26-01 | 2011 | 00:04 | 0,8 | BWZ (minütlich) |
| 1 | HB 23-01 | 2012 | - | - | keine Meldung zu Überlauf |
| | HB 24-01 | 2012 | 00:00 | 0,0 | BWZ (minütlich) |
| | HB 25-01 | 2012 | 00:19 | 1,6 | BWZ (minütlich) + VWZ |
| | HB 26-01 | 2012 | 17:31 | 58,3 | BWZ (minütlich) |
| 2 | HB 01-01 | 2012 | 00:19 | 0,0 | BWZ (minütlich) |
| | HB 03-01 | 2012 | 00:04 | - | BWZ (stündlich) |
| | HB 12-01 | 2012 | 00:00 | 0,0 | BWZ (minütlich) + VWZ |
| | HB 13-01 | 2012 | 00:00 | 0,0 | BWZ (minütlich) |
| | HB 18-01 | 2012 | 00:00 | 0,0 | BWZ (minütlich) + VWZ |
| 3 | HB 15-01 | 2012 | 00:00 | 0,0 | BWZ (minütlich) |
| | HB 16-01 | 2012 | 00:00 | 0,0 | BWZ (minütlich) |
| | HB 17-01 | 2012 | 04:29 | - | BWZ (stündlich) |
| 4 | HB 04-01 | 2012 | 00:27 | 5,0 | BWZ (minütlich) |

7.2.2.5 Ermittlung von Q_{VR}

Überlauf an Hochbehältern ($Q_{VR.1}$) Tabelle 7.10 zeigt die Ergebnisse der WMA für Behälterüberlauf in den Pilotgebieten. Es ist ersichtlich, dass an fünf der dreizehn untersuchten Behälter kein Überlauf gemeldet wurde. Einer der Behälter (HB 23-01) verfügt nicht über die Funktion, Überlauf an das Leitsystem zu melden. An zwei Behältern (HB 03-01 und HB-17-01) lässt sich der Überlauf nicht quantifizieren, da Einspeisung und Entnahme nur stündlich vorliegen. An den übrigen Behältern liegt die Dauer eines Überlaufereignisses meist im Bereich weniger Minuten und die resultierenden Verluste unter zwei Kubikmetern. Allerdings kommt es an zwei Behältern zu Überlauf über mehrere Stunden hinweg (HB 17-01 und HB 26-01). An HB-01-01 sind im Zeitraum des Überlaufs die Entnahmen größer als die eingespeiste Wassermenge, so dass der resultierende Verlust gleich Null gesetzt wird. Die

Ursache ist in der Messungenauigkeit der BWZ zu suchen (vgl. Tabelle 7.4). Die ermittelte durchschnittliche Leckrate während eines Überlaufes beträgt zwischen $3,0$ und $12,0 \text{ m}^3/h$.

Bezieht man die obigen Ergebnisse auf das gesamte Wasserversorgungssystem Pforzheims, ergibt sich folgendes Bild: Die Auswertung von Alarmmeldungen aus dem Leitsystem ergab, dass im Versorgungsgebiet von Pforzheim in 2011 insgesamt 93 Überlaufereignisse mit einer Gesamtlaufzeit von 34,3 Stunden stattfanden. In 2012 summierten sich 62 Überlaufereignisse zu insgesamt 117,4 Stunden Laufzeit auf. Ausgehend von einer mittleren Leckrate von $12,0 \text{ m}^3/h$ ergeben sich somit für die Gesamtbilanz des Wasserversorgungssystems maximal zwischen ca. 400 m^3 Verluste in 2011 und 1.400 m^3 Verluste in 2012. Der Anteil der Verluste aus Überlauf liegt damit deutlich unter $0,5 \%$ der realen Wasserverluste (vgl. Tabelle 6.4). Es lässt sich verallgemeinernd feststellen, dass Verluste aus Überlauf an Behältern in Systemen mit zuverlässig arbeitenden Leitsystemen praktisch vernachlässigbar sind, da die Alarmmeldung die Abschaltung einer Pumpe oder das Öffnen bzw. Schließen eines Schiebers auslöst.

Tabelle 7.11: Ermittelte Leckverluste $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ in den Pilotgebieten (in 2011 & 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | Jahr | Schäden an HW/VW | | | Schäden an AW | | |
|------------------|------|------|------------------|---------|--------------------------------|---------------|---------|--------------------------------|
| | | | gesamt | erkannt | $Q_{VR.3}$ [m^3] | gesamt | erkannt | $Q_{VR.4}$ [m^3] |
| 1 | 8+65 | 2011 | 4 | 2 | 6.462 | 2 | 2 | 2.073 |
| | 16 | 2011 | 0 | - | - | 0 | - | - |
| | 31 | 2011 | 3 | 2 | 4.566 | 3 | 3 | 5.924 |
| | 32 | 2011 | 0 | - | - | 1 | 1 | 1.788 |
| 1 | 8+65 | 2012 | 3 | 3 | 1.393 | 3 | 0 | - |
| | 16 | 2012 | 2 | 1 | 986 | 1 | 1 | 4.366 |
| | 31 | 2012 | 1 | 0 | - | 2 | 1 | 192 |
| | 32 | 2012 | 0 | - | - | 0 | - | - |
| 2 | 5 | 2012 | 0 | - | - | 0 | - | - |
| | 6 | 2012 | 8 | 6 | 23.505 | 1 | 0 | - |
| | 13 | 2012 | 3 | 2 | 34.539 | 0 | - | - |
| | 14 | 2012 | 7 | 0 | - | 1 | 0 | - |
| | 18 | 2012 | 9 | 0 | - | 1 | 0 | - |
| | 60 | 2012 | 14 | 6 | 55.105 | 4 | 1 | 23.728 |
| 3 | 7+64 | 2012 | 18 | 10 | 48.969 | 7 | 0 | - |
| | 15 | 2012 | 1 | 0 | - | 2 | 0 | - |
| | 19 | 2012 | 1 | 0 | - | 0 | - | - |
| 4 | 28 | 2012 | 2 | 1 | 875 | 0 | - | - |
| | 58 | 2012 | 0 | - | - | 1 | 1 | 4.140 |
| | 61 | 2012 | 1 | 1 | 6.145 | 0 | - | - |

Ermittlung der Verluste infolge Undichtheit von Hochbehältern ($Q_{VR.2}$) Laut Aussage der SWP wurden im Jahr 2012 an allen Behältern im Versorgungsgebiet volumetrische Tests (s. Abschnitt 4.3.3) durchgeführt. Dabei wurden keine Undichtheiten festgestellt.

Verluste aus behobenen Schäden an VW, HW und AW ($Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$) Für jede Zone, in der die erforderlichen Eingangsdaten vorlagen, wurde anhand der in Abschnitt 5.5.5 vorgestellten Methode automatisiert $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ ermittelt. Tabelle 7.11 zeigt, wie viele Schäden im Untersuchungszeitraum pro Zone in der Austauschdatenbank erfasst sind und wie viele davon erfolgreich identifiziert wurden. Von insgesamt 77 reparierten Schäden an HW und VW wurden 34 (44 %) entdeckt. An AW lag die Quote mit 10 von 29 (23 %) identifizierten Schäden etwas geringer. Nicht identifizierte Schadensreparaturen sind entweder auf sehr geringe Leckraten, kurze Laufzeiten oder unzureichend aufgelöste Messwerte der Rohrnetzeinspeisung zurückzuführen. Die Ergebnisse belegen, dass das Verfahren auch bei der Verwendung von Werten aus VWZ zur Erstellung der Nachtmindestganglinie funktioniert (z.B. in Zone 13, 16, 31 oder 60).

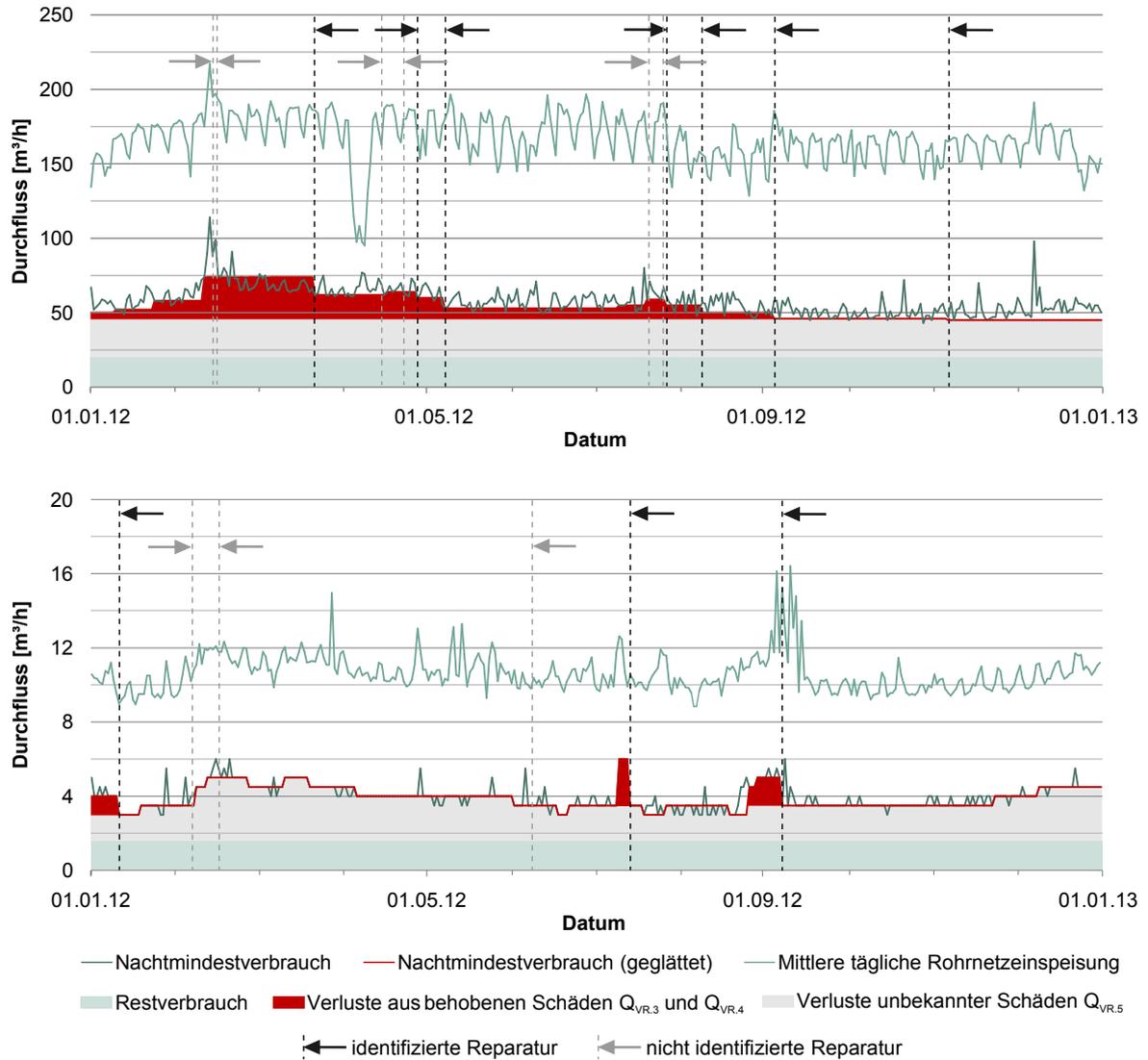


Abbildung 7.7: Analyse des Nachtmindestverbrauchs in Zone 60 (oben) und Zone 8+65 (unten) und Quantifizierung von $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$

Der Vergleich der Höhe des Nachtmindestverbrauchs vor und nach der Reparatur ergab, dass die durchschnittliche Leckrate an HW und VW bei ca. $2,6 \text{ m}^3/h$ lag, an AW dagegen nur

bei ca. $1,6 \text{ m}^3/h$. Anhand von Laufzeit und Leckrate wurden in jeder Zone die resultierenden Leckageverluste $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ berechnet, die ebenfalls in Tabelle 7.11 aufgeführt sind. Abbildung 7.7 illustriert, dass das angewendete Verfahren sowohl in relativ kleinen Zonen wie Zone 8+65 ($Q_N = 93.374 \text{ m}^3/a$) als auch in sehr großen Zonen wie Zone 60 ($Q_N = 1.464.660 \text{ m}^3/a$) einsetzbar ist. In vier der untersuchten Zonen wurde keiner der behobenen Schäden erkannt, was auf die folgenden Ursachen zurückzuführen ist:

- In Zone 14 und 19 konnte die Nachtmindestverbrauchsganglinie nicht gebildet werden, da die Werte für die Rohrnetzeinspeisung Q_N nur monatlich bzw. tagesweise vorliegen.
- In Zone 15 verläuft die Nachtmindestverbrauchsganglinie über den gesamten Betrachtungszeitraum sehr homogen. Möglicherweise handelte es sich bei den behobenen Schäden um Leckstellen mit geringer Leckrate.
- In Zone 18 wird Wasser über zwei BWZ eingespeist und an insgesamt sieben BWZ entnommen. Durch die resultierende extreme Variabilität des Nachtmindestverbrauchs entsteht eine unbrauchbare geglättete Ganglinie. In Folge werden fehlerhafte Werte für $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ berechnet.

Verluste aus unbekanntem Schäden ($Q_{VR.5}$) Nach der Ermittlung von $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ wird $Q_{VR.5}$ für jede Zone berechnet. In fünf Zonen (Zonen 5, 6, 15, 16 und 28) ergeben sich negative Werte für $Q_{VR.5}$. In den Zonen 5, 15 und 28 liegt die Ursache darin, dass die Einspeisung Q_N geringer als die Abnahme Q_A ist (vgl. Abschnitt 7.2.2.2). In Zone 6 beträgt $Q_{VR.5} -482 \text{ m}^3$, was darauf zurückzuführen ist, dass durch ungünstige Glättung der Nachtmindestverbrauchsganglinie die Laufzeit eines Schadens stark überschätzt wird. In Zone 16 ergab die visuelle Kontrolle der Ganglinie, dass in einem Fall vermutlich sowohl Leckrate als auch Laufzeit des Schadens überschätzt werden.

7.2.3 Funktionalität des Moduls PI

Die in Abschnitt 5.6 vorgestellten allgemeinen, finanziellen, betrieblichen und ökologischen Kennzahlen werden berechnet und in separaten Ausgabedatenbanken abgelegt, soweit die erforderlichen Eingangsdaten vorliegen. In Zonen mit negativen Ergebniswerten für die Wasserverluste Q_V (Zonen 5, 15 und 28) sind die meisten Kennzahlen unbrauchbar. Die einzelnen Ergebnisse werden in Abschnitt 7.3 im Rahmen der Analyse der Wasserverlustsituation in den Pilotgebieten diskutiert. In den folgenden Abschnitten werden weitere kritische Punkte für die Ermittlung der Kennzahlen aufgezeigt.

7.2.3.1 Allgemeine Kennzahlen

Im GIS der SWP sind Zubringerleitungen bis auf wenige Ausnahmen Versorgungszonen zugeordnet. Dies betrifft insbesondere die Zonen 18 (3. Hochzone Süd) und 61 (Tiefzone Mäuerach). Von insgesamt 34,27 km HW und VW in Zone 18 stellen 14,99 km Zubringerleitungen dar, die durch die Zone hindurch BWV-Wasser aus dem HB Seehaus in Richtung der beiden Wasserwerke Sonnenberg und Friedrichsberg transportieren. Das gleiche gilt für die Zone 61, in der über die Hälfte der Leitungen als Zubringerleitungen (5,05 von 9,80 km) dienen. Dies wirkt sich auf die Berechnung längenbezogener Kennzahlen aus, so dass zu geringe Werte für die spezifische Einspeisung q_N , die Hausanschlussdichte D_{AL} und die Absperrschieberdichte D_{AS} ermittelt werden. Zubringersysteme sollten daher im GIS besser als eigenständige Bilanzierungszonen definiert werden, um sie bei der Wassermengenanalyse separat betrachten

zu können. Allgemein ist es zu empfehlen, die Zubringersysteme von den Verteilungsnetzen zu trennen und an den Übergabepunkten BWZ zu installieren.

7.2.3.2 Finanzielle Kennzahlen

Für die Ermittlung finanzieller Kennzahlen sind Angaben zu den Gestehungskosten, zum Wasserpreis sowie zum Betriebsaufwand $G5$ zu machen. Letzterer lässt sich aus den Geschäftsberichten der SWP nicht ermitteln, so dass die kaufmännischen Wasserverluste in Relation zum Betriebsaufwand $Fi47$ nicht berechnet werden konnten. Als Gestehungskosten $G58$ wurde die Verbandsumlage der BWV (0,446 Euro pro Kubikmeter) und als durchschnittlicher Wasserpreis $G57$ wurde der Arbeitspreis (2,38 Euro pro Kubikmeter) angesetzt (s. Abschnitt 6.3.4). Dieser Wert entspricht dem Quotient aus den Umsatzerlösen aus Wasserverkauf für Direktversorgung zur in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AI} (SWP, 2013a).

7.2.3.3 Betriebliche Kennzahlen

In die Berechnung des UARL (s. Abschnitt 4.5.3.4) geht der Längenanteil einer Anschlussleitung ein, der sich auf Privatgrund befindet. Bisher wird dieser Anteil im GIS der SWP nicht berechnet, da die verfügbaren Sachdaten zu Flurstücken keine eindeutige Identifikation von Privatgrundstücken zulassen. Vereinfachend wurde daher für alle Pilotzonen angenommen, dass sich jeweils die Hälfte der Anschlussleitung auf Privatgrund befindet. Für den mittleren Versorgungsdruck, der ebenfalls in die Ermittlung des UARL eingeht, waren weitere Annahmen zu treffen, die bereits in Abschnitt 7.2.1.3 beschrieben wurden. Da in kleinen Zonen in manchen Jahren gar keine Schäden an Leitungen auftreten, wurde für die Ermittlung der Schadensraten an HW und VW ($Op31$) sowie an AW ($Op32$) jeweils die jährlichen Mittelwerte der Schäden aus den zurückliegenden fünf Jahren verwendet, um aussagekräftige Werte zu erhalten (vgl. Abschnitt 2.4.3.5).

7.2.3.4 Ökologische Kennzahlen

Für die Ermittlung des spezifischen Energiegehalts des Wassers in unterschiedlichen Zonen werden manuelle Stromzählerablesungen ausgewertet, die über die Tabelle $[t_sz]$ mit den topologischen Elementen der Pilotgebiete verknüpft sind. In einzelnen Fällen war die Zuordnung der Stromzähler zu den topologischen Elementen aufgrund mangelnder oder uneindeutiger Bezeichnung nicht möglich.

7.2.4 Funktionalität des Moduls UA

7.2.4.1 Ermittlung der Laufzeit bekannter Schäden

Bei der Ermittlung der Laufzeit von Leckagen fiel auf, dass in einigen Fällen das Datum der Schadensmeldung nach dem Datum der Reparatur liegt. In diesem Fall wird bei der automatisierten Wassermengenanalyse dieser Bestandteil der Laufzeit gleich Null gesetzt (vgl. Abschnitt 5.7.1). Bei der Analyse der Ergebnisse der WMA zeigte sich ebenfalls, dass durch das gewählte Glättungsverfahren für die Nachtmindestverbrauchsganglinie bei Leckagen mit hoher Leckrate und kurzer Laufzeit in einigen Fällen die Identifikation des Schadens verhindert wird.

7.2.4.2 Ermittlung der Leckrate bekannter Schäden

Die minimale Leckrate, die eine Schadensidentifizierung mithilfe des in Abschnitt 5.5.5 beschriebenen Verfahrens noch ermöglicht, hängt bedeutend von der Auflösung der Messwerte der BWZ ab. In Pforzheim liegt diese zwischen $0,01 \text{ m}^3/\text{h}$ und $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Ergebnisse aus den Pilotgebieten zeigen, dass Schäden ab einer Leckrate von $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ erfolgreich anhand des Reparaturdatums identifiziert werden können. In der größten Zone (Zone 60) konnten immerhin noch Schäden ab einer Leckrate von $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ identifiziert werden.

7.3 Ergebnisse der Wassermengenanalyse in den Pilotgebieten

7.3.1 Ermittelte Wasserbilanzen

7.3.1.1 Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der mit Modul WB der WMA durchgeführten Wassermengenanalyse für die Pilotgebiete vorgestellt. Der besseren Übersichtlichkeit halber werden für alle Pilotgebiete nur die Ergebnisse für das Jahr 2012 dargestellt. Die Ergebnisse für das Jahr 2011 bleiben unberücksichtigt, da aufgrund fehlender BWZ-Messwerte im Juni und Juli 2011 (vgl. Abschnitt 7.2.1.2) die Analyse nur für das Pilotgebiet 1 durchgeführt werden konnte. In Tabelle 7.12 sind die ermittelten Wasserbilanzkomponenten separat für jede Zone der vier Pilotgebiete aufgelistet.

Tabelle 7.12: Wasserbilanz in den Pilotgebieten (in 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | Q_N [m^3] | Q_A [m^3] | Q_{AI} [m^3] | Q_{AN} [m^3] | Q_V [m^3] | Q_{VS} [m^3] | Q_{VR} [m^3] |
|------------------|------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 8+65 | 93.375 | 71.521 | 71.290 | 231 | 21.855 | 1.392 | 20.463 |
| | 16 | 49.935 | 46.220 | 46.165 | 55 | 3.714 | 1.213 | 2.501 |
| | 31 | 141.496 | 135.077 | 134.931 | 146 | 6.419 | -2.350 | 8.769 |
| | 32 | 64.620 | 56.294 | 56.254 | 40 | 8.326 | -774 | 9.100 |
| 2 | 5 | 176.408 | 185.440 | 185.148 | 292 | -9.032 | -1.837 | -7.195 |
| | 6 | 204.605 | 178.906 | 178.572 | 334 | 25.699 | 1.260 | 24.438 |
| | 13 | 534.363 | 505.376 | 501.980 | 3.396 | 28.988 | -23.502 | 52.490 |
| | 14 | 381.940 | 357.680 | 356.849 | 831 | 24.259 | 4.522 | 19.737 |
| | 18 | 424.426 | 351.913 | 348.958 | 2.955 | 72.513 | -20.596 | 93.109 |
| | 60 | 1.464.661 | 1.194.089 | 1.189.343 | 4.746 | 270.571 | -30.189 | 300.760 |
| 3 | 7+64 | 1.056.638 | 836.874 | 825.409 | 11.465 | 219.764 | 39.162 | 180.602 |
| | 15 | 51.846 | 63.123 | 62.760 | 363 | -11.277 | -3.566 | -7.711 |
| | 19 | 148.975 | 95.412 | 94.702 | 710 | 53.562 | 3.834 | 49.729 |
| 4 | 28 | 45.905 | 50.726 | 50.655 | 71 | -4.821 | -1.160 | -3.662 |
| | 58 | 182.642 | 165.065 | 164.977 | 88 | 17.577 | -4.968 | 22.544 |
| | 61 | 95.677 | 36.014 | 35.910 | 104 | 59.663 | 9.109 | 50.554 |

Tabelle 7.12 verdeutlicht, dass die nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} in allen Zonen nur eine untergeordnete Rolle spielt. Sie bewegt sich im Bereich von ca. 0,1 % bis 1,1 % von Q_N und ist damit in allen Fällen kleiner als die Unsicherheit der realen Wasser-

verluste Q_{VR} . Wie bereits in Abschnitt 7.2.2.3 dargestellt wurde, sind innerhalb der nicht in Rechnung gestellten Rohrnetzabgabe Q_{AN} die Leitungsspülungen der absolute dominierende Faktor, während Wasserentnahmen im Rahmen von Leitungsarbeiten und Löscheinsätzen praktisch keine Rolle spielen. Die scheinbaren Verluste Q_{VS} nehmen Werte zwischen -4,9 % und 9,5 % von Q_N an, in fast der Hälfte der Fälle sind sie negativ. Dies bedeutet, dass die abgerechnete Wassermenge im Bilanzierungszeitraum größer ist als die anhand der Kundenwasserzählerablesungen ermittelte Rohrnetzabgabe. Bei der Betrachtung der Zusammensetzung der scheinbaren Wasserverluste zeigt sich, dass diese von den Abgrenzungsverlusten $Q_{VS,1}$ und den Abweichungen an BWZ $Q_{VS,3}$ dominiert werden.

7.3.1.2 Plausibilität

Negative Wasserverluste Die Wassermengenanalyse ergab in drei Zonen negative Werte für die Wasserverluste Q_V : In Zone 5, Zone 15 sowie Zone 28 (grau hinterlegt in Tabelle 7.12). In Abschnitt 7.2.2.2 wurden bereits mögliche Ursachen hierfür erörtert. Vor einer weiteren Analyse der Wasserverluste sind in diesen Zonen zunächst die Eingangsdaten auf Fehler zu überprüfen. Da die aktuellen Ergebnisse der Wassermengenanalyse für diese drei Zonen nicht aussagekräftig sind, werden sie in den folgenden Abschnitten nicht weiter behandelt.

Extrem hohe Wasserverluste Es fällt auf, dass die Wassermengenanalyse in einigen Zonen außergewöhnlich hohe reale Wasserverluste ergab, insbesondere in den Zonen 18, 19, 60 und 61. Diese liegen weit über dem Erwartungswert der Wasserverluste in Pforzheim, der zwischen 10 und 20 % der Rohrnetzeinspeisung Q_N beträgt. Wird die nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe Q_{NR} (Summe aus Q_{AN} und Q_V) über die untersuchten Zonen gebildet, ergibt sich ein Wert von 813.608 m^3 bzw. 15,9 % der Rohrnetzeinspeisung Q_N . Dies steht in Widerspruch zu den Angaben aus dem Geschäftsbericht der SWP, in dem für 2012 für das gesamte Versorgungsgebiet (30 Zonen) der Wert für Q_{NR} nur 763.248 m^3 (10,78 % von Q_N) beträgt. Es ist daher davon auszugehen dass die Wassermengenanalyse in einigen Zonen die Wasserverluste überschätzt, was mehrere mögliche Ursachen haben kann:

- Angaben zur Wasserabgabe Q_{AI} werden unterschätzt, d.h. Daten zu Abnehmern und ihrem Verbrauch fehlen in der Austauschdatenbank bzw. werden nicht korrekt einer Zone zugeordnet. Wie in Abschnitt 7.2.1.1 ausgeführt, enthält die Austauschdatenbank 211 inaktive Abnehmer, deren Gesamtverbrauch von 86.870 m^3 in 2012 keiner Zone zugeordnet werden kann.
- Durch positive Messabweichungen der Einspeise-BWZ wird die Einspeisung Q_N in einzelne Zonen überschätzt (vgl. Abschnitt 7.2.1.2). Hier ist insbesondere Zone 60 zu nennen, in der keine ZW, sondern nur MW zur Ermittlung der Einspeisung zur Verfügung stehen und auch keine manuellen Ablesungen zur Plausibilitätskontrolle vorliegen.
- Es liegen sonstige Fehler in den Einspeisemesswerten vor.

Die Analyse der Jahresganglinie der Rohrnetzeinspeisung einer Zone kann dabei helfen, eventuelle Unstimmigkeiten in den Eingangsdaten aufzudecken. In Zone 60 zeigt die Ganglinie der Rohrnetzeinspeisung einen kurzen Einbruch im April 2012 der auf geöffnete Zonen-trennschieber hinweist, aber keine Auffälligkeiten, die eine Überschätzung von Q_N erklären würden. (vgl. Abbildung 7.7). Da Zone 60 an Zone 5 angrenzt, in der die Wasserbilanz negative Verluste ergab, besteht der Verdacht, dass beide Zonen nicht vollständig hydraulisch voneinander getrennt sind und ein Wasseraustausch stattfindet. Für Zone 19 wurde die Ganglinie nicht automatisch erstellt, da die BWZ-Messwerte nicht in der erforderlichen Auflösung

vorlagen. Die manuelle Überprüfung der Eingangsdaten ergab die in Abbildung 7.8 dargestellte Situation. Es ist deutlich zu erkennen, dass die resultierende Einspeisung in die Zone 19 an BWZ F-16-03 ab Anfang Mai 2012 sprunghaft ansteigt. Ein Anstieg der Entnahme über BWZ-17-02 in Richtung des benachbarten Versorgungsgebiets Büchenbronn erfolgt erst ab Ende Juni. Eine Überschätzung von Q_N um ca. 30.000 m^3 ist die Folge. Auch im weiteren Verlauf des Oktober und November 2012 zeigt die resultierende Ganglinie von Q_N einen auffälligen Verlauf, der zeitweise unterhalb der mittleren Rohrnetzabgabe Q_A liegt. Ursachen der geschilderten Fehler sind wahrscheinlich Veränderungen der Netztopologie (z.B. geöffnete Zonentrennschieber) im Zuge der Zusammenlegung der Wasseraufbereitungsanlagen Huchenfeld und Büchenbronn, die in 2012 stattfand. Ohne die Kenntnis solcher temporärer Veränderungen führt die automatisierte Wassermengenanalyse zu fehlerhaften Ergebnissen.

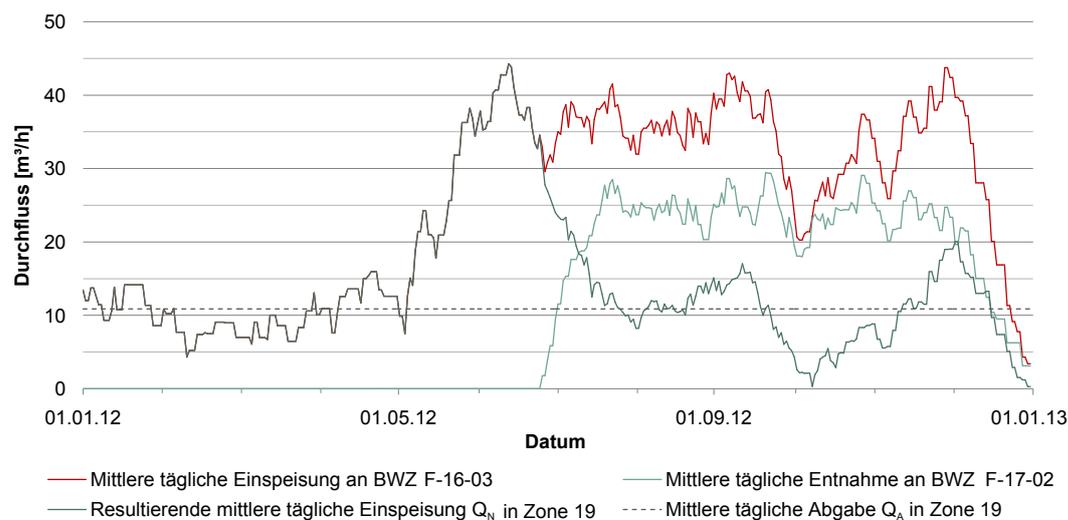


Abbildung 7.8: Überprüfung der Einspeise- und Entnahmemengen in Zone 19 (in 2012)

Unsicherheit der Berechnungsergebnisse Die Zahlen für die importierten Wassermengen aus dem Geschäftsbericht der SWP stammen von BWZ, die im Geschäftsverkehr stehen und daher regelmäßig geeicht werden. Es ist daher anzunehmen dass Fehler hauptsächlich auf BWZ zurückzuführen sind, die innerhalb des Versorgungssystems zur kontinuierlichen Überwachung des Betriebs eingesetzt werden. Bei der Wassermengenanalyse wird auch die relative Unsicherheit u_{Q_N} für die Rohrnetzeinspeisung Q_N jeder Zone ermittelt. Diese basiert entweder auf einem Standardwert (1,0 %) oder der individuellen Fehlerkurve eines BWZ. In den meisten Zonen liegt u_{Q_N} zwischen 1,0 und 2,2 %. In den Zonen 18 und 61 liegt u_{Q_N} dagegen signifikant höher:

- Zone 18: Einspeisung und Entnahme findet über insgesamt neun BWZ statt, deren individuelle Unsicherheit sich aufaddiert. Weiterhin wird ca. 10-mal mehr Wasser durch die Zone hindurch gefördert als letztlich als Q_N darin verbleibt ($4.142.178 \text{ m}^3$ zu 424.426 m^3), so dass die Rohrnetzeinspeisung Q_N mit einer relativen Unsicherheit u_{Q_N} von 14,5 % behaftet ist.
- Zone 61: Einspeisung und Entnahme findet über insgesamt fünf BWZ statt. Es wird ca. 19-mal mehr Wasser durch die Zone hindurch gefördert als letztlich als Q_N darin

verbleibt ($1.822.068 \text{ m}^3$ zu 95.677 m^3), so dass die Rohrnetzeinspeisung Q_N mit einer relativen Unsicherheit $u_{Q,N}$ von 27,6 % behaftet ist.

Die Summe der Unsicherheit $U_{Q,N}$ über alle Zonen ergibt 158.876 m^3 . Dies ist bei der Bewertung der Ergebnisse der Wasserbilanzen und ihrer Aussagekraft zu berücksichtigen. Abbildung 7.9 zeigt die Komponenten der nicht in Rechnung gestellten Wasserabgabe in Relation zur Rohrnetzeinspeisung Q_N der untersuchten Zonen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass es zwischen den einzelnen Zonen große Unterschiede bezüglich der Höhe der prozentualen Wasserverluste gibt. Der minimale Wert liegt bei 5,0 % von Q_N , der maximale Wert bei 52,8 % von Q_N . Bei den Zonen 6, 7, 8, 19, 32 und 58 liegt die relative Unsicherheit $u_{Q,VR}$ der realen Wasserverluste zwischen 5,1 und 9,2 %. Die jeweiligen Ergebnisse sind daher als relativ verlässlich anzusehen. In anderen Zonen liegt $u_{Q,VR}$ teilweise signifikant höher:

- Zone 13, 14, 16, 31 und 60: $u_{Q,VR}$ liegt zwischen 11,1 und 24,0 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Einspeisung in diese Zonen ganz oder teilweise mithilfe von VWZ ermittelt wird, die bei der Berechnung eine höhere individuelle Unsicherheit (5,0 %) erhalten als BWZ.
- Zone 18: $u_{Q,VR}$ beträgt 66,2 % und ist auf die erhöhte Unsicherheit der Rohrnetzeinspeisung zurückzuführen.
- Zone 61: $u_{Q,VR}$ beträgt 52,3 % und ist auf die erhöhte Unsicherheit der Rohrnetzeinspeisung zurückzuführen.

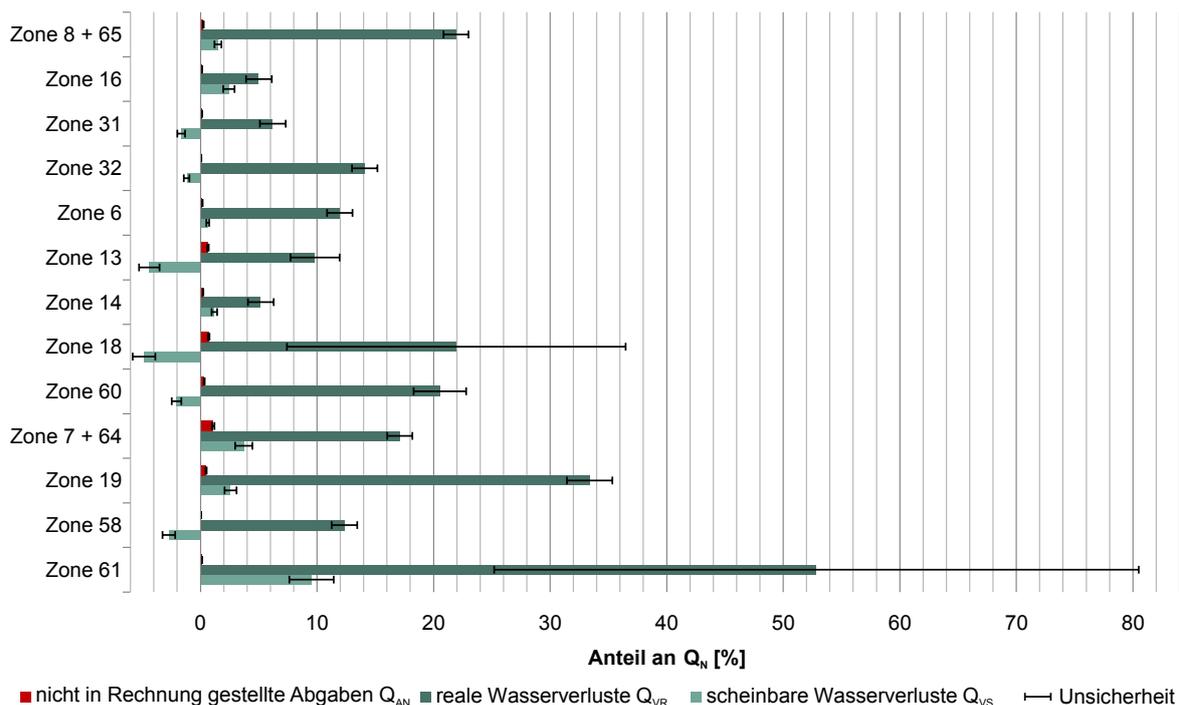


Abbildung 7.9: Anteile einzelner Komponenten der nicht in Rechnung gestellten Wasserabgabe in den Pilotgebieten (in 2012)

Fazit der Plausibilitätskontrolle Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Aussagekraft der Ergebnisse in einigen Zonen stark eingeschränkt ist. Dies ist in den Zonen 5, 15, 19,

28 und 60 auf fehlerhafte Eingangsdaten und nicht registrierte Veränderungen an der Topologie der Versorgungssysteme zurückzuführen. Die ermittelten Wasserverluste in den Zonen 18 und 61 sind nicht verwendbar. Grund ist die hohe Unsicherheit der Ergebnisse, die aus der Förderung großer Wassermengen durch diese Zonen hindurch resultiert.

7.3.2 Ermittelte Kennzahlen

7.3.2.1 Finanzielle Kennzahlen

Kaufmännische Wasserverluste $Fi46$ Die Ergebnisse für die finanziellen Kennzahlen sind in Tabelle 7.13 dargestellt. Werden die aus den oben aufgeführten Gründen nicht aussagekräftigen Ergebnisse außer Acht gelassen (in Tabelle 7.13 grau hinterlegt), bewegen sich die kaufmännischen Wasserverluste $Fi46$ in den Pilotgebieten zwischen 4,6 und 23,7 %.

Tabelle 7.13: Finanzielle Kennzahlen in den Pilotgebieten (in 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | $Fi46$ [%] | Kosten reale WV | | Kosten scheinbare WV | |
|------------------|------|---------------|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | | | K_{VR} [Euro] | $U_{K,VR}$ [Euro] | K_{VS} [Euro] | $U_{K,VS}$ [Euro] |
| 1 | 8+65 | 23,7 | 9.126 | ± 463 | 3.312 | ± 662 |
| | 16 | 7,5 | 1.116 | ± 268 | 2.887 | ± 577 |
| | 31 | 4,6 | 3.911 | ± 730 | -5.593 | ± 1.119 |
| | 32 | 12,9 | 4.059 | ± 322 | -1.842 | ± 368 |
| 2 | 6 | 12,7 | 10.900 | ± 1.002 | 2.999 | ± 600 |
| | 13 | 6,1 | 23.410 | ± 5.442 | -55.936 | ± 11.187 |
| | 14 | 6,6 | 8.803 | ± 1.923 | 10.763 | ± 2.152 |
| | 18 | 17,8 | 41.527 | ± 27.570 | -49.019 | ± 9.804 |
| | 60 | 18,8 | 134.139 | ± 14.956 | -71.849 | ± 14.370 |
| 3 | 7+64 | 21,9 | 80.549 | ± 6.169 | 93.206 | ± 18.641 |
| | 19 | 36,4 | 22.179 | ± 1.339 | 9.125 | ± 1.825 |
| 4 | 58 | 9,7 | 10.055 | ± 998 | -11.823 | ± 2.365 |
| | 61 | 62,5 | 22.547 | ± 11.826 | 21.679 | ± 4336 |

Kosten der realen Wasserverluste K_{VR} und der scheinbaren Wasserverluste K_{VS} Die Summe der Kosten der realen Wasserverluste K_{VR} beläuft sich in den auswertbaren Zonen der Pilotgebiete auf ca. 152.000 Euro (± 17.300 Euro). Da die scheinbaren Wasserverluste zum größten Teil auf Abgrenzungsfehlern beruhen, die teils zu Unter- und teils zu Überschätzung des Verbrauchs führen, gleichen sie sich gegenseitig weitgehend aus. In Summe beträgt K_{VS} für alle Pilotgebiete ca. 38.000 Euro.

7.3.2.2 Betriebliche Kennzahlen

Spezifische reale Wasserverluste q_{VR} Basierend auf den Ergebnissen zu Q_{VR} und den automatisiert ermittelten Rohrnetztlängen der untersuchten Versorgungszonen werden die spezifischen realen Wasserverluste q_{VR} ermittelt. Abbildung 7.10 zeigt die Ergebnisse für q_{VR} in den auswertbaren Zonen der vier Pilotgebiete. Da sich die Unsicherheit von Q_{VR} auf die ermittelten Werte von q_{VR} überträgt, sind auch hier die Ergebnisse der Zonen 18 und 61 nicht

aussagekräftig. Die Bewertung von q_{VR} anhand des DVGW Arbeitsblatts W 392 ergibt, dass in sechs der übrigen Zonen die Wasserverluste als hoch einzuschätzen sind, in vier Zonen als mittel und nur in einer Zone als niedrig (DVGW, 2003a). Dabei ist zu beachten, dass neun Zonen aufgrund ihrer spezifischen Rohrnetzeinspeisung q_N in die Gruppe der ländlichen bzw. städtischen Versorgungsstruktur eingeordnet werden und daher strengeren Kriterien unterliegen als die vier Zonen mit großstädtischer Versorgungsstruktur (Zonen 7, 19, 58 und 60) (vgl. Tabelle 4.6).

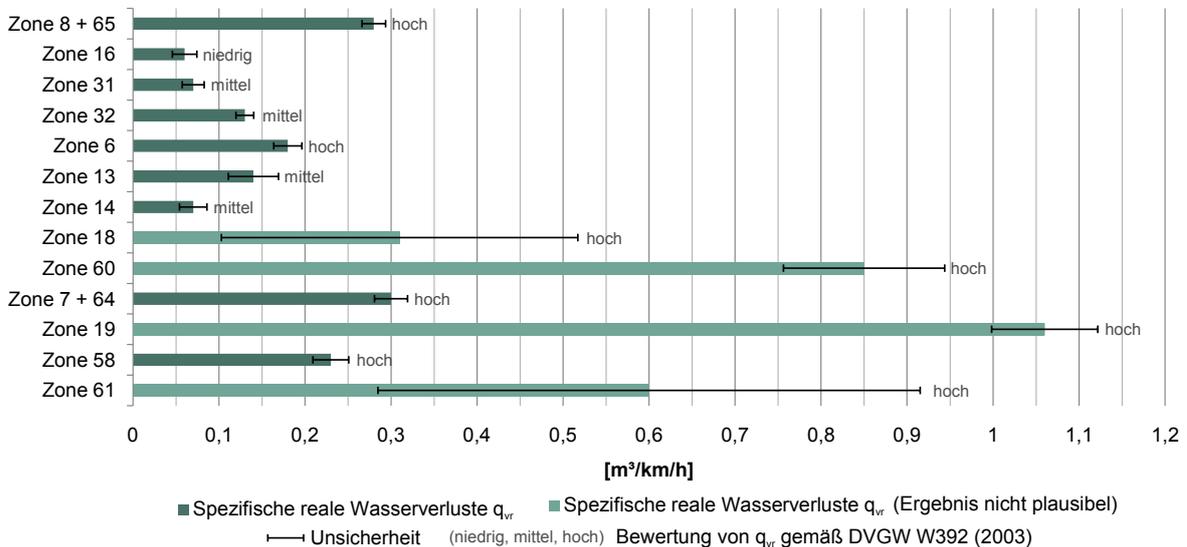


Abbildung 7.10: Spezifische Wasserverluste in den Pilotgebieten (in 2012)

Reale Verluste pro Hausanschluss und Tag pro Meter Versorgungsdruck q_{VRP} Tabelle 7.14 zeigt neben anderen ermittelten Kennzahlen auch die Ergebnisse für die Kennzahl q_{VRP} , die die realen Wasserverluste pro Hausanschluss auf einen einheitlichen Versorgungsdruck normiert. Die Normierung erlaubt einen guten Vergleich der Wasserverluste zwischen Wasserversorgungsnetzen mit unterschiedlich hohem mittlerem Versorgungsdruck.

Infrastructure Leakage Index ILI Im Unterschied zur Kennzahl q_{VRP} gehen in den ILI neben Versorgungsdruck und Anzahl der Anschlussleitungen auch die Länge der Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen ein. Bei der Betrachtung des unvermeidbaren Wasserverlusts U_{ARL} in den Pilotgebieten fällt auf, dass dieser in den Zonen 18 und 61 fast doppelt so hoch ausfällt wie in den übrigen Zonen. Dies ist auf die geringe Hausanschlussdichte in diesen beiden Zonen zurückzuführen. Wie Tabelle 7.14 zeigt, ergab die Wassermengenanalyse in allen auswertbaren Zonen Werte für den ILI zwischen 0,4 und 1,9. Ein ILI kleiner 2,0 steht für sehr geringe Wasserverluste (Weltbank Kategorie A). ILI -Werte kleiner 1,0 signalisieren, dass das Niveau der Wasserverluste niedriger ist, als unter den gegebenen Randbedingungen (Versorgungsstruktur, Druckverhältnisse) eigentlich zu erwarten wäre. Die niedrigen ILI -Werte sind teilweise darauf zurückzuführen, dass der mittlere Versorgungsdruck P_m in den Zonen auf vereinfachte Weise ermittelt wurde und aufgrund der Vernachlässigung der Rohrreibungsverluste zu hoch ausfällt, was in einer Erhöhung des U_{ARL} resultiert. Der Vergleich der Wasserverlustbewertung anhand der spezifischen Wasserverluste q_{VR} gemäß DVGW (2003a)

Tabelle 7.14: Betriebliche Kennzahlen in den Pilotgebieten (in 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | q_{VR} [$m^3/km/d$] | q_{VRP} [$l/AL/m/d$] | $CARL$ [$l/AL/d$] | $UARL$ [$l/AL/d$] | ILI [-] | Weltbank Kategorie |
|------------------|------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|--------------|-----------------------|
| 1 | 8+65 | 0,28 | 2,3 | 117,5 | 70,3 | 1,7 | A |
| | 16 | 0,06 | 0,7 | 32,9 | 70,4 | 0,5 | A |
| | 31 | 0,07 | 0,6 | 25,9 | 59,6 | 0,4 | A |
| | 32 | 0,13 | 2,2 | 85,7 | 63,8 | 1,3 | A |
| 2 | 6 | 0,18 | 1,8 | 88,7 | 73,8 | 1,2 | A |
| | 13 | 0,14 | 1,8 | 93,4 | 87,8 | 1,1 | A |
| | 14 | 0,07 | 0,8 | 41,5 | 70,0 | 0,6 | A |
| | 18 | 0,31 | 7,4 | 435,6 | 133,7 | 3,3 | B |
| | 60 | 0,85 | 8,2 | 444,7 | 77,0 | 5,8 | C |
| 3 | 7+64 | 0,30 | 2,8 | 147,7 | 77,6 | 1,9 | A |
| | 19 | 1,06 | 15,7 | 629,0 | 63,2 | 10,0 | D |
| 4 | 58 | 0,23 | 1,6 | 83,9 | 68,1 | 1,2 | A |
| | 61 | 0,60 | 22,9 | 1190,7 | 143,3 | 8,3 | D |

mit der Bewertung gemäß Weltbank verdeutlicht, dass die Kriterien des deutschen Regelwerks deutlich strenger sind als die internationalen Vorgaben.

Leitungsschäden Op31 und Anschlussleitungsschäden Op32 Abbildung 7.11 zeigt die ermittelten Kennzahlen Op31 und Op32 in den Pilotgebieten, die automatisiert als Mittelwert der Schäden der zurückliegenden fünf Jahr ermittelt wurden. Es ist ersichtlich, dass die Schadensraten an Anschlussleitungen gemäß DVGW (2006a) als niedrig anzusehen sind (vgl. Tabelle 2.4). Dies ist sicherlich auf den Umstand zurückzuführen, dass ca. 65 % der Hausanschlüsse in Pforzheim in PE verlegt sind und nur ein kleiner Teil aller Anschlussleitungen älter als 40 Jahre ist (vgl. Abbildung 6.6).

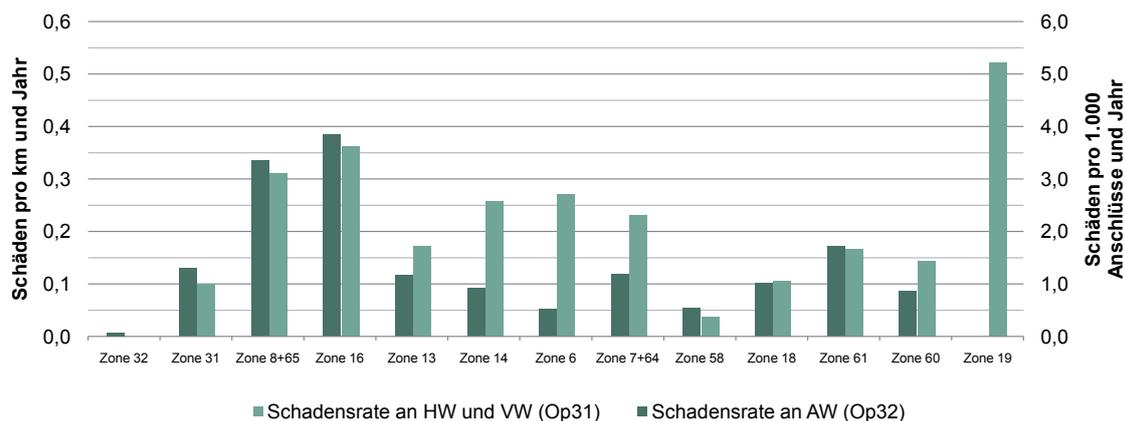


Abbildung 7.11: Kennzahlen Op31 und Op32 in den Pilotgebieten (in 2012)

Die Schadensraten an Haupt- und Versorgungsleitungen variieren von Zone zu Zone signifikant. Hervorzuheben sind die Zonen 31 und 58, die gemäß DVGW (2006a) niedrige Scha-

densraten haben. Die einzige Zone mit hoher Schadensrate ist Zone 19, alle anderen Zonen befinden sich im Bereich mittlerer Schadensraten. Es fällt auf, dass in der Schadensdatenbank in Zone 19 keine Schäden an Anschlussleitungen und in Zone 32 nur ein einziger Schaden in den vergangenen fünf Jahren erfasst sind. Möglicherweise ist die Schadensdatenbank in diesen Fällen unvollständig oder es liegen Fehler bei der Verknüpfung der Schadensdaten zu GIS-Leitungssegmenten vor.

7.3.2.3 Ökologische Kennzahlen

Durch reale Wasserverluste verlorene Energie V_E Aus Abbildung 7.12 wird ersichtlich, welche energetischen und ökologischen Auswirkungen die Wasserverluste in den untersuchten Pilotgebieten haben. Bei der Betrachtung des gesamten spezifischen Energiegehalt des Wassers fällt auf, dass dieser in nahezu allen Zonen etwa gleich hoch ist und nur geringfügig höher liegt als der spezifische Energiegehalt des von der BWV bezogenen Wassers ($1,064 \text{ kWh/m}^3$). Diese geringfügige Erhöhung ist in den meisten Fällen auf allgemeinen Stromverbrauch an Behältern zurückzuführen. Ausnahmen bilden die Zone 19, in die Wasser vom HB Sonnenhof I mit Pumpen gefördert wird, sowie die Zone 7+64, da hier dem BWV-Wasser ein großer Teil aufbereiteten Grösseltal-Quellwassers mit niedrigem Energiegehalt beigemischt ist.

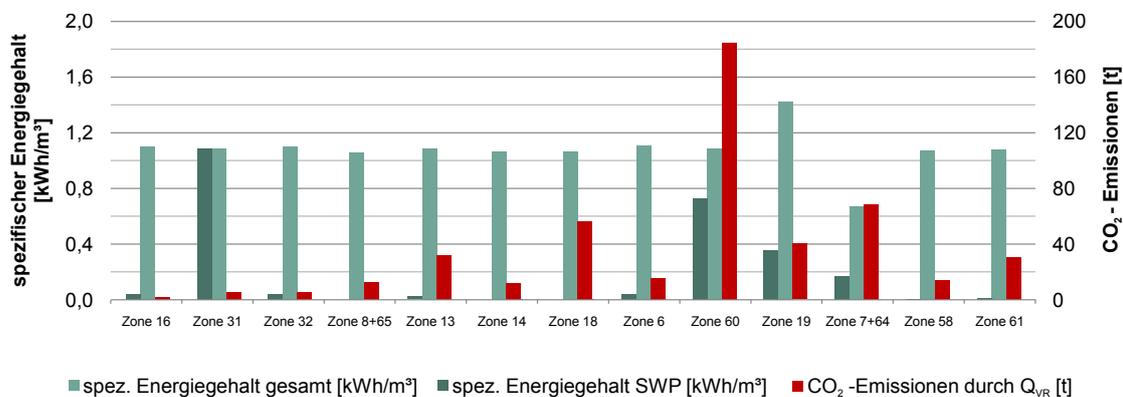


Abbildung 7.12: Spezifischer Energiegehalt und CO_2 -Emissionen in den Pilotgebieten (in 2012)

Wird die eingetragene Energie des BWV-Wassers außer Acht gelassen, verändert sich die Situation: Für die SWP ist die Bereitstellung von Wasser in Zone 31 am energieintensivsten (Aufbereitung und Förderung aus Pumpwerk Huchenfeld), gefolgt von Zone 60 (Förderung aus WW Friedrichsberg), Zone 19 und Zone 7+64 (Aufbereitung TWA Sonnenberg).

Durch reale Wasserverluste erzeugte CO_2 -Emissionen E_{CO_2} Abbildung 7.12 zeigt auch die CO_2 -Emissionen, die durch reale Wasserverluste in den untersuchten Zonen verursacht werden. In Summe ergeben sich für das Jahr 2012 CO_2 -Emissionen in Höhe von ca. 166 t in den neun Zonen mit verlässlichen Wasserbilanz-Ergebnissen.

7.3.3 Analyse der Ursachen

7.3.3.1 Laufzeit bekannter Schäden

Die mittlere Laufzeit der Schäden, die anhand des Reparaturdatums und der Nachtmindestverbrauchsganglinie in den Pilotgebieten identifiziert werden konnten, ist in Tabelle 7.15

aufgelistet. Die Ergebnisse zeigen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Größe einer Zone und der Länge der Laufzeit. Im Mittel beträgt die Laufzeit der Leckagen ca. 120 Tage. Die Zeitdauer zwischen Meldung eines Schadens und dem Abschluss der Reparatur ist in allen Zonen sehr kurz und beträgt durchschnittlich nur ca. vier Tage.

Tabelle 7.15: Laufzeit und Leckrate bekannter Schäden in den Pilotgebieten (in 2012)

| Pilot- gebiet | Zone | Erkannte Schäden | Mittlere Laufzeit [d] | | | Leckrate [m^3/h] | |
|------------------|------|---------------------|-----------------------|-----------|---------|----------------------|---------|
| | | | gesamt | unerkannt | erkannt | minimal | maximal |
| 1 | 8+65 | 3 | 50 | 46 | 5 | 0,9 | 1,8 |
| | 16 | 2 | 188 | 187 | 2 | 0,5 | 1,3 |
| | 31 | 1 | 16 | 0 | 16 | 0,5 | - |
| | 32 | 0 | - | - | - | - | - |
| 2 | 6 | 6 | 176 | 173 | 3 | 1,0 | 2,9 |
| | 13 | 2 | 105 | 102 | 4 | 5,0 | 8,1 |
| | 14 | 0 | - | - | - | - | - |
| | 18 | 0 | - | - | - | - | - |
| | 60 | 7 | 139 | 136 | 3 | 1,0 | 11,0 |
| 3 | 7+64 | 10 | 76 | 74 | 3 | 1,0 | 5,8 |
| | 19 | 0 | - | - | - | - | - |
| 4 | 58 | 1 | 215 | 215 | 0 | 2,2 | - |
| | 61 | 1 | 112 | 112 | 0 | 2,3 | - |

7.3.3.2 Leckrate bekannter Schäden

In den Abschnitten 7.2.4.1 und 7.2.4.2 wurde festgestellt, dass das Verfahren zur Identifikation der Laufzeiten und Leckraten von Schäden bei sehr kleinen Schäden (Leckrate kleiner $0,5 m^3/h$) und bei sehr großen Leckagen mit kurzer Laufzeit nicht erfolgreich arbeitet. Stattdessen werden hauptsächlich Schäden mit mittlerer Leckrate aufgedeckt, die lange Zeit im Hintergrund laufen. Die Gegenüberstellung der Leckrate bekannter Schäden und der Rohrnetzeinspeisung einer Zone zeigt, dass in kleinen Zonen (Q_N kleiner $250.000 m^3/a$) nur Schäden mit Leckraten unter $5,0 m^3/h$ längere Zeit unentdeckt bleiben. In größeren Zonen dagegen bleiben selbst Schäden mit Leckraten bis $11,0 m^3/h$ über einen längeren Zeitraum unentdeckt. Im Durchschnitt beträgt die Leckrate in den kleinen Zonen (Zonen 8+65, 16, 31, 6, 58 und 61) ca. $1,5 m^3/h$, in den großen Zonen (Zonen 7+64, 13 und 60) dagegen ca. $3,6 m^3/h$ (vgl. Abbildung 7.13).

7.3.3.3 Wasserverlustanteil unterschiedlicher Schadenstellen

Bei der automatisierten Wassermengenanalyse setzen sich die realen Wasserverluste aus fünf Komponenten zusammen. In Abschnitt 7.2.2.5 wurde bereits erläutert, dass Undichtheiten und Überlaufmengen an Behältern in Pforzheim praktisch keine Rolle spielen. In den neun Zonen mit plausiblen Ergebnissen beträgt die Höhe der Verluste aus bekannten Schäden an HW und VW ($Q_{VR.3}$) durchschnittlich ca. 25,3 %, an AW ($Q_{VR.4}$) ca. 4,7 %. Der Anteil der Verluste aus unbekanntem Schäden $Q_{VR.5}$ ist in den einzelnen Zonen sehr unterschiedlich und beträgt im Mittel ca. 70,0 %. In einem Fall (Zone 16) führt die Wassermengenanalyse

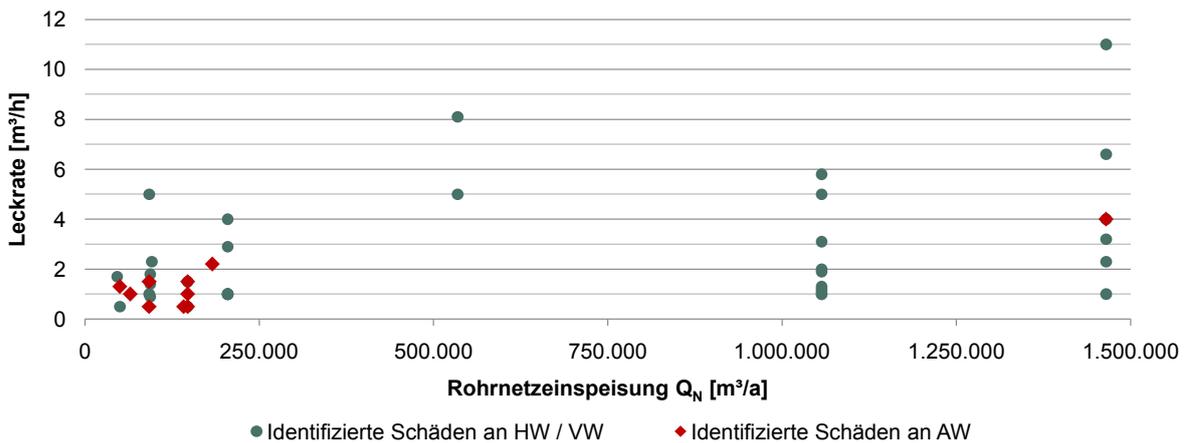


Abbildung 7.13: Leckraten identifizierter Schäden in den Pilotgebieten (in 2012)

offensichtlich zu einer Überschätzung von $Q_{VR.3}$ und $Q_{VR.4}$ und resultiert in einer negativen Verlustmenge $Q_{VR.5}$.

7.4 Bewertung der Wasserverlustsituation in den Pilotgebieten

Da aufgrund fehlerbehafteter Eingangsdaten nur in neun von 16 untersuchten Zonen plausible Resultate ermittelt werden konnten und gerade auch in großen Zonen (z.B. Zone 18 und Zone 60) keine verlässlichen Ergebnisse vorliegen, lässt sich kein vollständiges Bild der Wasserverlustsituation in den Pilotgebieten zeichnen. Wo aussagekräftige Ergebnisse erzielt wurden, wird allerdings deutlich, dass sich die Situation in einzelnen Zonen deutlich von der Gesamtsituation in Pforzheim unterscheiden kann:

- In drei Zonen liegen die spezifischen Wasserverluste q_{VR} unter $0,07 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$ und damit auf einem sehr niedrigen Niveau (Zonen 16, 14 und 31).
- In den Zonen 6, 13 und 32 erreicht q_{VR} Werte zwischen $0,13$ und $0,18 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$ und befindet sich damit unterhalb der Marke von $0,19 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$ für das Gesamtsystem (vgl. Abbildung 6.9).
- Hohe spezifische Wasserverluste (q_{VR} über $0,23 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$) treten in den Zonen 7+64, 8+65 und 58 auf.

Die vorliegenden Daten legen nahe, dass in den drei letztgenannten Zonen Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung priorisiert werden sollten, da hier die größten Einsparpotenziale zu erwarten sind. Wird als kurzfristiger Zielwert ein spezifischer Wasserverlust von $0,15 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$ in den drei Zonen angenommen, bedeutet dies eine Reduktion der realen Verluste um ca. $109.000 \text{ m}^3/\text{a}$ und eine jährliche Kosteneinsparung von ca. 49.000 Euro. Mit Hinblick auf Energieverbrauch und CO_2 -Ausstoß sollte versucht werden, die Wasserverluste in den Zonen 60 und 19 stärker zu reduzieren.

Weiterhin sollte die Überwachung des Rohrnetzes verbessert werden, indem zusätzliche BWZ an verschiedenen Hochbehältern installiert und an das Prozessleitsystem angeschlossen werden, die derzeit nur durch VWZ nachgebildet werden konnten. Bereits installierte BWZ, die bisher nur manuell ausgelesen werden, sollten ebenfalls an das Prozessleitsystem angeschlossen werden. Bei den vorhandenen BWZ sollte überprüft werden, ob altersbedingter Verschleiß und fehlende Kalibrierung zu unzulässig hohen Messabweichungen führen, die einen

Austausch notwendig machen. Zudem sollten die Ursachen der fehlenden BWZ-Messwerte aus dem Prozessleitsystem gesucht und behoben werden.

In den untersuchten Zonen wurde keine sichtbaren Zusammenhänge zwischen Parametern wie mittlerem Rohrnetzalter, NAX, Schadensrate und der Höhe der realen Wasserverluste festgestellt. Dies ist möglicherweise auch auf die relativ geringe Anzahl an untersuchten Zonen zurückzuführen. Da letztlich nur in neun Zonen plausible Ergebnisse erzielt wurden, sollten im nächsten Schritt die Eingangsdaten auf Fehler untersucht werden und vorhandene Fehlerquellen bei der Datenerfassung, -übertragung und -aufbereitung beseitigt werden. Anschließend sollten die Untersuchungen wiederholt und auf die übrigen Versorgungszonen der SWP ausgeweitet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Wasserverluste sind ein globales Problem, von dem letztlich jedes leitungsgebundene System zur Trinkwasserversorgung betroffen ist und das bis zu einem gewissen Grad wirtschaftlich nicht zu vermeiden ist. In manchen Regionen dieser Erde und besonders in vielen Entwicklungsländern haben die Wasserverluste jedoch eine Größenordnung erreicht, die den kontinuierlichen Betrieb und die Versorgungssicherheit beeinträchtigt oder unmöglich macht. Neben der zunehmenden Urbanisierung, dem expandierenden Bedarf konkurrierender Nutzer und der sich verschärfenden Verknappung des Wasserangebots infolge von Übernutzung und den Auswirkungen des Klimawandels tragen Wasserverluste daher vielerorts zu einer Verschlechterung der Versorgungssituation bei.

Im Vergleich mit der globalen Situation sind die Wasserverluste in den meisten deutschen Wasserversorgungssystemen gering. Sie werden daher von Wasserversorgungsunternehmen häufig als untergeordnetes Problem angesehen. Infolge alternder Infrastruktur und unzureichender Rehabilitationsraten besteht aber das Risiko, dass sich auch in Deutschland in Zukunft der Zustand der Rohrnetze verschlechtert und die Wasserverluste steigen. Auch angesichts des zunehmenden Kostendrucks auf Wasserversorgungsunternehmen und mit Hinblick auf die Forderung nach einer nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen erscheint eine weitere Verringerung der Wasserverluste wichtig und sinnvoll. Da sich Wasserverluste nicht homogen über ein Wasserversorgungssystem verteilen, ist die Erstellung einer zonenweisen, detaillierten Wasserbilanz der grundlegende erste Schritt für ein effizientes und dauerhaftes Wasserverlustmanagement. Untersuchungen zeigen jedoch, dass in vielen Wasserversorgungsunternehmen aufgrund des hohen Aufwands für Datenerhebung und -verarbeitung keine detaillierten Wasserbilanzen für separate Versorgungszonen erstellt werden.

Aus der beschriebenen Situation in der Praxis lässt sich schlussfolgern, dass Bedarf an der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen besteht, die Wasserversorgungsunternehmen dabei unterstützen mit wirtschaftlichem Aufwand zonenweise, detaillierte Wasserbilanzen für adäquate Bilanzierungszeiträume zu erstellen. Gegenstand dieser Arbeit ist daher die Konzeption und Entwicklung eines Werkzeugs zur automatisierten Bilanzierung und Analyse von Wasserverlusten in Wasserversorgungssystemen.

Für die Konzeption des Werkzeugs wurden im ersten Teil der Arbeit die vielschichtigen Zusammenhänge zwischen Aufbau und Betrieb von Wasserversorgungssystemen mit den Ursachen und Auswirkungen der Wasserverluste analysiert und systematisiert. Weiterhin wurde der aktuelle Stand der Technik sowie die Bedeutung der Wassermengenanalyse für die Entwicklung des Wasserverlustmanagements und der effizienten Wasserverlustreduzierung dargestellt. Die genannten Analysen beruhen auf einer umfassenden Literaturrecherche, die auch eine aktuelle Umfrage unter deutschen Wasserversorgungsunternehmen zur Handhabung der Wasserbilanzerstellung einbezieht. Dabei konnten Defizite bei der Vollständigkeit und dem Detaillierungsgrad der Wasserbilanzen sowie ihrer Verwendung zur Strategieentwicklung ausgemacht werden.

Aufbauend auf der Problemanalyse wurde ein neues Konzept zur weitgehend automati-

sierten Erstellung von Wasserbilanzen entwickelt. Dieses Konzept basiert auf der Weiterverwendung und Kombination bereits vorhandener Daten aus zentralen IT-Systemen von Wasserversorgungsunternehmen wie beispielsweise dem Prozessleitsystem, dem Auftragsmanagementsystem und der Kundenabrechnung. Die Erfassung und Aufbereitung der benötigten Eingangsdaten erfolgt automatisiert über das GIS, an das die IT-Systeme über Sichten angebunden sind. Die homogenisierten und plausibilisierten Daten werden in einer Austauschdatenbank mit fest definiertem Format bereitgestellt. Der Datenbestand umfasst Messwerte von Großwasserzählern, Ablesestände von Kundenwasserzählern, abgerechnete Wasserverbräuche, die Beschreibung von Zählercharakteristika, Füllstandsmesswerte von Speicherbehältern, Zustandsmeldungen von Pumpen, Armaturen und Behältern, Auftragsdaten sowie detaillierte Informationen über den Leitungsbestand des zu analysierenden Wasserversorgungssystems.

Die Eingangsdaten werden in das Werkzeug zur automatisierten Wassermengenanalyse (*WMA*) eingelesen, das aus den drei Modulen WB (Wasserbilanz), PI (Kennzahlen) und UA (Ursachenanalyse) besteht. Modul WB dient der Quantifizierung aller Wasserbilanzkomponenten für jede einzelne Zone eines Wasserversorgungssystems. Darauf aufbauend werden in Modul PI eine Reihe betrieblicher, finanzieller und ökologischer Kennzahlen berechnet, die die Vergleichbarkeit und Einordnung der Wasserverluste ermöglichen und als Grundlage der Entscheidungsfindung für die Priorisierung von Maßnahmen dienen. Abschließend dient das Modul UA dazu, entscheidende Ursachen der Wasserverluste zu identifizieren.

Die Funktionalität des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Werkzeugs wurde anhand realer Datensätze aus vier Pilotgebieten im Wasserversorgungssystem der Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG eingehend untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass es mithilfe des Werkzeugs möglich ist, die Wasserverlustsituation einer Zone präzise zu beschreiben und mögliche Ursachen (z.B. Laufzeiten von Leckagen) und Auswirkungen (z.B. entstandene Kosten, CO_2 -Emissionen) zu identifizieren. Erstmals wurden Top-down und Bottom-up Ansätze der Wassermengenanalyse kombiniert, um den Anteil ungemessener Wasserbilanzkomponenten näherungsweise zu quantifizieren. Die Kombination der Verfahren gibt dem Wasserversorger einen detaillierten Einblick in die Zusammensetzung des Nachtmindestverbrauchs einer Zone und zeigt sowohl den Anteil versteckt laufender Leckagen als auch die Höhe der Restverbrauchsmenge auf. Diese Informationen sind von großer Bedeutung für die Auswahl von Maßnahmen zur Wasserverlustreduzierung, die Festlegung von Alarmwerten und die kontinuierliche Überwachung von Zonen.

Die Ergebnisse der pilothaften Implementierung lassen schließen, dass ungemessene Wasserentnahmen für Rohrnetzarbeiten und zur Brandbekämpfung für die Wasserbilanz irrelevant sind. Wasserentnahmen durch Leitungsspülungen wurden als die signifikante Komponente der ungemessenen Wasserabgaben ausgemacht. Die automatisiert durchgeführte Verschneidung von Informationen über Schadensreparaturen aus dem Auftragsmanagementsystem mit der Nachtmindestverbrauchsganglinie ergab aufschlussreiche Ergebnisse zur Laufzeit und Leckrate von Leitungsschäden. Weiterhin konnte mithilfe des entwickelten Ansatzes die Höhe der versteckt laufenden Leckagen und Hintergrundverluste einer Zone näher eingegrenzt werden. Die resultierenden Kennzahlen der Pilotgebiete zeigen auf, wie heterogen die Wasserverluste in den einzelnen Zonen eines Wasserversorgungssystems sind und unterstreichen die Bedeutung der kleinräumigen Wassermengenanalyse. Um fehlende Durchflussmessgeräte zu ersetzen, wurde der Einsatz virtueller Wasserzähler (VWZ) erfolgreich erprobt. Die Randbedingungen, die für die erfolgreiche Verwendung solcher VWZ eingehalten werden müssen, wurden untersucht und beschrieben.

Die Ergebnisse der durchgeführten Wassermengenanalysen zeigen, dass vollständige und

fehlerfreie Eingangsdaten eine grundlegende Voraussetzung sind, um mittels der automatisierten Wassermengenanalyse belastbare Entscheidungsgrundlagen zu erhalten. Insbesondere Mess- und Übertragungsfehler von Betriebswasserzählern, fehlerhafte Zonenzuordnung von Verbrauchsdaten sowie nicht registrierte Veränderungen an der Topologie der Untersuchungsgebiete können die Berechnungsergebnisse signifikant verfälschen.

8.2 Ausblick

Der Prototyp des Werkzeugs wurde im Rahmen der Arbeit in vier Pilotgebieten mit insgesamt 18 Versorgungszonen des Pforzheimer Wasserversorgungsgebiets erprobt. Aufgrund unvollständiger Messwerte aus dem Jahr 2011 war die Wassermengenanalyse in drei der vier Pilotgebiete auf das Jahr 2012 beschränkt. Es sollten daher weitere Testrechnungen umgesetzt werden, um die bisherigen Ergebnisse zu validieren. Bei den bisherigen Analysen stellt sich als nachteilig heraus, dass für die Wasserbilanz eines bestimmten Betrachtungszeitraums die Ablesestände von Kundenwasserzählern des Folgejahrs benötigt werden, die in Systemen mit rollierender Ablesung zum Teil erst in großem zeitlichen Abstand vorliegen. Für eine zeitnahe Wassermengenanalyse bedarf es daher der Integration einer Prognosefunktion, die auf Basis historischer Zählerablesungen den voraussichtlichen Wasserverbrauch möglichst gut vorausbestimmt. In dieser Hinsicht sollte auch untersucht werden, wie sich die Analyse kürzerer Zeiträume (z.B. quartalsweise) auf die Ergebnisse auswirkt.

Weiterhin könnte die *WMA* um ein Modul zur automatisierten Auswahl und Bewertung von Gegenmaßnahmen ergänzt werden, das auf Basis der Wasserbilanzergebnisse Kosten-Nutzen-Analysen für verschiedene Gegenmaßnahmen durchführt. Damit könnte beispielsweise das Einsparpotenzial durch Laufzeitreduzierung von Leckagen den Kosten für den flächendeckenden Einbau von Geräuschloggern in einer Bilanzierungszone gegenübergestellt werden. Weiterhin könnte in Verbindung mit hydraulischen Simulationen untersucht werden, ob und wie weit der Versorgungsdruck in einer Zone gesenkt werden kann und wie sich eine solche Maßnahme auf die Höhe der Wasserverluste auswirken würde.

Bisher wird vor der Durchführung einer Wassermengenanalyse die Topologie des zu untersuchenden Wasserversorgungssystems manuell erstellt. Eine Weiterentwicklung des GIS um Funktionalitäten zur Ermittlung topologischer Zusammenhänge und zur Abstraktion der Modellkomponenten würden den Automatisierungsgrad weiter erhöhen. Gleichzeitig könnte diese Weiterentwicklung dazu dienen, temporäre Veränderungen der Topologie zu identifizieren, die bisher unerkannt bleiben und zu fehlerhaften Wasserbilanzen führen. Da die Leitungsnetze und Anlagen der Wasserversorgungssysteme ständiger Veränderung unterliegen, ist eine vollständige Automatisierung der Wassermengenanalyse jedoch nicht Erfolg versprechend. Die abschließende Plausibilitätskontrolle der Berechnungsergebnisse durch den verantwortlichen Ingenieur bleibt unerlässlich.

Literaturverzeichnis

- [Alegre u. a. 2007] ALEGRE, H. ; BAPTISTA, J.M. ; CABRERA, E. ; CUBILLO, F. ; DUARTE, P. ; HIRNER, W. ; MERKEL, W. ; PARENA, R.: *Performance Indicators for Water Supply Services*. 2. Auflage. London, UK : IWA Publishing, 2007. – 289 S
- [ALLMESS 2006] ALLMESS: *Ringkolbenzähler Aquadis*. Dezember 2006. – URL http://allmess.info/P0891_AS_Aquadis_TS_1206.pdf
- [Ant und Wehage 1997] ANT, E. ; WEHAGE, C.: *Kunststoffrohr-Handbuch : Rohrleitungssysteme für die Ver- und Entsorgung sowie weitere Anwendungsgebiete*. 3. Auflage. Essen : Vulkan-Verlag, 1997. – 791 S
- [Arenz u. a. 2007] ARENZ, B. ; BERGER, W. ; BURG, A. ; ESSEL, R. ; FUHRMANN, T. ; GEISS, E. ; HÖLTERHOFF, J. ; JANITZ, N.: *Netzmeister / Technisches Grundwissen Gas - Wasser - Fernwärme*. 1. Auflage. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2007. – 746 S
- [Armbruster u. a. 2004] ARMBRUSTER, V. ; DUDDA, W. ; HAMMER, J. ; HÄFFELIN, H. ; HERRE, H. ; KILGER, B.-M. ; PLUM, H. ; RUOFF, H. ; SIEBER, A. ; WALDMANN, F.: *Hydrogeologische Erkundung Baden-Württemberg Enztal - Pforzheim*. Grundwasserdynamik, Grundwasserhaushalt, Grundwasserschutz. Mappe 3 / Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg. Freiburg i. Br., 2004. – 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. 2014] ARREGUI, F. J. ; GAVARA, F. J. ; SORIANO, J. ; COBACHO, R.: *Analysis of domestic water meters field performance*. In: *Proceedings of the IWA International Specialised Conference "Water Loss 2014"*. Wien, Österreich, April 2014
- [ATT u. a. 2005a] ATT ; BDEW ; DBVW ; DVGW ; DWA ; VKU: *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2005 / wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH*. Bonn, Dezember 2005. – Bericht
- [ATT u. a. 2005b] ATT ; BDEW ; DBVW ; DVGW ; DWA ; VKU: *Verbändeerklärung zum Benchmarking Wasserwirtschaft / ATT and BDEW and DBVW and DVGW and DWA and VKU*. Juni 2005. – Bericht
- [ATT u. a. 2008] ATT ; BDEW ; DBVW ; DVGW ; DWA ; VKU: *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008 / wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH*. Bonn, März 2008. – Bericht
- [ATT u. a. 2011] ATT ; BDEW ; DBVW ; DVGW ; DWA ; VKU: *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011 / wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH*. Bonn, Februar 2011. – Bericht

- [AWWA 2009] AWWA: *M36 Water Audits and Loss Control Programs*. American Water Works Association, 2009
- [Baur und Herz 2005] BAUR, R. ; HERZ, R.: Strategien und Prioritäten bei der Rehabilitationsplanung von Rohrleitungsnetzen. In: *energie / wasser-praxis* 56 (2005), Mai, Nr. 5, S. 2–7
- [BDEW 2010] BDEW: *Benchmarking: Lernen von den Besten – Leistungsvergleiche in der deutschen Wasserwirtschaft*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Februar 2010
- [Becker 2009] BECKER, A.: *Untersuchungen zum Einfluss von Inhibitoren auf die Lochkorrosion Typ I in Trinkwasser-Installationen aus Kupfer*, RWTH Aachen, Dissertation, Februar 2009
- [Berliner Wasserbetriebe 2008] BERLINER WASSERBETRIEBE: Geschäftsbericht 2007. Berlin, Januar 2008. – Bericht
- [Berndt u. a. 2001] BERNDT, D. ; BOGER, G. A. ; BORNIGER, R. ; DREWS, M. ; FRERICHS, U. ; LOEW, W. ; LOMOTT, M. ; LUDWIG, C. ; TURINSKY, R. ; RITTER, K. ; WECKENBROCK, P. ; WILLMROTH, G.: *Praxis der Wasserversorgung*. Bonn : wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, August 2001. – 369 S
- [Beros 1998] BEROS, M.: Ausführung von Trinkwasserbehältern in Frankreich. In: WILDERER, P.A. (Hrsg.) ; MERKL, G. (Hrsg.): *22. Wassertechnisches Seminar "Planung und Bau von Trinkwasserbehältern im Hinblick auf die europäische Normung"*, *Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft* Bd. 144, Technische Universität München, Oktober 1998, S. 33–62
- [BGBI 2011] BGBL: *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001)*. Bundesministerium der Justiz, 2011
- [Böhm 1993] BÖHM, A. ; MOSER, H. (Hrsg.): *Betrieb, Instandhaltung und Erneuerung des Wasserrohrnetzes*. Essen : Vulkan Verlag Essen, März 1993. – 81 S
- [BMJ 2011] BMJ: *Eichordnung*. Bundesministerium der Justiz, 2011
- [Bockwoldt 1987] BOCKWOLDT, D.: Löschwasserraten / Feuerwehr der Freien und Hansestadt Hamburg. Hamburg, Oktober 1987. – Bericht
- [Bonfig 2002] BONFIG, K. W.: *Technische Durchflussmessung*. 3. Auflage. Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2002. – 283 S
- [Bosseler u. a. 2001] BOSSELER, B. ; BENNERSCHIEDT, C. ; BARTEL, M. ; SCHMIEDENER, H.: Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwässerkanälen und -leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung | Endbericht März 2001 / Institut für unterirdische Infrastruktur (IKT). Gelsenkirchen, März 2001. – Bericht
- [Breitbach 2007] BREITBACH, M.: *Gütesicherung bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern*. Vortrag in Potsdam bei der Güteschutzgemeinschaft Betoninstandsetzung Berlin und Brandenburg e.V. Mai 2007. – URL <http://www.bgib.de/veroeffentlichungen/20070501breitbach.pdf>

- [Brucker u. a. 2008] BRUCKER, A. ; BERNARD, H. ; DORNAUF, H. ; GRUNERT, F. ; HOFMANN, F.: *Durchflussmesstechnik*. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008
- [Büschel 2010] BÜSCHEL, K.: Bemessung, Einbau und Betrieb von Wasserzählern. In: *energie / wasser-praxis* 61 (2010), Juli, Nr. 7/8, S. 64–66
- [BWV 2012] BWV: *Pressemitteilung Verbandsversammlung der Bodensee-Wasserversorgung*. Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung, November 2012. – URL www.zvbwv.de/fileadmin/user_upload/PDF/PM_13112012_Verbandsversammlung.pdf
- [Cabrera 2008] CABRERA, E.: El suministro de agua urbano en España. In: *Panel Científico Técnico de Seguimiento de la Política de Aguas en España. Fundación Nueva Cultura del Agua, Ministerio de Medio Ambiente* (2008). – URL <http://www.unizar.es/fnca/varios/panel/31.pdf>
- [Clark 2012] CLARK, A.: Increasing Efficiency with Permanent Leakage Monitoring. In: *Proceedings of the IWA Water Loss 2012 Conference*. Manila, Philippinen : International Water Association (IWA), Februar 2012
- [COSVega 2014] COSVEGA: *Auskunftssystem COSVega der Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG*. Februar 2014
- [Criminisi u. a. 2009] CRIMINISI, A. ; FONTANAZZA, C. M. ; FRENI, G. ; LA LOGGIA, G.: Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. In: *Water Science & Technology* 60 (2009), September, Nr. 9, S. 2373–82
- [Deutscher Bundestag 2006] DEUTSCHER BUNDESTAG: Bericht der Bundesregierung zur Modernisierungsstrategie für die deutsche Wasserwirtschaft und für ein stärkeres internationales Engagement der deutschen Wasserwirtschaft / Deutscher Bundestag. Berlin, März 2006. – Bericht. – URL <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/010/1601094.pdf>
- [DIN 1983] DIN: *DIN 4046 Wasserversorgung. Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e. V., September 1983
- [DIN 1992] DIN: *DIN 4049-1 Hydrologie; Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung e. V., Dezember 1992
- [DIN 1995a] DIN: *DIN 1319-1 Grundlagen der Meßtechnik. Teil 1: Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung e. V., Januar 1995
- [DIN 1995b] DIN: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. 1. Auflage. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1995. – 114 S
- [DIN 1998] DIN: *DIN EN 1508 Wasserversorgung. Anforderungen an Systeme und Bestandteile der Wasserspeicherung*. Deutsches Institut für Normung e. V., Dezember 1998
- [DIN 1999] DIN: *DIN V ENV 13005 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Deutsches Institut für Normung e. V., Juni 1999
- [DIN 2000a] 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., Oktober 2000

- [DIN 2000b] DIN: *DIN EN 805 Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden*. Deutsches Institut für Normung e. V., März 2000
- [DIN 2001] DIN: *DIN 1045-1 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton | Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Deutsches Institut für Normung e. V., Juli 2001
- [DIN 2005] DIN: *DIN EN 12502-5 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe. Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen - Teil 5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle*. Deutsches Institut für Normung e. V., März 2005
- [DIN 2010] DIN: *DIN 1054 Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*. Deutsches Institut für Normung e. V., Dezember 2010
- [DIN 2011] DIN: *DIN 18196 Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*. Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 2011
- [Drescher 2001] DRESCHER, G.: Trinkwasserbehälter aus Stahlbeton. In: WILDERER, P.A. (Hrsg.) ; MERKL, G. (Hrsg.): *25. Wassertechnisches Seminar "Wasserversorgung in der Zukunft unter besonderer Berücksichtigung der Wasser speicherung", Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft* Bd. 163, Technische Universität München, Oktober 2001, S. 193–236
- [DVGW 1981] DVGW: *Merkblatt W 610 Förderanlagen - Bau und Betrieb*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 1981
- [DVGW 1986] DVGW: *Merkblatt W 391 Wasserverluste in Wasserverteilungsanlagen | Feststellung und Beurteilung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Oktober 1986
- [DVGW 1989] DVGW: *Hinweis GW 125 Baumpflanzungen im Bereich unterirdischer Versorgungsanlagen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., März 1989
- [DVGW 1996] DVGW: *Merkblatt W 251 Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorgung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., August 1996
- [DVGW 1997] DVGW: *Technische Mitteilung W 401 Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 1997
- [DVGW 1998a] DVGW: *Arbeitsblatt W 395 Schadensstatistik für Wasserrohrnetze*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Juli 1998
- [DVGW 1998b] DVGW: *Merkblatt W 404 Wasseranschlußleitungen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., März 1998
- [DVGW 2000] DVGW: *Arbeitsblatt W 291 Reinigung und Desinfektion von Wasserverteilungsanlagen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., März 2000
- [DVGW 2003a] DVGW: *Arbeitsblatt W 392 Rohrnetzinspektion und Wasserverluste - Maßnahmen, Verfahren und Bewertung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 2003

- [DVGW 2003b] DVGW: *Arbeitsblatt W 406 Volumen- und Durchflussmessung von kaltem Trinkwasser in Druckrohrleitungen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Dezember 2003
- [DVGW 2004] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-1 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) / Teil 1: Planung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Oktober 2004
- [DVGW 2005] DVGW: *Merkblatt W 300 Wasserspeicherung - Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Juni 2005
- [DVGW 2006a] DVGW: *Arbeitsblatt W 400-3 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) / Teil 3: Betrieb und Instandhaltung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2006
- [DVGW 2006b] DVGW: *Arbeitsblatt W 645-3 Überwachungs-, Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen in Wasserversorgungsanlagen - Teil 3: Prozessleittechnik*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Februar 2006
- [DVGW 2007a] DVGW: *Arbeitsblatt W 410 Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., September 2007
- [DVGW 2007b] DVGW: *Schadensstatistik Wasser, DVGW 395, Anhang 4, Formblätter zur Schadenstatistik mit Erläuterungen*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2007
- [DVGW 2008] DVGW: *Arbeitsblatt W 1100 Benchmarking in der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., März 2008
- [DVGW 2009] DVGW: *Arbeitsblatt W 645-2 Überwachungs-, Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen in Wasserversorgungsanlagen - Teil 2: Steuern und Regeln*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Juni 2009
- [DVGW 2011] DVGW: *Arbeitsblatt GW 9 Beurteilung der Korrosionsbelastungen von erdüberdeckten Rohrleitungen und Behältern aus unlegierten und niedrig legierten Eisenwerkstoffen in Böden*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Mai 2011
- [DVGW 2012] DVGW: *Arbeitsblatt W 406 Volumen- und Durchflussmessung von kaltem Trinkwasser in Druckrohrleitungen - Auswahl, Bemessung, Einbau und Betrieb von Wasserzählern*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Januar 2012
- [Dworak u. a. 2007] DWORAK, T. ; BERGLUND, M. ; LAASER, C. ; STROSSER, P. ; ROUSSARD, J. ; GRANDMOUGIN, B. ; KOSSIDA, M. ; KYRIAZOPOULOU, I. ; BERBEL, J. ; KOLBERG, S. ; RODRÍGUEZ-DÍAZ, J. A. ; MONTESINOS, P.: *EU Water saving potential / Ecologic - Institute for International and European Environmental Policy*. Berlin, Juli 2007. – Bericht
- [EEA 2003] EEA: *Indicator Fact Sheet (WQ06) Water use efficiency (in cities): leakage*. European Environment Agency, 2003. – Bericht
- [EHLERS 2009] EHLERS: *RUBIN MeiStream, MeiStream Plus. Kaltwasser*. Herrmann Ehlers GmbH, Oktober 2009. – Produktdatenblatt.

- [Ehrenberg 1986] EHRENBERG, A. S. C.: *Statistik oder der Umgang mit Daten*. Weinheim : VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1986. – 344 S
- [Eichner 2003] EICHNER, L.: *Reorganisation des Auftragswesens eines Energieversorgungsunternehmens unter den veränderten Rahmenbedingungen des liberalisierten Strommarktes am Beispiel der Stadtwerke Flensburg GmbH*, Fachhochschule Flensburg, Diplomarbeit, Februar 2003
- [Eisenbeis u. a. 2002] EISENBEIS, P. ; LE GAT, Y. ; POULTON, M.: Schadensvorhersagemodelle und hydraulische Zuverlässigkeitsmodelle als Entscheidungshilfe bei der Sanierung. In: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN (Hrsg.): *Tagungsband der internationalen CARE-W Konferenz Computergestützte Rehabilitation von Wassernetzen*. Dresden, November 2002, S. 101–111
- [Ertelt u. a. 2009] ERTELT, S. ; HOBOM, S. ; RAU, L. ; RINK, W. ; RAMMELBERG, J.: *Buderus-Handbuch Grabenloser Einbau duktiler Gussrohre*. Wetzlar : Buderus Giesserei Wetzlar GmbH, Juli 2009. – 138 S
- [EU 2007] EU: Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union / Commission of the European Communities. Brüssel, Belgien, Juli 2007. – Bericht
- [EU 2012] EU: Water Scarcity and Droughts 2012 Policy Review Building blocks Non-Paper / European Commission. Brüssel, Belgien, 2012. – Bericht
- [EUREAU 2009] EUREAU: EUREAU Statistics Overview on Water and Wastewater in Europe 2008 / European Federation of National Associations of Water and Wastewater Services. Brüssel, Belgien, Juni 2009. – Bericht
- [EUREAU 2011] EUREAU: EUREAU Common Position Paper - Leakage Reduction in addressing Water Scarcity and Drought (final) / European Federation of National Associations of Water and Wastewater Services. Brüssel, Belgien, Juni 2011. – Bericht
- [EUROSTAT 2012] EUROSTAT: *Wassernutzungsbilanz*. Juni 2012. – URL http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_details/dataset?p_product_code=ENV_WATQSUM. – Webseite.
- [EWG 1974] EWG: *Richtlinie 75/33/EWG des Rates vom 17. Dezember 1974 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Kaltwasserzähler*. Europäische Wirtschaftsgemeinschaft, Dezember 1974
- [Fanner 2004] FANNER, P.: Assessing real water losses: a practical approach. In: *Water 21 - Magazine of the International Water Association* (2004), April, S. 49–50
- [Fanner u. a. 2007] FANNER, P. ; STURM, R. ; THORNTON, J. ; LIEMBERGER, R.: *Leakage Management Technologies*. Denver, Colorado : AWWA Research Foundation and US Environmental Protection Agency, 2007
- [Fantozzi u. a. 2006] FANTOZZI, A. ; LAMBERT, A. ; WALDRON, T.: Some international experiences in promoting the recent advances in practical leakage management. In: *Water Practice & Technology* 1 (2006), Nr. 2, S. 1 – 10

- [Fantozzi u. a. 2010] FANTOZZI, M. ; LAMBERT, A. ; LIEMBERGER, R.: Some Examples of European Water Loss Targets, and the Law of Unintended Consequence. In: *Proceedings of the IWA International Specialised Conference "Water Loss 2010"*. São Paulo, Brasilien, Juni 2010
- [Farley 2001] FARLEY, M. ; 'WATER SUPPLY AND SANITATION COLLABORATIVE COUNCIL (Hrsg.): *Leakage Management and Control*. Genf, Schweiz : World Health Organization, 2001. – 169 S
- [Farley und Trow 2003] FARLEY, M. ; TROW, S.: *Losses in Water Distribution Networks / A Practitioner's guide to Assessment, Monitoring and Control*. London, UK : IWA Publishing, April 2003. – 282 S
- [Feldtmann 1985] FELDTMANN, G.: Wassermessung - Wasserverluste. In: *3R international* 24 (1985), Januar/Februar, Nr. 1/2, S. 33–39
- [Fell und Papp 2010] FELL, C. ; PAPP, E. J.: Wasserverluste. In: *FORUM Gas Wasser Wärme* 7 (2010), Juni, Nr. 3, S. 6–10
- [FH Schmalkalden und Rödl & Partner 2011] FH SCHMALKALDEN UND RÖDL & PARTNER: Benchmarking der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Thüringen / Fachhochschule Schmalkalden. Schmalkalden, 2011. – Bericht
- [Fischer 2011] FISCHER, W.: *Rohrwerkstoffe im Wasserleitungsbau*. September 2011. – URL <http://www.fischer-ingenieurtechnik.de/Interessantes/Beispiele/Rohrwerkstoffe%20im%20Wasserleitungsbau/RohrwerkstoffeimWasserleitungsbau01.htm>. – Webseite.
- [Fuchs 2001] FUCHS, D.: *Decision Support Systeme für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen*. Graz, Österreich, Technische Universität Graz, Dissertation, November 2001
- [Fuchs-Hanusch u. a. 2008] FUCHS-HANUSCH, D. ; GANGL, G. ; KORNBERGER, B. ; KÖLBL, J. ; HOFRICHTER, J. ; KAINZ, H.: PiReM: Pipe Rehabilitation Management: Development Decision Support System for Rehabilitation Planning of Water Mains. In: *Water Practice & Technology* 3 (2008), Nr. 1, S. 1 – 10
- [Gaßmann und Gries 2009] GASSMANN, E. ; GRIES, A.: *Elektronische Druckmesstechnik*. München : Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2009
- [Gangl u. a. 2007] GANGL, G. ; KÖLBL, J. ; HAAS, G. ; HASSLER, E. ; FUCHS-HANUSCH, D. ; KAUCH, P.: Influence of Measurement Inaccuracies at a Storage Tank on Water Losses. In: *Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007'*. Bukarest, Rumänien : International Water Association (IWA), September 2007, S. 474–484
- [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
- [Glaeser u. a. 2006] GLAESER, K.-P. ; KASCHNER, R. ; LERNER, M. ; RODER, C. K. ; WEBER, R. ; WOLF, A. ; ZANDER, U.: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. / Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch-Gladbach, November 2006. – Bericht

- [Gras und Wolf 1970] GRAS, W.-D. ; WOLF, W.: Neuere Untersuchungsergebnisse über das Korrosionsverhalten von Rohren aus duktilem Gußeisen. In: *Rohre für Gas und Wasser - Fachgemeinschaft Gußeiserne Rohre (fgr) 5* (1970), S. 25–32
- [Greyvenstein und van Zyl 2005] GREYVENSTEIN, B. ; ZYL, J. E. van: An experimental investigation into the pressure leakage relationship of some failed water pipes. In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*. Halifax, Nova Scotia, Kanada : International Water Association (IWA), September 2005, S. 1–10
- [Gschleiner 2009] GSCHLEINER, R.: Ermittlung der Wasserverlustmenge. In: KAINZ, H. (Hrsg.): *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft - Wasserverluste in Trinkwassernetzen* Bd. Band 57 Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) und TU Graz (Veranst.), Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Juli 2009, S. B1 – B6
- [Haakh 2006] HAAKH, F.: 'Jahrhundertsommer' als Vorboten des Klimawandels - Wie sicher ist die Wasserversorgung in Baden-Württemberg? In: *Zweckverband Landeswasserversorgung LW-Schriftenreihe* (2006), Nr. 25, S. 42–57
- [Halfawy und Hunaidi 2008] HALFAWY, M.R. ; HUNAIDI, O.: GIS-based water balance system for integrated sustainability management of water distribution assets. In: *Proceedings of the 60th Annual Western Canada Water and Wastewater Association Conference (WCWWA)*. Regina, Saskatchewan, Kanada, September 2008, S. 1–16
- [Hamburg Wasser 2012] HAMBURG WASSER: *Zahlen zur Wasserversorgung: Versorgungsnetz in Zahlen*. November 2012. – URL <http://www.hamburgwasser.de/wasserversorgung-in-zahlen.html>. – Webseite.
- [Henning und Knöfel 2002] HENNING, O. ; KNÖFEL, D.: *Baustoffchemie / Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten*. 6. Auflage. Berlin : Huss Medien GmbH, Verlag Bauwesen, 2002. – 192 S
- [Herz 1995] HERZ, R.: Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - ein Kohortenüberlebensmodell. In: *Jahrbuch für Regionalwissenschaft 14/15. 1993/94*, Gesellschaft für Regionalforschung, 1995, S. 5–29
- [Herz 1996] HERZ, R.: Erneuerungsbedarfsprognosen für alternde Wasserrohrnetze. In: *bbr Wasser und Rohrbau* (1996), 12, Nr. 47, S. 25–32
- [Herz 2002] HERZ, R.: Software für strategische Rohrnetzrehabilitations- und -investitionsplanung. In: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN (Hrsg.): *Tagungsband der internationalen CARE-W Konferenz Computergestützte Rehabilitation von Wassernetzen*. Dresden, November 2002, S. 67–88
- [Heydenreich und Hoch 2008] HEYDENREICH, M. ; HOCH, W. ; DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES E.V. (DVGW) (Hrsg.): *Praxis der Wasserverlustreduzierung*. Bonn : wvgw, Mai 2008. – 208 S
- [Heydenreich und Kreft 2004] HEYDENREICH, M. ; KREFT, D.: Erfolgsfaktor Netzbewirtschaftung. In: *energie / wasser-praxis* 55 (2004), Dezember, Nr. 12, S. 84–87

- [Hirner und Merkel 2005] HIRNER, W. ; MERKEL, W.: *Kennzahlen für Benchmarking in der Wasserversorgung*. Bonn : wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2005. – 349 S
- [Hoch 1987] HOCH, W.: *Zuflußmessungen und Zuflußauswertungen nach dem Streubreitenverfahren zur Früherkennung von Leckstellen in Wasserrohrnetzen*. Stuttgart, Forschungs- u. Entwicklungsinstit. für Industrie- u. Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e.V. Stuttgart, Dissertation, Juni 1987. – Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 95, Kommissionsverlag R. Oldenbourg, München 1987
- [Hofmann 2008] HOFMANN, G.: Messverhalten überdimensionierter Wasserzähler in Wohngebäuden. In: *energie / wasser-praxis* 59 (2008), November, Nr. 11, S. 46–51
- [Hofmann und Schubert 2006] HOFMANN, G. ; SCHUBERT, P.: Messungen an überdimensionierten Hauswasserzählern. In: *energie / wasser-praxis* 57 (2006), Mai, Nr. 5, S. 26–29
- [Hofmann und Stefanski 2011] HOFMANN, G. ; STEFANSKI, F.: Trinkwasservolumenströme in Wohngebäuden. In: *gwf Wasser / Abwasser* 152 (2011), Oktober, Nr. 10, S. 958–963
- [Hug und Pielorz 2010] HUG, O. ; PIELORZ, M.: *Kennzahlenvergleich Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung Brandenburg / Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg*. Potsdam, Oktober 2010. – Bericht
- [Johnson und Vermersch 2011] JOHNSON, E. ; VERMERSCH, M.: IWA guidance for apparent loss reduction: filling the knowledge gap. In: *Water 21 - Magazine of the International Water Association* August 2011 (2011), August, S. 48–50
- [Karger u. a. 2008] KARGER, R. ; HOFFMANN, F. ; CORD-LANDWEHR, K.: *Wasserversorgung*. 13. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2008. – 323 S
- [Kelay u. a. 2008] KELAY, T. ; LUNDÉHN, C. ; VLOERBERGH, I. ; CHENOWETH, J. ; FIFESCHAW, C.: *Final Report | Stakeholder Interviews / Techneau*. Juni 2008. – Bericht
- [Kiesl 2009] KIESL, H.: *Benchmarking Wasserversorgung in Nordrhein-Westfalen*. Ergebnispräsentation, März 2009. – URL http://www.roedl-benchmarking.de/downloads/NRW_20090323_Ergebnisse_Kiesl.pdf. – Webseite.
- [Kilchmann u. a. 2004] KILCHMANN, A. ; KAMM, U. ; KOBEL, B. ; KEMPF, S. ; MARUGG, R. ; LOEFFEL, P. ; RIESEN, U. ; BAUMANN, R. ; OTT, W. ; RÜEGSEGGER, J. ; MÜLLER, E. ; SCHMID, F. ; SCHWEIZERISCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHS (SVGW) (Hrsg.): *Energie in der Wasserversorgung*. Zürich, Schweiz : Bundesamt für Energie BFE, Januar 2004. – 212 S
- [Kingdom u. a. 2006] KINGDOM, B. ; LIEMBERGER, R. ; MARIN, P.: *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries / The World Bank Group*. Washington DC, USA, Dezember 2006 (2). – Bericht
- [Kölbl 2008] KÖLBL, J.: Internationale Entwicklungen im Wasserverlustmanagement. In: *Tagungsband ÖVGW Symposium 2008*. Wien, Österreich : Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW), Januar 2008, S. 60–82

- [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
- [Knobloch und Klingel 2013] KNOBLOCH, A. ; KLINGEL, P.: Wassermengenbilanzierung als Basis für das Wasserverlustmanagement. In: *gwf Wasser / Abwasser* 154 (2013), November, Nr. 11, S. 1226–1233
- [Kopperschläger und Wenzel 2008] KOPPERSCHLÄGER, D. ; WENZEL, R.: Stadt Pforzheim – Verkehrsentwicklungsplan 2008: Verkehrliche Grundlagen zur Lärmaktionsplanung. Aalen, September 2008. – Bericht. (unveröffentlicht)
- [Korkmazer 2013] KORKMAZER, A.: *Ermittlung der Löschwasserentnahme aus Wasserversorgungsnetzen*. Esslingen, Hochschule Esslingen, Fakultät für Versorgungstechnik und Umwelttechnik, Bachelorarbeit, Februar 2013. – (unveröffentlicht)
- [Kottmann 1978] KOTTMANN, A.: *Über die Ursachen von Rohrbrüchen in Versorgungsleitungen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, Oktober 1978
- [Kottmann 1980] KOTTMANN, A.: Rohrbrüche - Jahreszeitliche Schwankungen der Bruchzahlen und die Bruchursachen. In: *gwf Wasser / Abwasser* 121 (1980), Februar, Nr. 2, S. 84–88
- [Kröfges 2009] KRÖFGES, W.: Leitungsnetze: Erneuerungsrate zu gering - Dramatischer Investitionsstau. In: *wwt / wasserwirtschaft wassertechnik* (2009), Oktober, Nr. 10
- [Kropp und Herz 2005] KROPP, I. ; HERZ, R.: Bewertung von Leitungsnetzen. In: *wwt / wasserwirtschaft wassertechnik* (2005), Mai, Nr. 5, S. 10–14
- [Laber 2010] LABER, Johannes: Wasserverluste in Trinkwassernetzen | Strategien zur Bekämpfung. In: *ökoprojekt* (2010), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich, Nr. 1, S. 1–4
- [Lambert 1994] LAMBERT, A.: Accounting for losses: The bursts and background concept. In: *Water and Environmental Management: Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* 8 (1994), April, S. 205–214
- [Lambert 2001] LAMBERT, A.: What do we know about pressure:leakage relationships in distribution systems? In: *Proceedings of the Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Management Systems*. Brno, Tschechische Republik : International Water Association (IWA), Mai 2001, S. 1–8
- [Lambert u. a. 1999] LAMBERT, A. ; 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
- [Lambert und Hirner 2000] LAMBERT, A. ; HIRNER, W.: Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures / International Water Association (IWA). London, UK, Oktober 2000. – Bericht
- [Laske 1978] LASKE, C.: Die Verluste im Wasserversorgungsnetz, ihre Ursachen und Möglichkeiten zu deren Verringerung. In: *gwf Wasser / Abwasser* 119 (1978), Januar, Nr. 1, S. 27–31

- [Lauruschkus u. a. 2006] LAURUSCHKUS, F. ; WEITZDÖRFER, A. ; VON HARDENBERG, J. ; BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN GAS- UND WASSERWIRTSCHAFT (BGW) (Hrsg.): *Vergleich Europäischer Wasser- und Abwasserpreise (VEWA)*. Berlin : wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2006. – 155 S
- [LeChevallier u. a. 2003] LECHEVALLIER, M. ; GULLICK, R. ; KARIM, M. ; FRIEDMAN, M. ; FUNK, J.: Pressure transients causing intrusion of contaminants into distribution systems. In: *Journal of Water and Health* 01 (2003), S. 3–14
- [Lehmann u. a. 2010] LEHMANN, P. ; MAYER, J. ; WEISS, M.: Energiemanagement beim Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung. In: *Wissensdurst* 5 (2010), Oktober, S. 14–21
- [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 McKenzie 2003] LIEMBERGER, R. ; MCKENZIE, R.: Aqualibre - A New Innovative Water Balance Software. In: *Proceedings of the IWA / AWWA International Conference Efficient Management of Urban Water Supply*. Teneriffa, Spanien, April 2003
- [Makar u. a. 2000] MAKAR, J.M. ; DESNOYERS, R. ; MCDONALD, S.E.: Failure modes and mechanisms in gray cast iron pipe / National Research Council Canada (NRCC). Ontario, Kanada, 2000. – Bericht
- [Makar 2000] MAKAR, John: A Preliminary Analysis of Failures in Grey Cast Iron Water Pipes. In: *Engineering Failure Analysis* 7 (2000), National Research Council Canada (NRCC), Institute for Research in Construction (NRC-IRC), Februar, S. 43–53
- [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. 2002] MCKENZIE, R. S. ; LAMBERT, A. O. ; KOCK, J. E. ; MTSHWENI, W.: Benchmarking of Leakage for Water Suppliers in South Africa - User Guide for the BENCHLEAK Model / South African Water Research Commission. Pretoria, Südafrika, Januar 2002. – Bericht
- [Meier u. a. 2003] MEIER, J. ; HIESSL, H. ; RUDOLPH, K. U.: Wirtschaftliche Möglichkeiten einer nachhaltigen Modernisierung der Wasserwirtschaft mit Hilfe der Fernablesung / Wasser- und Energieversorgung Kreis St. Wendel GmbH Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke. St. Wendel, Oktober 2003. – Schlussbericht
- [Merkel u. a. 2011] MERKEL, W. ; PETRY, D. ; WEISS, M.: Strukturelle Vergleichbarkeit von Wasserversorgungsunternehmen. In: *energie / wasser-praxis* 62 (2011), Januar, Nr. 1, S. 44–49

- [Merkl 2005] MERKL, G.: *Trinkwasserbehälter: Planung, Bau, Betrieb, Schutz und Instandsetzung*. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, Oktober 2005. – 360 S
- [Merkl 2008] MERKL, G.: *Technik der Wasserversorgung*. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008. – 680 S
- [Merkl 2011] MERKL, G.: *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Kap. Wasserspeicherung, S. 429–520. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011
- [Möhlen 1999] MÖHLEN, K.: *DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung. Band 2: Wassertransport und -verteilung*. Kap. Wassermessung, S. 299–331. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 1999
- [Misiunas 2005] MISIUNAS, D.: *Failure Monitoring and Asset Condition Assessment in Water Supply Systems*. Lund, Schweden, Lund University, Dissertation, November 2005
- [Möller u. a. 2009] MÖLLER, K. ; WICHMANN, K. ; MAUEL, R.: Kennzahlenvergleich der Wasserverbände in Schleswig-Holstein. In: *energie / wasser-praxis* 60 (2009), September, Nr. 9, S. 128–131
- [Morris Jr. 1967] MORRIS JR., R. E.: Principal causes and remedies of water main breaks. In: *Journal AWWA* 59 (1967), Juli, Nr. 7, S. 782–798
- [Moser 1999] MOSER, H.: *Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik Band 1: Rohrnetztechnik*. Essen : Vulkan Verlag Essen, 1999 (6). – 453 S
- [MUFV-RP 2009] MUFV-RP: Benchmarking Wasserwirtschaft Öffentlicher Abschlussbericht Benchmarking Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz / Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Abteilung Wasserwirtschaft, Referat 1031a. 2009. – Bericht
- [MUGV-BB 2010] MUGV-BB: Kennzahlenvergleich Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung Brandenburg / Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg. Potsdam, Oktober 2010. – Bericht
- [MUK-NI 2010] MUK-NI: Landesweiter Kennzahlenvergleich Wasserversorgung Niedersachsen / Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz. Hannover, Mai 2010. – Bericht
- [MUKE-BW 2012] MUKE-BW: Trinkwasserpreise (Entgelte) für Haushalts- und Kleingewerbekunden der baden-württembergischen Wasserversorger / Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg. Stuttgart, 2012. – Bericht
- [Mutschmann und Stimmelmayer 2011] MUTSCHMANN, J. ; STIMMELMAYER, F. ; BRENDEL, G. (Hrsg.): *Taschenbuch der Wasserversorgung*. 15. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011. – 931 S
- [Neunteufel u. a. 2008] NEUNTEUFEL, R. ; PERFLER, R. ; THEURETZBACHER-FRITZ, H. ; KÖLBL, J.: Explanatory factor Average Network Age Index (NAX) for mains failures and water losses. In: *Water Asset Management International* 4.2 (2008), Juni, S. 2–6

- [Niehues 2006] NIEHUES, B.: DVGW-Schadensstatistik Wasser: Ergebnisse aus den Jahren 1997 bis 2004. In: *energie / wasser-praxis* 57 (2006), Oktober, Nr. 10, S. 18–23
- [Nikolova 2011] NIKOLOVA, I.: Bulgaria to invest in water loss reduction. In: *EnergyOnline* (2011), November. – URL <http://energia-online.eu/2011/11/16/bulgaria-to-invest-in-water-loss-reduction/>. – Webseite
- [Oelmann u. a. 2009] OELMANN, M. ; GROWITSCH, C. ; KIESL, H. ; SCHIELEIN, J.: Vielfältige Chancen durch methodisch weiterentwickeltes Benchmarking. In: *gwf Wasser / Abwasser* 150 (2009), November, Nr. 11, S. 840–845
- [Osmancevic 2010] OSMANCEVIC, E.: Wasserverlustbekämpfung in der Praxis. In: *3R international* 49 (2010), August, Nr. 8-9, S. 455–460
- [Overath und Merkel 2004] OVERATH, H. ; MERKEL, W.: Kennzahlen für die Wasserversorgung | Feldtest des Kennzahlensystems der IWA | Nationales Teilprojekt Deutschland / IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH. Mülheim an der Ruhr, Mai 2004. – Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 02 WT 0224
- [Parker 2005] PARKER, J. M.: Leakage and the Link to Asset Management. In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*. Halifax, Nova Scotia, Kanada : International Water Association (IWA), September 2005
- [Pearson u. a. 2005] PEARSON, D. ; FANTOZZI, M. ; SOARES, D. ; WALDRON, T.: Searching for N2: how does pressure reduction reduce burst frequency? In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*. Halifax, Nova Scotia, Kanada : International Water Association (IWA), September 2005, S. 1–14
- [Pforzheim 2010] PFORZHEIM: Statistisches Jahrbuch der Stadt Pforzheim 2010 / Stadt Pforzheim. Pforzheim, März 2010 (55. Jahrgang). – Bericht
- [Plath und Wichmann 2009] PLATH, M. ; WICHMANN, K.: Energieverbrauch der deutschen Wasserversorgung. In: *energie / wasser-praxis* 60 (2009), Juli, Nr. 7+8, S. 54–55
- [Plath und Wichmann 2011] PLATH, M. ; WICHMANN, K.: DVGW-Information Wasser Nr. 77 zur Energieeffizienz. In: *energie / wasser-praxis* 62 (2011), Januar, Nr. 1, S. 58–60
- [ProWat 2008] PROWAT: Summaries of reports on non-revenue water in Belgium, Finland, France, Greece, Italy, The Netherlands and Turkey / ProWat. Ankara, Türkei, September 2008. – Bericht
- [Przygodda 2003] PRZYGODDA, J.: *Beitrag zur differenzierten sicherheitstechnischen Bewertung und Gestaltung moderner Rohrfernleitungsanlagen auf der Grundlage eines spezifischen Risikokonzeptes*. Halle (Saale), Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Dissertation, April 2003
- [Rathgeber 2012] RATHGEBER, S.: *Wasserverluste in deutschen Wasserversorgungssystemen*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Diplomarbeit (unveröffentlicht), Juni 2012
- [Rautenberg 2011] RAUTENBERG, J.: *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Kap. Wasserverteilung, S. 521–720. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011

- [Rödl & Partner 2010] RÖDL & PARTNER: Effizienz- und Qualitätsuntersuchung der kommunalen Wasserversorgung in Bayern (EffWB) 2010 / Rödl & Partner GbR. 2010. – Bericht
- [Rödl & Partner 2012] RÖDL & PARTNER: Kennzahlenvergleiche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Baden-Württemberg Ergebnisbericht für das Erhebungsjahr 2010 / Rödl & Partner GbR. Stuttgart, Februar 2012. – Bericht
- [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
- [Renaud u. a. 2011] RENAUD, E. ; LE GAT, Y. ; POULTON, M.: Using a break prediction model for drinking water networks asset management: From research to practice. In: *Proceedings of International Water Association 4th Leading Edge Conference on Strategic Asset Management (LESAM)*. Mülheim an der Ruhr, September 2011
- [Rieder 2009] RIEDER, A.: Technisches Risikomanagement - Risikoorientierte Rohrnetzbeurteilung. In: KAINZ, H. (Hrsg.): *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft - Wasserverluste in Trinkwassernetzen* Bd. 57 ÖVGW und TU Graz (Veranst.), Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Juli 2009, S. K1 – K20
- [Roscher u. a. 2000] ROSCHER, H. ; RAMMELSBERG, J. ; BRAUN, T. ; BRUSSIG, P. ; AHRENS, J. ; STILLER, B. ; RIEGE, U. ; WILDERMUTH, R. ; GERDES, K. ; ZECH, H. ; WEIGT, R. ; KLEINAU, A. ; ROSE, A. ; GEAEBELEIN, W. ; SOMMER, J. ; MÖLLER, W. ; SCHLOSSER, H.-U. ; BÄHME, A. ; KRÖFGES, W. ; ROSCHER, Harald (Hrsg.): *Sanierung städtischer Wasserversorgungsnetze*. 1. Berlin : Verlag Bauwesen, 2000. – 274 S
- [Roscher u. a. 2009] ROSCHER, H. ; RAMMELSBERG, J. ; BRUSSIG, P. ; BRAUN, T. ; ROSCHER, H. (Hrsg.): *Rehabilitation von Wasserversorgungsnetzen : Strategien - Verfahren - Fallbeispiele*. 2. Berlin : HUSS-MEDIEN GmbH, 2009. – 42 S
- [Roth 1998] ROTH, K.: Erhebung zu Schäden an Trinkwasserbehältern | Auswertung und Vergleich der Umfragen des DVGW und des LfW. In: WILDERER, P.A. (Hrsg.) ; MERKL, G. (Hrsg.): *22. Wassertechnisches Seminar "Planung und Bau von Trinkwasserbehältern im Hinblick auf die europäische Normung", Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft* Bd. 144. München : Technische Universität München, Oktober 1998, S. 163–200
- [Rötsch 1999] RÖTSCH, Dietmar ; (VDI), Verein Deutscher I. (Hrsg.): *Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen | Fernwärme und Wasser*. Dessau : Springer-Verlag, April 1999. – 551 S
- [Schrepfermann 2011] SCHREPFERMANN, B.: Instandsetzung des Hochbehälters Elkenroth/Neunkhausen für die Verbandsgemeinde Gebhardshain. In: *energie | wasser-praxis* 62 (2011), Mai, Nr. 5, S. 20–22
- [Schulze 1999] SCHULZE, D.: *Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, Band 1: Rohrnetztechnik*. Kap. Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern, S. 349–375. Essen : Vulkan Verlag Essen, 1999 (6)

- [Seago u. a. 2005] SEAGO, C.J. ; MCKENZIE, R. ; LIEMBERGER, R.: International Benchmarking of Leakage from Water Reticulation Systems. In: *Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*. Halifax, Nova Scotia, Kanada : International Water Association (IWA), September 2005
- [SI-STAT 1999] SI-STAT: *Hydro-engineering projects*. Siehe (SI-STAT, 1999). Mai 1999. – URL www.stat.si/letopis/1999/21_99/21-05-99.xls. – Webseite
- [SI-STAT 2012] SI-STAT: *Annual volume of water supplied from public water supply by statistical regions, Slovenia*. September 2012. – URL http://pxweb.stat.si/pxweb/Database/Environment/27_environment/03_27193_water/01_27501_public_water_supply/01_27501_public_water_supply.asp. – Webseite
- [Soiné u. a. 1998] SOINÉ, K. J. ; BAUR, A. ; DIETZE, G. ; MÜLLER, W. ; WEIDELING, D. ; DVGW (Hrsg.): *Handbuch für Wassermeister*. 4. München : R. Oldenbourg Verlag, 1998. – 392 S
- [Spirovska 2014] SPIROVSKA, S.: MOE-Austauschstipendium Abschlussbericht. Projekttitle: Entwicklung von angepassten Ansätzen zur Wasserverlustanalyse in der Trinkwasserversorgung / Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG). Karlsruhe, Februar 2014. – Bericht. (unveröffentlicht)
- [Sponagel u. a. 2005] SPONAGEL, H. ; GROTTENTHALER, W. ; HARTMANN, K.-J. ; HARTWICH, R. ; JANETZKO, P. ; JOISTEN, H. ; KÜHN, K.-J. ; TRIDL, R. ; SPONAGEL, Herbert [. (Hrsg.): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Stuttgart : Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2005
- [StBA 2009] STBA: Fachserie 19, Reihe 2.1, Heft 2007 Umwelt Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, September 2009. – Bericht
- [StBA 2013] STBA: Fachserie 19, Reihe 2.1.1, Heft 2010 Umwelt Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung / Statistisches Bundesamt Deutschland. Wiesbaden, Februar 2013. – Bericht
- [Stefanski 2002] STEFANSKI, F.: Fernablesung von Wasserzählern. In: *gwf Wasser / Abwasser* 143 (2002), Dezember, Nr. 13, S. 91–95
- [Stefanski 2007] STEFANSKI, F.: 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, F.: Dimensionierung von Wasserzählern für Wohngebäude. In: *gwf Wasser / Abwasser* 150 (2009), Januar, Nr. 1, S. 52–57
- [StLA-TH 2010] STLA-TH: Statistischer Bericht Umweltökonomische Gesamtrechnungen Basisdaten und ausgewählte Ergebnisse für Thüringen Ausgabe 2009 / Thüringer Landesamt für Statistik. Erfurt, August 2010. – Bericht
- [SWAN 2012] SWAN: *A Layered View of Data Technologies for the Water Distribution Network*. 2012. – URL http://www.swan-forum.com/uploads/5/7/4/3/5743901/swan_water_network_layers.pdf. – Webseite

- [SWB AG 2012] SWB AG: *Das große Fließen unter der Stadt*. November 2012. – URL <http://www.swb-gruppe.de/ueber-swb/unternehmen/trinkwassernetz.php>. – Webseite
- [SWP 2001] SWP: Geschäftsbericht der Stadtwerke Pforzheim 2000 / SWP Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG. Pforzheim, April 2001. – Bericht
- [SWP 2012a] SWP: Betriebsbericht 2012 / SWP Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG. Pforzheim, Oktober 2012. – Bericht
- [SWP 2012b] SWP: *Spatenstich für Erweiterung des Wasserwerks im Nagoldtal*. März 2012. – URL <http://www.stadtwerke-pforzheim.de/de/4017.php>. – Pressemitteilung
- [SWP 2013a] SWP: Geschäftsbericht 2012 SWP Stadtwerke Pforzheim / SWP Stadtwerke Pforzheim GmbH & Co. KG. Pforzheim, April 2013. – Bericht
- [SWP 2013b] SWP: *Manuelle Wasser- und Stromzählerablesungen der Jahre 2010 bis 2013*. 2013
- [SWP 2013c] SWP: *Weil es gut ist ... / Trinkwasser aus Pforzheim*. Juli 2013
- [Tardelli Filho 2004] TARDELLI FILHO, J.: *Controle e redução de perdas*. Kap. 10. São Paulo, Brasilien : Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004
- [Tennhardt 2012] TENNHARDT, L.: Realistische Bilanzierung von Wasserverlusten und die Anwendbarkeit von Wasserverlustkennzahlen. In: *energie / wasser-praxis* 63 (2012), Oktober, Nr. 10, S. 34–41
- [Teplitz-Sembitzky 2009] TEPLITZ-SEMBITZKY, W.: Technische und Wirtschaftliche Potenziale Windgetriebener Wasserentsalzung / Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Eschborn, Januar 2009. – Bericht
- [Theuretzbacher-Fritz u. a. 2006] THEURETZBACHER-FRITZ, H. ; NEUNTEUFEL, R. ; KÖLBL, J. ; PERFLER, R. ; M., Unterwainig ; R., Krendelsberger: Benchmarking und Best Practices in der österreichischen Wasserversorgung - Stufe B - Öffentlicher Abschlussbericht zum ÖVGW-Projekt 2005/06 / Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach. Wien, Mai 2006. – Bericht
- [Thornton und Lambert 2005] THORNTON, J. ; LAMBERT, A.: 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, J. ; STURM, R. ; KUNKEL, G.: *Water Loss Control*. 2. New York, USA : McGraw-Hill, 2008. – 632 S
- [Tsitsifli und Kanakoudis 2010] TSITSIFLI, S. ; KANAKOUDIS, V.: Presenting a new user-friendly tool to assess performance level and calculate the water balance of water networks. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Protection and Restoration of Environment (PRE10)*. Korfu, Griechenland, Juli 2010

- [UBA 2008] UBA: *Presseinformation Nr. 6/2008 - Schwere Altlast: Trinkwasserleitungen aus Blei jetzt vollständig austauschen*. Umweltbundesamt, Februar 2008. – URL <http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/verbraucher/ubapmblei.pdf>. – Webseite
- [UBA 2009] UBA: *Öffentliche Wasserversorgung*. Bundesumweltamt, Juni 2009. – URL <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2302>. – Webseite
- [UBA 2012] UBA: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011 / Umweltbundesamt*. Dessau-Roßlau, April 2012. – Bericht
- [UNICEF und WHO 2012] UNICEF ; WHO: *Progress on Drinking Water and Sanitation: 2012 Update / UNICEF and World Health Organization*. New York, USA, 2012. – Bericht
- [US EPA 2010] US EPA: *Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems*. Washington, D.C., USA: , United States Environmental Protection Agency (US EPA), November 2010
- [Vallejos Olivares 2009] VALLEJOS OLIVARES, P. A.: *Acoustic wave propagation and modeling turbulent water flow with acoustics for district heating pipes*. Uppsala, Schweden, Uppsala Universitet, Diplomarbeit, April 2009
- [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
- [VDI 2000] VDI: *Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude und Grundstücke*. Juli 2000
- [VEWIN 2010] VEWIN: *Dutch Drinking Water Statistics 2008 / Association of Dutch Water Companies (VEWIN)*. Rijswijk, Holland, Januar 2010. – Bericht
- [ÖVGW 2009] ÖVGW: *Richtlinie W 63 Wasserverluste in Trinkwasserversorgungssystemen*. Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW), Wien, Österreich, September 2009
- [Vogt 1998] VOGT, V.: *Betontechnische Ausführung von Trinkwasserbehältern im Hinblick auf Qualitäts- und Kostenaspekte*. In: WILDERER, P. A. (Hrsg.) ; MERKL, G. (Hrsg.): *22. Wassertechnisches Seminar "Planung und Bau von Trinkwasserbehältern im Hinblick auf die europäische Normung", Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft* Bd. 144. München : Technische Universität München, Oktober 1998, S. 201–256
- [Wasserversorgungsunternehmen Saarland 2012] WASSERVERSORGUNGSUNTERNEHMEN SAARLAND: *Die wichtigsten Themen zur Trinkwasserversorgung im Saarland*. 2012. – URL http://www.trinkwasser-im-saarland.de/fileadmin/fotos/TIS_Images/Dokumente/tis_website.pdf. – Webseite
- [Weckenbrock 2004] WECKENBROCK, P.: *Schadensprävention für Versorgungsleitungen / gemeinsame Initiative der Leitungsbetreiber*. In: *gwf Wasser / Abwasser* 145 (2004), März, Nr. 13, S. 26–30
- [Weiß 2011] WEISS, M.: *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Kap. Wasserförderung, S. 325–427. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011

- [Weimer 1999a] WEIMER, D.: *DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung, Band 2*. Kap. Wasserverluste, S. 403–429. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 1999
- [Weimer 1999b] WEIMER, D.: Technische und wirtschaftliche Bewertungskriterien für Wasserverluste. In: *gwf Wasser / Abwasser* 140 (1999), Nr. 13, S. 83–90
- [Weimer 2001] WEIMER, D.: Water loss management and techniques - German national report. Berlin, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), Oktober 2001. – Bericht für den IWA World Water Congress Berlin 2001
- [Wendt 2011] WENDT, G.: *Neuer Ansatz zur Untersuchung des Wasserzählerverhaltens unter realen Entnahmebedingungen*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Juni 2011. – URL [http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt1/nachrichten1/nachricht-aus-der-abteilung-1.html?tx_ttnews\[tt_news\]=888&tx_ttnews\[backPid\]=3049&cHash=5e98f833dcf36c070901f5e5fc216236](http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt1/nachrichten1/nachricht-aus-der-abteilung-1.html?tx_ttnews[tt_news]=888&tx_ttnews[backPid]=3049&cHash=5e98f833dcf36c070901f5e5fc216236). – Webseite
- [Wolf 1978] WOLF, W.: Korrosionsverhalten und Korrosionsschutz duktiler Gussrohre. In: *Rohre für Gas und Wasser - Fachgemeinschaft Gußeiserne Rohre (fgr)* 13 (1978), Februar, S. 21–28
- [Wossog u. a. 2008] WOSSOG, G. ; BERGER, P. W. ; HARDTKE, H.-H. ; KLAUSING, U.-J. ; KLEIN, N. ; MITTAG, U. ; MUSSMANN, J. ; NOWAK, K.-E. ; SCHARNBERG, W. ; SKERRA, B. ; SOMMERFELDT, P. ; WOSSOG, G. (Hrsg.): *Handbuch Rohrleitungsbau / Band 1: Planung, Erstellung, Errichtung*. Essen : Vulkan Verlag, 2008 (3. Auflage)
- [Zenner 2011a] ZENNER: *Hauswasserzähler*. ZENNER International GmbH & Co. KG, August 2011. – URL http://www.zenner.de/tl_files/content/AAA_Dokumente/Produkte/Hauswasserzaehler/MNK/KT_HWZ_DE_110804_W.pdf. – Webseite
- [Zenner 2011b] ZENNER: *Wohnungswasserzähler*. ZENNER International GmbH & Co. KG, August 2011. – URL http://www.zenner.de/tl_files/content/AAA_Dokumente/Produkte/Wohnungswasserzaehler/Einstrahl/KT_katalog_wohnungswasserzaehler_zenner.pdf. – Webseite
- [Zenner 2012] ZENNER: *ZENNER informiert: Informationen zur MID Measurement Instrument Directive*. ZENNER International GmbH & Co. KG, März 2012. – URL http://www.zenner.de/tl_files/content/AAA_Dokumente/Services/MID_neu_01032012_DE.pdf. – Webseite
- [Zoebel 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