

Reihe 15

Umwelttechnik

M.Sc. Gloria Sofia Robleto,
Magdeburg

Nr. 259

Simulation und Steuerung gekoppelter Wasser- und Strom- versorgungssysteme urbaner Ballungsräume



FernUniversität in Hagen
Schriften zur Informations-
und Kommunikationstechnik

Simulation und Steuerung gekoppelter Wasser- und Stromversorgungssysteme urbaner Ballungsräume

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades DOKTOR-INGENIEURIN

**der Fakultät für
Mathematik und Informatik
der FernUniversität
in Hagen**

**von
Gloria Sofía Robleto Domínguez**

Managua, Nicaragua

Hagen 2019

Eingereicht am: 07.04.2018

Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2018

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Wolfgang A. Halang
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 15

Umwelttechnik

M.Sc. Gloria Sofia Robleto,
Magdeburg

Nr. 259

**Simulation und
Steuerung gekoppelter
Wasser- und Strom-
versorgungssysteme
urbaner Ballungsräume**



FernUniversität in Hagen
**Schriften zur Informations-
und Kommunikationstechnik**

Robleto, Gloria Sofia

Simulation und Steuerung gekoppelter Wasser- und Stromversorgungs- systeme urbaner Ballungsräume

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 15 Nr. 259. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

240 Seiten, 101 Bilder, 67 Tabellen.

ISBN 978-3-18-325915-1, ISSN 0178-9589,

€ 81,00/VDI-Mitgliederpreis € 72,90.

Für die Dokumentation: Ballungsräume – Dynamische Prozessmodelle – Energie – Integrierte Modellierung – Materialflussanalyse – Steuerung – Transsektoral – Wasser

Mit wachsenden Bevölkerungszahlen in urbanen Ballungsräumen nimmt der Bedarf an begrenzten Ressourcen wie Wasser, Energie und Infrastrukturkapazitäten stetig zu. Dabei besteht die Gefahr, dass die Nachfrage das Angebot deutlich übersteigen kann. Es stellt sich die Frage, wie können begrenzte Ressourcen optimal bewirtschaftet werden, um die steigende Nachfrage zu decken und natürlichen Ressourcen zu schonen?

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieuren und Wissenschaftler im Bereich des integrierten Managements von Wasser- und Energieressourcen. In diesem Kontext stellt die Arbeit einen modellbasierten Ansatz vor, der die Beschreibung von Bedarfen, Kapazitäten und deren Verknüpfungen in sektoralen und transsektoralen Infrastrukturen und zugleich die Abbildung einzelner sektoraler Komponenten durch Prozessmodelle erlaubt. Der Ansatz wurde auf den Wasser- und Elektrizitätsinfrastrukturen der Stadt Lima (Peru) erprobt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Dissertation FernUniversität in Hagen
Fakultät für Mathematik und Informatik, 2019

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9589

ISBN 978-3-18-325915-1

Danksagung

Zunächst einmal möchte ich meinen beiden Betreuern Herrn Prof. Dr. Dr. Wolfgang Halang und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar für die Möglichkeit herzlich danken, zu dem Thema Ressourcen-Management in urbanen Ballungsräumen promovieren zu dürfen. Herrn Prof. Halang danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen und die konstruktive Kritik, die er mir und meiner Arbeit entgegengebrachte. Herrn Prof. Jumar danke ich für den Gestaltungsspielraum, den ich über viele Jahre als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Geschäftsfeld Wasser und Energie des ifak e.V in Magdeburg hatte. Diese Tätigkeit ermöglichte es mir, im Austausch mit Arbeitskollegen und nationalen und internationalen Experten anhand vieler Projektgespräche meine konzeptionellen Überlegungen zu der vorliegenden Arbeit zu überprüfen, fachliche Kenntnisse zu vertiefen und neue Erfahrungen zu sammeln. Ganz besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Jens Alex, Leiter des Geschäftsfelds Wasser und Energie, und Herrn Dr. Manfred Schütze für den wissenschaftlichen Austausch und Ihre wertvolle Unterstützung.

Diese Arbeit ist gewachsen durch viele inspirierende fachliche Diskussionen mit Freunden und Kollegen. An dieser Stelle möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Michael Ogurek, meinem Arbeitskollegen und Lebenspartner, für großzügige Unterstützung und Ermunterungen herzlich danken. Weiterhin danke ich dem Personal verschiedener Abteilungen des Wasserunternehmens SEDAPAL, des Energieunternehmens EDEGEL und der peruanischen Nichtregierungsorganisationen FOVIDA und Foro Ciudades para la vida herzlich für zahlreiche fachliche Diskussionen und persönliche Unterstützung sowie für die Bereitstellung von Daten und Informationen der komplexen Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen der Stadt Lima. Darüber hinaus möchte ich dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und der FernUniversität in Hagen für die Unterstützung im Rahmen des internen Forschungsförderprogramms SN3 danken. Ohne die Unterstützung aller im Folgenden genannten Personen, aber auch vieler weiterer, und Institutionen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen:

SEDAPAL

Dipl.-Ing. Eduardo Ismodes (Präsident a. D. des Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsunternehmens von Lima)

Dipl.-Ing. Josué Céspedes Alarcón (Planungs- und Investitionsabteilung)

Dipl.-Ing. José Nieto (Planungs- und Investitionsabteilung)

Dipl.-Ing. Cesar Bedón (Planungs- und Investitionsabteilung)

Dipl.-Ing. Iván Rodríguez (Planungs- und Investitionsabteilung)

Dipl.-Ing. Nancy Valer (Forschungs- und Innovationsabteilung)

Dipl.-Ing. Walter Molina (Forschungs- und Innovationsabteilung)

Dipl.-Geogr. Elmer Quinteros (Forschungs- und Innovationsabteilung)

Dipl.-Geogr. Wilfredo Aldave (Planungs- und Investitionsabteilung)

Dipl.-Kauffrau Yolanda Sanchéz (Forschungs- und Innovationsabteilung)
Dipl.-Inf. Enrique Cadenas (Kommunikations- und Medientechnologienabteilung)
Dipl.-Inf. Martin Gonzales (Kommunikations- und Medientechnologienabteilung)
Dipl.-Inf. Oswaldo Sucasaca (Kommunikations- und Medientechnologienabteilung)
Dipl.-Ing. Danilo Vergara (Trinkwasserversorgungsabteilung)
Dipl.-Ing. Rubén Palacios (Abwasserentsorgungsabteilung)
Dipl.-Biol. Sofia Basilio (Abwasserreinigungsabteilung)
Dipl.-Ing. Joel Ortiz (Abwasserreinigungsabteilung)

EDEGEL

Dipl.-Ing. Santiago Huamán (Energieerzeugungsabteilung)
Dipl.-Ing. Eddy Godoy (Energieerzeugungsabteilung)

FOVIDA

Ana María Tovar

Foro Cuidades para la vida

Architektin Liliana Miranda Sara

Einen ganz besonderen Dank und meine Entschuldigung für vielleicht zu viele verpasste Momente möchte ich meiner Tochter Luciana Ogurek aussprechen. Nicht zuletzt danke ich herzlich meiner Mutter Dora Domínguez, meinem verstorbenen Vater Manuel Robleto, meinen Brüdern Leonardo Robleto, Hugo Robleto, Manuel Robleto und Henry Robleto, meiner Schwiegermutter Bärbel Stichnoth und meinem Schwiegervater Dieter Stichnoth sowie allen meinen Freunden für die persönliche Unterstützung und ehrliche Freundschaft. Darüber hinaus möchte ich dem lieben Gott und der lieben Mutter Maria für die Kraft in den schwierigeren Momenten meines Lebens großartig danken.

Magdeburg, im April 2019

Gloria Sofía Robleto Domínguez

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	4
1.2	Beiträge der Arbeit.....	5
1.3	Aufbau der Arbeit.....	7
2	Wasser- und Energiesektoren im Kontext von Megastädten.....	8
2.1	Einführung	8
2.2	Wassersektor.....	8
2.3	Energiesektor	10
2.4	Interdependenzen zwischen dem Wasser- und Energiesektor	12
2.5	Studien über die Interdependenzen zwischen Wasser und Energie.....	13
2.6	Ansätze zur integrierten Analyse von Wasser und Energie	21
2.7	Zusammenfassung	28
3	Integrierte Modellierung transsektoraler Infrastrukturen	30
3.1	Einführung	30
3.2	Zielsetzung	30
3.3	Methodische Grundlagen	32
3.3.1	Graphentheorie	32
3.3.2	Materialflussanalyse.....	34
3.3.3	Dynamische Prozessmodelle.....	36
3.4	Modellierung von Quellen.....	37
3.5	Modellierung von Senken	42
3.6	Modellierung von Prozessen	43
3.7	Ressourcenbewirtschaftung und -verteilung	46
3.7.1	Problemstellung	46
3.7.2	Bewirtschaftung nach Priorisierung.....	46
3.7.3	Gleichmäßige Bewirtschaftung	48
3.7.4	Verteilung nach Priorisierung	48
3.7.5	Gleichmäßige Verteilung	49
3.8	Beispiele für Prozessmodelle	50
3.8.1	Prozessmodell für Endverbraucher	50
3.8.2	Kopplung von Prozess- mit Makromodellen	62
3.9	Generischer Ansatz zur Abflussregelung von Talsperrensystemen.....	70
3.10	Zusammenfassung	74
4	Integrierte transsektorale Modellierung der Wasser- und Elektrizitätsinfrastruktur der Stadt Lima	75
4.1	Einführung	75
4.2	Die Trinkwasserver- und Abwasserentsorgungssituation	75
4.2.1	Wassergewinnung und Trinkwasserversorgung	77

4.2.2 Trinkwasserverbrauch.....	84
4.2.3 Wasserverbrauch von Landwirtschaft und Gewerbe im Einzugsgebiet des Rimac	85
4.2.4 Abwasserentsorgung und Abwasserreinigung.....	85
4.3 Stromerzeugung	87
4.4 Anwendung des Ansatzes.....	89
4.4.1 Übersicht.....	89
4.4.2 Aufgabenstellung und Ziele.....	90
4.4.3 Exemplarisch gewählte Komponente, Prozesse, Volumen- und Stoffströme	92
4.4.4 Datengrundlage, Annahmen, exemplarisch gewählte Maßnahmen und Bewertungskriterien.....	94
4.4.5 Modellierung von Endverbrauchern	97
4.4.6 Stromversorgung und Stromverbrauch.....	103
4.4.7 Modellierung der häuslichen Abwasserströme auf Stadtbezirksebene ..	104
4.4.8 Modellierung der Abwasserströme der Nicht-Haushalte auf regionaler Ebene in Lima	108
4.4.9 Modellierung von Quellen: natürliche Ressourcen und Infrastrukturen ..	109
4.4.10 Bewirtschaftung und Verteilung von Wasser- und Energie- ressourcen auf Stadtbezirksebene in Lima	115
4.5 Diskussion der Ergebnisse	117
4.5.1 Ist-Zustand (2007 – 2013).....	117
4.5.2 Ergebnisse S1 ohne Maßnahmen (2014 – 2030)	134
4.5.3 Ergebnisse S2 mit Maßnahmen (2014 – 2030)	142
4.6 Zusammenfassung	151
5 Zusammenfassung und weiterführende Arbeiten	154
5.1 Zusammenfassung und Beiträge der Arbeit.....	154
5.2 Ausblick und weiterführende Arbeiten.....	157
6 Anhang.....	159
6.1 Anhang A.....	159
6.2 Anhang B	212
Literaturverzeichnis.....	216

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ANA	Autoridad Nacional del Agua (Nationale Wasserbehörde von Peru)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CONAM	Consejo Nacional del Ambiente (Nationale Umweltbehörde von Peru)
DAAD	Deutscher Akademischer Austauschdienst
DOE	U.S. Department of Energy
EDEGEL	Empresa de Generación de Energía Eléctrica S.A.A. (Erzeuger elektrischer Energie)
EIA	U.S. Energy Information Administration
GAO	U.S. Government Accountability Office
GEA	Grupo de Emprendimientos Ambientales (Gruppe von Umweltschutzunternehmen)
HSGSim	Hochschulgruppe Simulation
IEA	International Energy Agency
Ifak e.V.	Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg
IMP	Instituto Metropolitano de Planificación (Großstadtplanungsinstitut)
INEI	Instituto Nacinal de Estadísticas e Informática (Nationales Institut für Statistik und Information)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEM	Ministerio de Energía y Minas (Ministerium für Energie und Bergbau)
Mio.	Millionen
MML	Municipalidad Metropolitana de Lima (Großstadtbezirk Lima)
MVCS	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Ministerium für Wohnraum, Bau und Sanierung)
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Organ zur Überwachung von Investitionen in Energie und Bergbau)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Programm der Vereinten Nationen für die Umwelt)
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (Wasserver- und Abwasserentsorgungsunternehmen von Lima)
UNEP	United Nations Environmental Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
WWAP	United Nations World Water Assessment Programme
WHO	World Health Organization

Symbolverzeichnis

Größe	SI-Einheit	Bedeutung
A	km ²	Quadratkilometer
A	ha	Hektar
I	l	Liter
P	Watt	Leistung
N	mm/Monat	Niederschlag
V	m ³	Volumen
Q	m ³ /s	Abfluss/Durchfluss
Q	m ³ /d	Abfluss/Durchfluss
Q	km ³ /Jahr	Abfluss/Durchfluss
W	W	Watt

Größe	Bedeutung
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
cap	Pro Kopf
CSB	Gesamter chemischer Sauerstoffbedarf
d	Tag
EW	Einwohner
g	Gramm
gX/cap/d	Gramm der Fracht X pro Kopf und Tag
h	Stunde
h/d	Stunde pro Tag
HH	Privathaushalt
k	Kilo (10 ³)
kg	Kilogramm
l/cap/d	Liter pro Kopf und Tag
l/h	Liter pro Stunde
mg	Milligramm
m ³	Kubikmeter
M	Mega (10 ⁶)
p	Person
s	Sekunde
T	Tera (10 ¹²)

Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten hat sich weltweit die Migration weiter Bevölkerungsteile in urbanen Räumen stark beschleunigt und wird auch in Zukunft anhalten. Damit wird auch die Anzahl von Megastädten, also urbanen Ballungsräumen mit mehr als 10 Millionen Einwohnern, weiter ansteigen.

Mit wachsenden Bevölkerungszahlen nimmt der Bedarf an begrenzten Ressourcen wie Wasser, Energie, Fläche und Infrastrukturkapazitäten stetig zu und die Nachfrage übersteigt das Angebot bei Weitem. Die Herausforderungen an Planung und Management wasser- und energiewirtschaftlicher Infrastrukturen nehmen kontinuierlich zu, da begrenzte regionale und überregionale Ressourcen auf immer mehr Endverbraucher verteilt werden müssen.

Charakteristisch für Megastädte – gerade in Entwicklungsländern – ist die schnelle Bildung illegaler periurbaner Ansiedlungen. In diesen Ansiedlungen lebt ein großer Teil der Bevölkerung ohne Zugang zu sicheren Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen. Hinzu kommen die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdangebot.

Die oben genannten Fakten unterstreichen zum einem die unterschiedlichen Ver- und Entsorgungslagen in Bezug auf den Zugang zu sicherer Trinkwasser- und Energieversorgung und Abwasserentsorgung und zum anderen die Herausforderungen des Ressourcen-Managements in diesen urbanen Gebieten.

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen folgende Fragen:

- Wie können begrenzte Wasser- und Energieressourcen und Kapazitäten von Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen in urbanen Ballungsräumen optimal bewirtschaftet und verteilt werden, um die steigende Nachfrage vollständig zu decken und natürliche Ressourcen zu schonen?
- Welche Möglichkeiten bietet modellbasierte integrierte Analyse transsektoraler Infrastrukturen zur Entwicklung effizienter und nachhaltiger Nutzungskonzepte?

Ausgehend von der Methode der mathematischen Materialflussanalyse (MMFA) und der Prozessmodellierung zur integrierten Analyse transsektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen wurde ein modellbasierter Ansatz entwickelt, der die Beschreibung von Bedarfen, Kapazitäten und deren Verknüpfungen auf makroskopischer Ebene (sektorale und transsektorale Infrastrukturen) und zugleich die Abbildung einzelner sektoraler Komponenten (Endverbraucher, verfahrens-technische Anlagen) durch Prozessmodelle (Prozessebene) erlaubt. Eine Besonderheit der Methode liegt in der Entwicklung eines generischen Steuerungskonzepts zur Bewirtschaftung von

Kapazitäten und Deckung von Bedarfen. Damit lassen sich die MMFA und Prozessmodelle aufwandsarm koppeln und großskalige transsektorale Infrastruktursysteme integriert analysieren. Im Vergleich zur klassischen MFA und MMFA lassen sich mit dem hier vorgestellten Ansatz die schwierige Ermittlung von Transferkoeffizienten für Knoten, die für das betrachtete System die Verteilung von Ressourcen realisieren, zu jedem Zeitpunkt automatisch bestimmen. Darüber hinaus erlaubt der Ansatz – im Gegensatz zur integrierten Berücksichtigung und Analyse transsektoraler wasser- und energiewirtschaftlicher Infrastrukturen angewendeter Ansätze – die raum-zeitliche Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen und die Quantifizierung transsektoraler Wechselwirkungen.

Weiterhin wurde die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit eines Regelungsalgorithmus aus dem Kanalnetzbereich zur bestmöglichen Bewirtschaftung der Wasserabgaben aus Talsperrensystemen untersucht. Durch Erprobung dieses neuen und vielversprechenden Ansatzes trägt diese Arbeit zum Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Talsperrenbewirtschaftung bei.

Für die Modellierung der Endverbraucher wurden neue Prozessmodelle entwickelt. Mittels des neuen Ansatzes zur Modellierung von Endverbrauchern in Privathaushalten lassen sich zum einen treibende Faktoren des Ressourcenbedarfs und der Ressourcenentsorgung durch die Abbildung von Ressourcenbedarfs- und Ressourcenentsorgungsmustern und zum anderen beliebige Bevölkerungsstrukturen in beliebigen Detailgraden modellieren.

Der Ansatz wurde auf die Wasser- und Elektrizitätsinfrastrukturen der Stadt Lima (Peru) in Abstimmung mit den peruanischen Ver- und Entsorgungsunternehmen SEDAPAL (Wasser) und EDEGEL (Energie) angewendet. Mittels eines transsektoralen Modells wurden die Wasser-, Abwasser- und Energieströme auf regionaler Ebene für einen Zeitraum von 23 Jahren in Monatsschritten analysiert. Im Rahmen von zwei Szenarien wurden mögliche Auswirkungen zukünftiger Bevölkerungsentwicklungen und klimatischer Änderungen sowie die Wirksamkeit technischer und nicht-technischer Maßnahmen auf die zukünftige Wasser- und Stromversorgung und auf die Abwasserentsorgung und -reinigung der Stadt untersucht. Es zeigte sich, dass die Implementierung verschiedener Maßnahmen zu positiven Effekten sowohl auf der Seite der Nachfrage als auch des Angebotes führen können.

Abstract

In the last decades, the migration of large parts of the world population in urban areas has accelerated and will continue in the future. As a result, the number of megacities, i.e. urban agglomerations with more than 10 million inhabitants, will continue to increase.

As the population grows, the need for limited resources such as water, energy, space and infrastructure capacities continues to increase and demand substantially exceeds supply. The challenges of planning and managing water and energy infrastructures are constantly increasing, as limited regional and supra-regional resources have to be allocated to an increasing number of end users. A characteristic feature of megacities – especially in developing countries – is the rapid formation of illegal peri-urban settlements. A large part of the population lives in these settlements without access to safe supply and disposal infrastructures. In addition, there are the effects of climate change on water resources.

The above facts underline the different supply and disposal situations with regard to access to safe drinking water and energy supply and wastewater collection on the one hand and the challenges of resource management in these urban areas on the other.

The following questions are at the heart of this work:

- How can limited water and energy resources and capacities of supply and disposal infrastructures in urban agglomerations be optimally managed and allocated in order to fully meet the growing demand and conserve natural resources?
- What possibilities does model-based integrated analysis of trans-sectoral infrastructures offer for the development of efficient and sustainable use concepts?

Based on the method of mathematical material flow analysis (MMFA) and process modelling for the integrated analysis of trans-sectoral supply and disposal infrastructures, a model-based approach was developed. It allows the description of demands, capacities and their links at the macroscopic level (sectoral and trans-sectoral infrastructures), and at the same time the illustration of individual sectoral components (end users, process engineering plants) using process models (process level). A special feature of this method is the development of a generic control concept for the management of capacities and coverage of demands. In this way, MMFA and process models can be coupled with low effort, and large-scale trans-sectoral infrastructure systems can be analysed in an integrated manner. In comparison to classical MFA and MMFA, the approach presented here allows the difficult determination of

transfer coefficients for nodes that automatically realise the allocation of resources for the system under consideration at any time. In contrast to the approaches applied for the integrated consideration and analysis of trans-sectoral water and energy infrastructures, the approach also allows the spatio-temporal accounting of material and energy flows and the quantification of trans-sectoral interactions.

In addition, the transferability and applicability of a control algorithm from the domain of sewer networks was investigated for the best possible management of water discharges from reservoir systems. By testing this new and promising approach, this work contributes to the state of the art of science and technology in the field of managing water reservoirs.

With a newly developed approach for modelling end users in private households, driving factors of resource demand and resource disposal can be identified by modelling resource demand and resource generation patterns on the one hand and by modelling any population structures in any degree of detail on the other.

The approach was applied to the water and electricity infrastructures of the city of Lima (Peru) in coordination with the Peruvian supply and disposal companies SEDAPAL (water) and EDEGEL (energy). A trans-sectoral model was used to analyse water, wastewater and energy (electricity) flows at the regional level in monthly increments over a time period of 23 years. Within the framework of two scenarios, possible effects of future population developments and climatic changes as well as the effectiveness of technical and non-technical measures on the future water and electricity supply and on the wastewater collection and treatment were examined. It was shown that the implementation of various measures can have positive effects both on demand and supply.

1 Einleitung

Durch den Wunsch nach Partizipation an höheren Lebensstandards beschleunigt sich weltweit die Migration großer Bevölkerungsteile in die Städte. Laut [1] lebten 1950 30 % der Weltbevölkerung in urbanen Gebieten, und bis 2014 ist der Anteil auf 50 % (ca. 3,9 Milliarden Menschen) angestiegen. Folgt man der Definition von [2], wonach Megastädte urbane Ballungsräume sind, die mehr als 10 Millionen Einwohner haben, so bestehen nach [3] derzeit 37 Megastädte.

Mit dem Bevölkerungswachstum nimmt die Nachfrage nach Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Energieversorgung und Fläche stetig zu. Ressourcen wie Wasser und Energieträger sind nur in begrenzter Menge und Qualität verfügbar und sind, wenn überhaupt, auch nur begrenzt regenerativ. Gerade in Megastädten, in denen die Bevölkerungszahlen rasch steigen, müssen regionale und überregionale Ressourcen in Zukunft auf immer mehr Verbraucher verteilt werden. Charakteristisch für Megastädte – gerade in Entwicklungsländern – ist die schnelle Bildung und Ausbreitung illegaler peripherer Ansiedlungen. In diesen Ansiedlungen lebt ein Großteil der Bevölkerung ohne ausreichenden Zugang zu Trinkwasser, Sanitäreinrichtungen und Energie.

Zur Ressourcengewinnung, -aufbereitung und -verteilung errichtete Infrastrukturen erfordern hohe Investitionskosten und sollen über lange Zeiträume hinweg betrieben werden. Aufgrund unzureichender finanzieller Mittel und mangelnder Kapazitäten der Verwaltungssysteme werden aber Infrastrukturen zur Ver- und Entsorgung nicht in notwendigem Maße gebaut, bestehende Infrastrukturen nur ungenügend instand gehalten, und – als direkte Folge – nur ineffizient betrieben. So sind Planung und Betrieb von Wasser- und Energiesystemen stets mit veränderlichen Randbedingungen wie Bevölkerungsmigration und der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher und technischer Ressourcen konfrontiert. Weitere Faktoren sind der erwartete klimatische Wandel sowie politische und soziale Entwicklungen, wobei die festzustellenden Einflüsse regional unterschiedlich relevant sind.

Die Sektoren Wasser und Energie sind eng miteinander verknüpft und aufgrund der großen Anzahl von Komponenten und Prozessen zur Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung, Sammlung, Behandlung und Ableitung von Ressourcen sehr komplex. In Anbetracht schwankender Bevölkerungszahlen und der zu erwartenden klimatischen Änderungen wird deutlich, dass klassische Methoden der Planung, des Managements und der Betriebsführung in Zukunft verstärkt Unterstützung benötigen werden, um Ver- und Entsorgungsinfrastruktursysteme der Sektoren Wasser und Energie vor allem in Megastädten bestmöglich zu entwickeln und zu betreiben. Voraussetzungen dafür sind, ein besseres Verständnis für die Interdependenzen zu schaffen und sekt-

orale und transsektorale Wechselwirkungen zu quantifizieren. Weitere Voraussetzungen sind, treibende Faktoren des Ressourcenbedarfs und der Ressourcenentsorgung der Endverbraucher und die damit verbundenen Stoff- und Energieströme in Städten besser zu verstehen. Um planerische Aufgaben bestmöglich zu unterstützen sowie mögliche Änderungen von Stoff- und Energieströmen – bedingt durch die intrinsische Dynamik ihrer Interdependenzen und externen Bedingungen – über die Zeit untersuchen zu können, müssen verschiedene temporäre Auflösungen (z. B. Tage, mehrere Jahrzehnte) in der Analyse berücksichtigt werden. Daher ist es geboten, die Entwicklung und Anwendung „neuer Ansätze“ zur Unterstützung integrierter Analyse, Planung und des Managements der Sektoren Wasser und Energie weiter voranzutreiben.

Jüngere Studien zu den Interdependenzen haben die Bedeutung und Potenziale integrierter Betrachtung der Sektoren Wasser und Energie aufgezeigt. Auffällig ist, dass sich die Studien auf Ermittlung und Darstellung des Ist-Zustandes beschränkten, temporale Aspekte kaum berücksichtigt wurden und Änderungen im Verhalten der Interdependenzen und der sektoralen und transsektoralen Wechselwirkungen infolge variierender Randbedingungen nicht quantifiziert wurden. Bei den Studien wurden die Interdependenzen zumeist hinsichtlich ökologischer Kriterien bewertet, während technische und politische Kriterien an zweiter bzw. dritter Stelle lagen. Soziale Kriterien lagen an vorletzter Stelle. Wirtschaftswissenschaftliche Kriterien spielten kaum eine Rolle. Bewertung der Interdependenzen hinsichtlich verschiedener Kriterien kann zur Überwindung bestehender Hindernisse bei der Definition und Umsetzung integrierter Management- und Politikstrategien sowie bei der integrierten Planung der Sektoren Wasser und Energie beitragen.

Einzelne Komponenten urbaner Wassersysteme (zur Wassergewinnung und Trinkwasserverteilung bzw. zur Abwassersammlung und -reinigung) und Energiesysteme (zur Primärenergiegewinnung, Stromgewinnung und -verteilung) werden in der Regel detailliert und individuell unter Nutzung von Prozessmodellen simulationsgestützt betrachtet. Nutzung dynamischer Prozessmodelle ist in der Wasserwirtschaft Stand der Technik. In einer Studie [4] zur integrierten Modellierung urbaner Wassersysteme wurde darauf hingewiesen, dass die Anforderungen an Umfang und Güte von Daten, Einschränkungen in der Computerhardware und institutionelle Hindernisse die integrierte Modellierung urbaner wasserwirtschaftlicher Systeme erheblich erschweren.

Eine zur integrierten Modellierung urbaner Wassersysteme vergleichbare Situation findet sich im Bereich der integrierten Modellierung und Analyse transsektoraler Infrastrukturen. Hier sind die entwickelten Ansätze zumeist auf die Perspektive und Interessen eines Sektors begrenzt, wobei diese Tendenz bereits in einer Studie [5] über einen systemischen Rahmen und die Analyse urbaner Wasser und Energie kritisiert wurde. Die Darstellung von Prozessen basiert hier prinzipiell auf vereinfachten

Modellvorstellungen. Systemparameter (zeitabhängige Parameterfunktionen, Einzelparameter), also die Größen, die das Verhalten eines Systems charakterisieren, werden in der Regel auf Grundlage von Messdaten und daraus abgeleiteten Koeffizienten berechnet. Systemvariablen werden in ähnlicher Weise abgeschätzt. Aussagen über den Systemzustand können so nur bedingt getroffen werden. Die Antwort eines Systems auf Änderungen technischer, natürlicher, demographischer oder betrieblicher Bedingungen und der Zustand danach werden nicht erfasst. Dies erfordert jedoch eine detaillierte Abbildung eines Systems. Hier bietet sich die Nutzung mathematischer Prozessmodelle an.

Gemäß der Bedeutung des skizzierten Spannungsfeldes ist in den letzten zwei Dekaden die Entwicklung vielfältiger Lösungsansätze zu verzeichnen. Vor dem Hintergrund der dynamischen Entwicklungen und den daraus resultierenden vielfältigen Infrastrukturproblemen in Megastädten hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bereits im Jahr 2004 das Forschungsprogramm „Forschung für die nachhaltige Entwicklung der Megastädte von morgen“ ausgeschrieben. Thematische Schwerpunkte der Projekte waren die Sektoren Wasser, Abfall und Energie sowie Mobilität und Ernährung. Im Rahmen des Programms sollten integrierte Planungs- und Managementkonzepte, die zu einer nachhaltigen Entwicklung zukünftiger Megastädte beitragen können, eruiert und exemplarisch umgesetzt werden. Eines der im Rahmen dieses Forschungsprogramms geförderten Projekte mit dem Titel „Nachhaltiges Management von Wasser und Abwasser in urbanen Wachstumszentren unter Bewältigung des Klimawandels – Konzepte für Lima Metropolitana (Perú) „LiWa“ befasste sich mit der Erarbeitung von Konzepten für nachhaltiges Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsmanagement der Megastadt Lima (Perú). Darüber hinaus stand im Mittelpunkt des Projekts die Untersuchung und Bilanzierung von Wasser- und Abwasserströmen und der Auswirkungen des Klimawandels auf das zukünftige Wasserressourcenmanagement der Stadt. Einen wichtigen Baustein zur integrierten Analyse der Infrastrukturen des Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungs-systems stellten Modellierung und Simulation dieser komplexen Systeme dar, worin sich auch die vorliegende Arbeit eingliedert.

Zur Unterstützung der nachhaltigen Nutzung und des Schutzes von Wasserressourcen unterstützte das BMBF bereits im Jahr 2004 im Rahmen der Fördermaßnahme „Integriertes Wasserressourcen-Management“ zahlreiche interdisziplinäre Forschungsprojekte auf verschiedenen Kontinenten (Asien, Afrika, Europa, Nahost). Hierbei wurden Planungsinstrumente auf Grundlage bewährter Verfahrensweisen und wissenschaftlicher Ansätze zur Unterstützung von Entscheidungen im Kontext des Integrierten Wasserressourcen-Managements (IWRM) entwickelt. Dazu gehörten Simulationsmodelle, datenbasierte Informationssysteme, Entscheidungswerkzeuge, integrative Systeme zur Entscheidungsfindung und Wissensplattformen.

Das ebenfalls vom BMBF geförderte Projekt „Rapid Planning“ (Nachhaltiges Infrastruktur-, Umwelt- und Ressourcenmanagement für hochdynamische Metropolregionen) befasst sich mit der Entwicklung einer transsektoralen Methodik als Hilfsinstrument für die integrierte Planung von Versorgungs- und Entsorgungsinfrastrukturen am Beispiel der Sektoren Wasser, Abwasser, Energie, Abfall und urbane Landwirtschaft in drei schnell wachsenden Städten: Da Nang (Vietnam), Kigali (Ruanda) und Frankfurt am Main (Deutschland). Hierfür bilden wiederum die Methoden der Modellierung und Simulation einen Grundpfeiler zur ganzheitlichen Analyse von Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen.

Auch wenn der potenzielle Nutzen der integrierten Modellierung an sich allgemein anerkannt ist, hat diese Methode bisher keine breite Anwendung erfahren bzw. wurde noch nicht auf sehr große Systeme (transsektorale Infrastruktursysteme) angewendet. Die integrierte Modellierung von Prozessen in Wasser- und Energiesystemen wird beispielsweise nur für einzelne Systemkomponenten angewendet. Eine Ausnahme bildet die mathematische Materialflussanalyse (MMFA), mit der Stoff- und Energieströme, auch großer Infrastruktursysteme, in Form von Stoffstrommodellen dargestellt werden. Ein Stoffstrommodell, insbesondere nach der klassischen Materialflussanalyse, dient jedoch primär als Visualisierungskonzept der Ergebnisinterpretation und als Grundlage für die Darstellung von Planungs- und Managementmaßnahmen – Untersuchungen des Systemverhaltens an sich sind nicht oder nur begrenzt möglich.

1.1 Zielsetzung

Angesicht der offensichtlichen Notwendigkeit, Ressourcen in Megastädten effizienter zu bewirtschaften, stehen Bilanzierung, Bewirtschaftung und Verteilung von Stoff- und Energieströmen in integrierten transsektoralen Infrastrukturen im Mittelpunkt dieser Arbeit.

Ziel ist die Entwicklung einer Methode in Anlehnung an die mathematische Materialflussanalyse, welche integrierte Modellierung und Simulation großmaßstäblicher transsektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen in den Bereichen Wasser, Abwasser und Energie erlaubt. Integraler Bestandteil der Methode ist die Nutzung anerkannter sektorspezifischer mathematischer Prozessmodelle. Hierbei sollen innerhalb transsektoraler Infrastruktursysteme die Bedarfe und Kapazitäten natürlicher und technischer Ressourcen (makroskopische Ebene) bei gleichzeitiger Abbildung einzelner sektoraler Systemkomponenten auf der Prozessebene verknüpft werden. Damit werden die Möglichkeiten der mathematischen Materialflussanalyse und der Prozessmodellierung kombiniert. Wesentliche Aspekte sind die Berücksichtigung variierender Randbedingungen wie der dynamischen Eigenschaften einzelner Komponen-

ten (z. B. Zustände), von Bevölkerungszahlen, des Ressourcendargebots und Endverbraucherverhaltens sowie die Implementierung von Management- und Betriebsstrategien. Hinzu kommen die Quantifizierung der Wechselwirkungen sektoraler und transsektoraler Infrastrukturen sowie die Möglichkeit, unterschiedliche Zielgruppen (Forschungsgemeinschaft, Personal von Planungs- und Betriebsebene) in der Anwendung eines Modells zusammenzuführen.

Gemäß der Zielsetzung sind Automatisierungskonzepte von Teilsystemen, mit Ausnahme der Talsperrenbewirtschaftung, nicht Gegenstand der Arbeit. Das Schwerpunkt liegt auf der Steuerung von Stoff- und Energieströmen zur bestmöglichen Deckung von Bedarfen sowie auf der Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen und der Auslastung von Infrastrukturen unter Berücksichtigung ihrer Kapazitäten.

1.2 Beiträge der Arbeit

In [6] wurde der Bedarf an einem besseren Verständnis für die Interdependenzen (z. B. durch Generierung umfassender Daten) und der engen institutionellen Zusammenarbeit zur besseren Planung von Wasser- und Energieressourcen hervorgehoben. Der Bedarf an integrierten Analysen mittels modellbasierter Ansätze bzw. Modellierungsplattformen wurde in [7] hervorgehoben, um verschiedene Infrastrukturen von Wasser- und Energiesystemen integriert zu betrachten, um wichtige Eigenschaften der Systemkomponenten zu erfassen und Informationen zwischen ihnen auszutauschen sowie um Entscheidungsfindungsprozesse zu unterstützen. Weiterhin haben [8] und [5] darauf hingewiesen, dass nur sehr wenige Forschungsansätze und Simulationswerkzeuge die integrierte Analyse trans-sektoraler Infrastrukturen ermöglichen, und den Bedarf an vereinheitlichenden Ansätzen hervorgehoben. Zusätzlich merken [8], [9] und [7] den Bedarf zur Berücksichtigung verschiedener zeitlicher Skalen an. Von [10] wurde festgestellt, dass Daten und Informationen über Stoff- und Energieströme in urbanen Gebieten extrem begrenzt bzw. unzureichend dokumentiert sind. In [7] wurde der Bedarf an verlässlichen Daten und Informationen zur Unterstützung von Entscheidungsfindungsprozessen unterstrichen.

Der wesentliche Beitrag dieser Arbeit liegt im Entwurf eines modellbasierten Ansatzes zur integrierten Betrachtung und Analyse großskaliger sektoraler und transsektoraler Infrastruktursysteme. Der Ansatz greift die bereits in [11] vorgeschlagene Integration von Prozessmodellen in die mathematische Materialflussanalyse (MMFA) auf und entwickelt sie durch die Anwendung eines generischen Konzepts zur Bewirtschaftung von Ressourcenkapazitäten und zur Deckung von Bedarfen in transsektoralen Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen weiter. Dabei leistet die Arbeit aus sektoraler und transsektoraler Sicht und aus Sicht der Systemtreiber die folgenden Beiträge.

Sektorale und transsektorale Sicht

Die Nutzung des modellbasierten Ansatzes, inklusive des generischen Steuerungskonzepts, ermöglicht ein besseres Verständnis der temporalen Interdependenzen und Wechselwirkungen in gekoppelten Wasser- und Energiesystemen. Grundlage dafür ist die Verwendung von Prozessmodellen für einzelne Systemkomponenten und die darauf basierende Darstellung von Systemzuständen. Das erlaubt weitergehende Optimierungen der Bewirtschaftung und Aufteilung von Wasser- und Energieressourcen. Konkret lässt sich die Wirksamkeit von Maßnahmen innerhalb einzelner Sektoren aus einer transsektoralen Perspektive und hinsichtlich sozialer, ökologischer, betrieblicher und technischer Kriterien untersuchen und bewerten. Potenzielle Synergien bei den Bewirtschaftungszielen der einzelnen Sektoren können identifiziert werden. Des Weiteren seien noch die folgenden Punkte herausgestellt:

- Realistische Beschreibung von Zuständen sektoraler Systemkomponenten
- Darstellung des makroskopischen Systemverhaltens für unterschiedliche Zeitskalen
- Nutzung prozessspezifischer Modellansätze mit unterschiedlicher Komplexität
- Ableitung erforderlicher Kapazitäten und potenzieller Bedarfe
- Bilanzierung von Stoff- und Energieröumen auf makroskopischer Ebene
- Bilanzierung von Stoff- und Energieröumen auf mikroskopischer Ebene
- Generierung von Daten und Informationen über Stoff- und Energieröume
- Bereitstellung einer Diskussionsplattform, die die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Nutzerschichten (Betriebsführung, Management und Planung) und sektoraler Experten an einem transsektoralen Modell zusammenzuführen

Systemtreiber (Endverbraucher)

Endverbraucher und deren Ressourcenbedarf und -entsorgung stellen die Treiber für die Bewirtschaftung natürlicher und technischer Ressourcen und die Flüsse von Stoff- und Energieröumen in urbanen Räumen dar. Mittels der Entwicklung des Prozessmodells für Endverbraucher leistet diese Arbeit Folgendes:

- Untersuchung und Ableitung treibender Faktoren des Ressourcenbedarfs und der Ressourcenentsorgung unter Berücksichtigung verschiedener Bevölkerungsgruppen
- Darstellung der Zusammenhänge zwischen Ressourcenbedarf und Ressourcenentsorgung
- Abbildung einzelner Stoff- und Energieröume
- Integration verbraucherseitiger Maßnahmen

1.3 Aufbau der Arbeit

In dem sich anschließenden Kapitel 2 werden zunächst die Herausforderungen der Planung und des Managements von Wasser- und Energieinfrastrukturen in urbanen Ballungsräumen (Megastädte) diskutiert. Weiterhin werden das Thema der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie eingeführt und Begriffe der Kopplung definiert. Anschließend wird der für diese Arbeit relevante Stand von Wissenschaft und Technik zur integrierten Betrachtung transsektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen am Beispiel der Sektoren Wasser und Energie vorgestellt. Dabei wird auf Studien, die sich mit den Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie befassen, und auf die Ansätze, die die integrierte Berücksichtigung und Analyse transsektoraler Infrastrukturen am Beispiel dieser Sektoren ermöglichen, näher eingegangen.

In Kapitel 3 wird ausgehend von den methodischen Grundlagen und Grundprinzipien der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur integrierten Modellierung transsektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen vorgestellt. Schwerpunkt bildet die Kopplung der Methode der mathematischen Materialflussanalyse (MMFA) mit Prozessmodellen durch ein Steuerungskonzept zur Ressourcenbewirtschaftung und -verteilung. In diesem Kapitel wird auch ein generischer Ansatz zur Abflussregelung von Talsperrensystemen vorgestellt. Bei dem Ansatz handelt es sich um einen aus dem Kanalnetzbereich entlehnten Algorithmus zur Abflussregelung von Verbundspeichersystemen.

Das Kapitel 4 beschäftigt sich mit Anwendung und Erprobung des in Kapitel 3 vorgestellten Ansatzes am Beispiel der Wasser- und Elektrizitätsinfrastruktur der Stadt Lima. Mittels des Ansatzes werden exemplarisch gewählte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen der Sektoren Wasser und Energie sowie Endverbraucher für einen Zeitraum von 23 Jahren (2007–2030) in Monatsschritten integriert betrachtet und untersucht. Im Anschluss werden die erzielten Ergebnisse diskutiert.

Den Abschluss bildet Kapitel 5, in dem die Beiträge dieser Arbeit zusammengefasst und weiterführende Arbeiten umrissen werden.

2 Wasser- und Energiesektoren im Kontext von Megastädten

2.1 Einführung

In diesem Kapitel werden zunächst die Komponenten und Prozesse wasser- und energiewirtschaftlicher Infrastrukturen vorgestellt sowie die Herausforderungen der Planung und des Managements von Wasser- und Energiressourcen in urbanen Ballungsräumen (Megastädten) näher diskutiert. Außerdem werden die Grundbegriffe der Kopplung und die Merkmale eng und lose gekoppelter Systeme behandelt. Darauf aufbauend und anhand von Beispielen wird die Kopplung (Interdependenz) von Wasser und Energie aufgezeigt. Im Anschluss wird der Stand von Wissenschaft und Technik analysiert. Hier werden die für diese Arbeit relevante Studien und Ansätze zur Bewertung der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie bzw. zur integrierten transsektoralen Betrachtung und Analyse dieser Sektoren sowie zur Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen diskutiert.

2.2 Wassersektor

In [12] und [13] werden Wassersysteme in natürliche und künstliche Komponenten unterteilt. Beispiele für natürliche Komponenten sind Oberflächengewässer und Grundwasservorkommen. Künstliche Komponenten sind unter anderem Versorgungsnetze und Aufbereitungsanlagen, aber auch Wassermanagementsstrategien, wasserpolitische Ziele sowie gesetzliche Rahmenbedingungen wie Wasser- und Abwasserverordnungen. Sowohl natürliche als auch künstliche Komponenten bilden komplexe vernetzte Strukturen. Oberflächengewässer, Verbundspeichersysteme, Wasserverteilungs- und Kanalnetze setzen sich aus einer großen Anzahl kleinteiliger und zumeist einfacher Elemente wie Rohre, Kanäle, Sensoren, Behälter, Pumpen etc. zusammen. Prozesse können der Transport sowie biologische, chemische und physikalische Umwandlungen und Wertveränderungen von Stoffen und Gütern sein. Tabelle A 1 (Abschnitt 6.1) bietet eine vereinfachte Übersicht über mögliche Komponenten wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen.

Laut [14] bestehen 2,5 % der Wasserressourcen der Erde aus Süßwasser. Der Anteil an den globalen Süßwasserressourcen der Grundwasservorkommen liegt bei 0,76%, der Gletscher bei 1,74 % und der Süßwasserseen bei 0,013 %. Davon ist nur ein geringer Anteil direkt für die anthropogene Nutzung zugänglich. Die weltweit größten Wasserverbraucher sind die Landwirtschaft mit einem durchschnittlichen Anteil von 70 % und die Industrie mit einem Anteil von 22 %; private Haushalte liegen mit einem

Anteil von 8 % an dritter Stelle. Die Verbrauchsanteile in den verschiedenen Sektoren unterscheiden sich jedoch deutlich für Industrie- und Entwicklungsländer. So entfallen in Regionen wie Europa 22 % des Wasserverbrauchs auf die Landwirtschaft und ca. 57 % auf die Industrie (vgl. Bild 1). Demgegenüber entfallen in den asiatischen Ländern 81 % des Wasserverbrauchs auf die Landwirtschaft und nur 10% auf die Industrie. Asien, wo auch die meisten Megastädte liegen, hat mit 64 % den größten Anteil am weltweiten Wasserverbrauch. Die genannten Zahlen verdeutlichen die große Bedeutung der Wasservirtschaft und unterstreichen das Gebot, Wasserressourcen durch effiziente Bewirtschaftung zu schonen, um die derzeitige und zukünftige Wasserversorgung in ausreichender Quantität und Qualität sichern zu können.

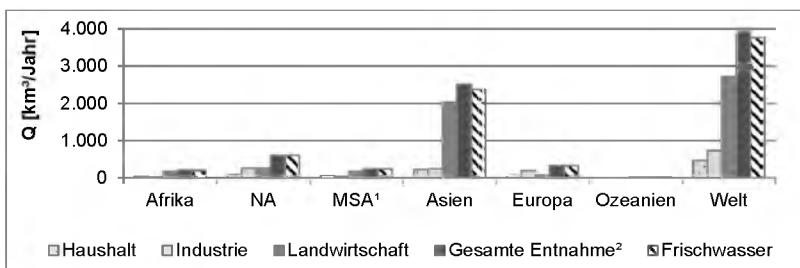


Bild 1: Wasserverbrauch in den verschiedenen Sektoren je nach Region

Quelle: Selbst erstellt auf Grundlage der Daten von FAO ORG (www.fao.org). Die Daten stammen aus unterschiedlichen Jahren; NA: Nordamerika; MSA¹: Mittel- und Südamerika einschließlich der Karibik; Gesamte Entnahme²: Der Wert umfasst Meerwasserentsalzung und Wasserrecycling

In vielen Regionen der Welt übersteigt der Wasserbedarf bereits bei Weitem die Neubildungsrate in den regionalen und überregionalen Oberflächen- und Grundwasservorkommen. Hinzu kommt, dass die von [15] prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot die aktuelle Situation in vielen ariden und semiariden Regionen verschärfen können, wobei es möglich ist, dass sich das Wasserdargebot in den semiariden Regionen bis Mitte des 21 Jahrhunderts schlimmstenfalls um 30 % bis 40 % verringert. Direkte Auswirkungen des Klimawandels sind weniger Niederschläge, häufigere und länger andauernde Dürren sowie schnelles Abschmelzen der Gletscher in den Hochgebirgen. Einige der am dichtesten besiedelten Regionen in Ländern wie Indien, China oder Peru sind stark von Gletscherwasser abhängig. Ein greifbares Beispiel sind die Gletscher in den zentralen Anden, die 99% der tropischen Gletscher der Welt ausmachen. Laut [16] haben diese Gletscher seit 1970 bereits 20 % ihres Volumens verloren. Die Trinkwasserversorgung der peruanischen Hauptstadt Lima (9,5 Mio. Einwohner im Jahr 2015) ist zu 78 % von Regenfällen und Gletscherschnee des Andengebiets abhängig. Wie genau sich die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag entwickeln und in welchem Ausmaß sich deren Änderungen auf die Wasserversorgung in diesen Gebieten auswirken, ist bislang ungewiss.

Ein weiteres Problem für dicht besiedelte Regionen stellen die Belastung von Fließgewässern durch die Einleitung ungereinigter oder nur grob gereinigter Abwässer sowie der Mangel an Sanitäreinrichtungen für große Teile der Bevölkerung dar, wie es besonders in Entwicklungsländern der Fall ist. Ein Beispiel ist der Fluss Rimac in Peru, der entlang seines Verlaufs durch kommunale, gewerbliche (insbesondere Bergbau) und landwirtschaftliche Abwässer stark belastet ist. Der Anteil der Abwasserreinigung in Megastädten ist sehr unterschiedlich. In zehn der von [10] untersuchten fünfundzwanzig Megastädte lag beispielsweise der Anteil der Abwasserreinigung zwischen 2 % und 100 %. Der Anschlussgrad der Bevölkerung an das Kanalnetz lag ebenfalls zwischen 2 % und 100 %. Diese Zahlen verdeutlichen zu einem die unterschiedlichen Entsorgungslagen in Bezug auf den Zugang zu Sanitäreinrichtungen und zum anderen die Herausforderungen des Wasserressourcen-Managements in diesen Gebieten.

Besondere Herausforderungen für dicht besiedelte Regionen resultieren in der Regel aus unzureichender Instandhaltung und begrenzten Kapazitäten von bestehenden Wasserinfrastrukturen. In einer Studie [17] über Megastädte und ihre Herausforderungen wurden als Hauptproblem die veralteten Infrastrukturen im Wassersystem identifiziert, was insgesamt 47 % der in der Studie befragten Wasserexperten anführten. An zweiter Stelle lag die unzureichende Infrastrukturkapazität (14 %), gefolgt von ineffizientem Betrieb (12 %). Nach Angaben von [10] gehen aufgrund veralteter Infrastrukturen in vielen Megastädten zwischen 33 % und 51 % des Trinkwassers durch Leckagen im Verteilungssystem verloren.

Trotz individueller Probleme lassen sich Megastädte nach [10] durch ein allgemeines Merkmal charakterisieren. Die Wasserversorgung und die Abwasser- und Abfallentsorgung werden in allen Megastädten durch ihre regionalen Ressourcen eingeschränkt. Dies führt in vielen Fällen zu überregionaler Beanspruchung von Wasserressourcen sowie zu unzureichender Deckung des Trinkwasserbedarfs, insbesondere in perurbanen Ansiedlungen. Laut [10] lag der Anschlussgrad an das Trinkwassernetz in Megastädten zwischen 15 % und 100 %. Der Anschlussgrad in den Megastädten Indiens und Asiens lag zwischen 15 % und 65 %. Klimatische und sozioökonomische Verallgemeinerungen in Megastädten sind jedoch nicht erkennbar. Der Jahresniederschlag ist in den von [10] untersuchten Megastädten unterschiedlich und reicht von 25 mm (Kairo) bis hin zu 2129 mm (Mumbai).

2.3 Energiesektor

In ähnlicher Weise wie Wassersysteme bestehen Energiesysteme aus einer Vielzahl miteinander vernetzter Komponenten, die sich ebenso in natürliche und künstliche Komponenten unterteilen lassen. Beispiele für natürliche Komponenten sind Vor-

kommen von Energieträgern (z. B. Erdöllager, Wasser); und künstliche Komponenten sind Infrastrukturen (z. B. Anlagen zur Energiegewinnung, Energieverteilungsnetze), energiepolitische Ziele sowie gesetzliche Rahmenbedingungen. Natürliche als auch künstliche Komponenten bilden komplexe Strukturen: Stromverteilungsnetze und Kraftwerke setzen sich beispielsweise aus einer großen Anzahl kleinteiliger und zumeist einfacher Elemente wie Stromleitungen, Umspannstationen, Turbinen, Generatoren, Transformatoren u. ä. zusammen. Durch die Infrastrukturen von Energiesystemen werden Energie und Stoffe umgewandelt, transportiert und gespeichert. Komplexere Prozesse finden beispielsweise bei der Umwandlung von Primärenergie (z. B. Kohle-, Erdgas-, Wasservorkommen) in Endenergie (z. B. Strom, Benzin) statt. Tabelle A 2 (Abschnitt 6.1) listet Beispiele für Komponenten und Prozesse energiewirtschaftlicher Systeme auf.

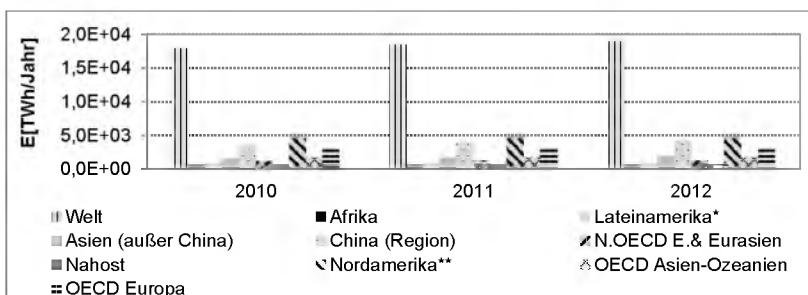


Bild 2: Nettostromverbrauch nach Regionen von 2010 bis 2012

Quelle: [18]; [19]; [20]; Lateinamerika*: Lateinamerika und Karibik (außer Chile und Mexiko); Nordamerika**: Nordamerika, einschließlich Chile; OECD: Mitgliedsstaaten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD); N.OECD E. & Eurasien: Nicht-OECD Mitgliedsstaaten in Europa und Eurasien. Der Nettostromverbrauch resultiert aus der Bruttostromerzeugung plus Energieimporte minus Energieexporte, eigener und anderer Nutzungen (z. B. für betriebliche Aktivitäten), Verlusten in Verteilungsnetzen und Verbrauch von Energieunternehmen (z. B. für Beleuchtung, Heizung, etc.)

Durch die stetige Zunahme des Energieverbrauchs steht der Energiesektor weltweit vor großen Herausforderungen. Laut [20] ist die weltweite Bruttostromerzeugung zwischen 1973 und 2012 von 6.142 TWh auf 22.752 TWh gestiegen, was einem mittleren jährlichen Anstieg von 3,4 % entspricht. Im Jahre 2012 betrug der gesamte Nettostromverbrauch 18.912 TWh. Die intensivsten Verbraucher waren China mit einem Anteil von 22,1 % (4.172 TWh) und die USA mit einem Anteil von 19,7 % (3.727 TWh), gefolgt von Japan mit einem Anteil von 4,9 % (923 TWh) und Indien mit einem Anteil von 4,6 % (869 TWh). Demgegenüber verbrauchten 2012 die Länder des afrikanischen Kontinents insgesamt 591 TWh, Lateinamerika und die Karibik (außer Mexiko und Chile) 932,5 TW (vgl. Bild 2).

2.4 Interdependenzen zwischen dem Wasser- und Energiesektor

Komponenten urbaner Infrastrukturen interagieren aufgrund vielfältiger Kopplungen miteinander und können daher nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. In [21] und [22] wird der Grad der Kopplung von Systemkomponenten oder kompletter Systeme anhand des Maßes an wechselseitiger Interdependenz, die eng oder lose ausgeprägt sein kann, bewertet. Eine enge Kopplung zeichnet sich nach [23] durch kontinuierliche und stetige Interdependenz aus, was für die Kopplung technischer Komponenten urbaner Infrastrukturen der Wasser- und Energiesektoren zutrifft. Bei losen Kopplungen sind die Interdependenzen insoweit reduziert, dass jedes System eine gewisse Unabhängigkeit und Identität bewahrt. Interdependenzen und Wechselwirkungen zwischen lose gekoppelten Systemen sind unbeständig, auflösbar und implizit sowie wenig intensiv (statt bedeutsam); sie können plötzlich (statt kontinuierlich) und unregelmäßig (statt konstant) auftreten. Dies betrifft die Kopplung bzw. Verkettung nicht-technischer Komponenten, wie zum Beispiel Betriebs- und Planungsstrategien, Gesetze und wasser- und energiepolitische Ziele der Sektoren Wasser und Energie.

Da sich lose gekoppelte Komponenten von Systemen durch eine gewisse Unabhängigkeit und Eigenständigkeit auszeichnen, erweist es sich als schwierig, Systeme als Ganze zu verändern. In der Studie [23] wurde festgestellt, dass Änderungsprozesse längerfristig, graduell und auf einzelne Bereiche beschränkt Wirkung zeigen können. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der allgemeinen Merkmale lose und eng gekoppelter Systeme.

Tabelle 1: Merkmale eng und lose gekoppelter Systeme

Eng gekoppelte Systeme	Lose gekoppelte Systeme
Besitzen Zuständigkeit, haben aber keine eigene Identität; die Systemkomponenten reagieren schnell und sind stark voneinander abhängig	Besitzen eigene Identität und haben eine reduzierte Zuständigkeit; die Komponenten sind unabhängig voneinander und reagieren langsam
Sind oftmals hoch automatisiert	–
Zeigen keine oder nur unerhebliche Zeitverzögerung zwischen den Systemkomponenten	Zeigen erhebliche Zeitverzögerung zwischen den Systemkomponenten
Änderungsprozesse sind kurzfristig, schubweise und großflächig	Änderungsprozesse sind graduell und auf einzelne Bereiche begrenzt
–	Haben die Fähigkeit, sich an lokale Bedingungen und Besonderheiten ihrer Umgebung anzupassen

Quelle: [24]; [25], [23], [22]

In jeder Phase des urbanen Wasserkreislaufes (z. B. in der Wassergewinnung, Trinkwasseraufbereitung und -verteilung sowie in der Abwasserentsorgung und Abwasserreinigung) spielt Energie eine wichtige Rolle. Für die Wassergewinnung, den Wasser- und Abwassertransport sowie für die Abwasserbehandlung gibt [26] insge-

samt einen Anteil von 2 % bis 3 % des weltweiten Energieverbrauchs an. In ähnlicher Weise stellt Wasser nicht nur einen regenerativen Energieträger dar, sondern ist auch ein wichtiges Medium bei Förderung und Transport fossiler Energieträger, dient als Prozesswasser in der Energiegewinnung und als Trägermedium für Wärmeenergie. In [27] wurde geschätzt, dass 2010 15 % (583 Billionen m³) der weltweiten Entnahme von Frischwasserressourcen im Energiesektor verbraucht werden.

Die Studien [28] und [7] heben hervor, dass sich beide Sektoren – trotz der teilweise engen Interdependenzen – getrennt voneinander entwickeln. Diese Feststellung basiert unter anderem auf der häufig angebrachten Kritik, dass Wasser- und Energieressourcen unabhängig voneinander reguliert und geplant werden (vgl. [29], [30], [31], [8], [32]), woraus sich schlussfolgern lässt, dass auf Managementebene beide Systeme nur lose miteinander gekoppelt sind. Anhand von Beispielen zeigt [33] auf, dass im Wassersektor in der Regel Entscheidungen über Alternativen ohne Berücksichtigung des Energieverbrauchs gefällt werden, und umgekehrt zeigt [28] auf, dass die Verfügbarkeit von Wasserressourcen und die Wasserbedarfe von Energietechniken bei der Auswahl von Alternativen im Energiesektor in vielen Fällen nicht angemessen berücksichtigt werden. Unter anderem schlussfolgert [34], dass die vielfältigen Auswirkungen und Rückkopplungen von Management- und Betriebsmaßnahmen häufig unvollständig bekannt sind. Es bestehen zumindest auf lokaler Ebene nur Abschätzungen über die Wirkungen von Wassereffizienzmaßnahmen im Energiesektor (z. B. Nutzung von wassersparenden Technologien) bzw. von Energieeffizienzmaßnahmen im Wassersektor. Die Studie [35] weist darauf hin, dass durch Implementierung von Optimierungsmaßnahmen mindestens 25 % des weltweiten Stromverbrauchs in den Wasserinfrastrukturen eingespart werden könnte. Entsprechende Maßnahmen reichen von effizienten Steuerungskonzepten in Pumpstationen bis hin zur Reduktion von Wasserleckagen, Durchführung von Wassersparkampagnen, Installation von Mess- und Spargeräten in Privathaushalten sowie Anwendung alternativer Sanitärkonzepte und Wasserrecycling.

2.5 Studien über die Interdependenzen zwischen Wasser und Energie

Die Folgen des Klimawandels, die intensive Nutzung von Wasser- und Energieressourcen und steigende Infrastrukturkosten sind Beispiele für treibende Faktoren, die eine verstärkte integrierte Betrachtung der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie erfordern. Somit rückt die Erarbeitung integrierter Strategien zum effizienten und nachhaltigen Management von Wasser- und Energieressourcen in diesen Sektoren zunehmend in den Mittelpunkt. Unbedingte Voraussetzung dafür ist ein besseres Verständnis der Interdependenzen, wobei in den letzten Jahren wichtige Fortschritte verzeichnet werden konnten (vgl. Tabelle 2).

Entsprechende Studien zu den genannten Interdependenzen haben die Potenziale der integrierten Betrachtung von Wasser und Energie aufgezeigt. Laut einer Übersicht [34] lassen sich die Studien hinsichtlich des Fokus auf die Problematik klassifizieren. So betrachtet und bewertet eine Gruppe den Energieverbrauch von Wasserinfrastrukturen, eine andere Gruppe dagegen den Wasserverbrauch von Energieinfrastrukturen. Eine systemweite sektorübergreifende Perspektive dagegen, also die Betrachtung von Wasser und Energie als Bestandteil urbaner Systeme, wird nur von einer Minderheit eingenommen. Inhaltlich reichen die Studien von der Bestimmung des Wasser- und Energieverbrauchs einzelner Haushaltsgeräte bis hin zur Untersuchung des Wasser- und Energieverbrauchs in Energie- und Wassersystemen von Städten und Ländern. Die wichtigsten von [34] herausgestellten Erkenntnisse und Forschungsbedarfe sind, dass

- a) die Quantifizierung des Energieverbrauchs einzelner Komponenten urbaner Wassersysteme mittlerweile hinreichend untersucht wurde,
- b) der mit dem Wasserverbrauch verbundene Energieverbrauch (z. B. Wassererwärmung) in den Privathaushalten einer der größten Verbraucher urbaner Wassersysteme darstellt, woraus folgend die Implementierung von Effizienzmaßnahmen in Privathaushalten einen wichtigen Beitrag leisten kann,
- c) nur wenige Studien alternative Wasserversorgungskonzepte wie zum Beispiel Speicherung von Regenwasser und Sanitärkonzepte wie beispielsweise Aufbereitung und Recycling von Grauwasser untersucht und bewertet haben und
- d) nur in vereinzelten Studien die Auswirkungen integrierten Betriebs zentraler und dezentraler Wasserinfrastruktursysteme auf die Energiebilanz urbaner Wassersysteme untersucht wurden.

Später haben Studien [8] die Sektoren Wasser und Energie im urbanen Umfeld hinsichtlich ihrer Interdependenzen ausgewertet. Die Auswertung erfolgte auf Grundlage sozialer, technischer, ökologischer und verbraucherspezifischer Kriterien, wobei sich auch hier herausstellte, dass nur sehr wenige Studien mehrere Sektoren integriert betrachteten. Auffällig ist auch, dass die Mehrheit der Studien ausschließlich auf technologische Kriterien eingeht, während Umwelt- und wirtschaftswissenschaftliche Kriterien an zweiter bzw. dritter Stelle lagen oder gänzlich nachrangig behandelt wurden. Politische und soziale Kriterien spielten kaum eine Rolle. Die wichtigste Schlussfolgerungen von [8] waren, dass

- a) ein großer Bedarf an vereinheitlichenden Ansätzen besteht, die eine klare Einsicht in die Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie ermöglichen,
- b) nur in Einzelfällen Studien den mit dem gewerblichen Wasserverbrauch verbundenen Energieverbrauch untersucht haben und

- c) sich die Untersuchungen von Interdependenzen auf die Ermittlung und Darstellung des Ist-Zustandes beschränkten und temporale Aspekte nur vereinzelt berücksichtigt wurden.

Später wurde eine Übersicht [36] über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser, Energie und Nahrung erarbeitet. Es wurden 37 Projekte/Studien der Interdependenzen zwischen diesen Sektoren exemplarisch ausgewählt und ausgewertet. Die Studien untersuchten weltweit vier verschiedenen Typen sektoraler Interdependenzen: a) Wasser und Nahrung, b) Wasser, Energie und Nahrung, c) Wasser und Energie sowie d) Wasser, Energie, Nahrung und Klima. Von den Studien befassten sich 32 % bzw. 30 % mit der Untersuchung der Interdependenzen zwischen Wasser und Energie bzw. zwischen Wasser, Energie und Nahrung, während 22 % die Interdependenzen zwischen Wasser, Energie, Nahrung und Klima analysierten. Der Rest der Studien (16 %) befasste sich mit der Analyse der Interdependenzen zwischen Wasser und Nahrung. Studien zu den Interdependenzen zwischen Wasser und Energie betrachteten den Energieverbrauch von Wasserinfrastrukturen bzw. den Wasserverbrauch von Energieinfrastrukturen. Als Beispiele können der Wasserverbrauch für die Stromerzeugung aus Wasserkraft und für die Produktion von Biokraftstoffen bzw. der elektrische Energieverbrauch von Pumpstationen der Wassersysteme genannt werden. Die Autoren haben den Bedarf an Methoden (z. B. integrierte Modelle, ökonomische Bewertungsmethoden) hervorgehoben, um interdisziplinäre, sektorübergreifende und multidimensionale Forschungsergebnisse integriert zu berücksichtigen sowie um die Komplexität der Zusammenhänge zwischen den Sektoren Wasser, Energie und Nahrung besser zu verstehen. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Studien der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie in Bezug auf die Aktivität der Sektoren (z. B. Transport, Gewinnung), die betrachteten Bereiche der Studien (z. B. Sozial- und Umweltbereich) und die zeitliche und räumliche Einordnung.

Tabelle 2: Beispiele von Studien über die Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie

Sektor	Autor	Anzahl der Studien	Komponente/ Aktivität	Bereiche	Untersuchungszeitraum/ Anwendungsort
Wasser/Abwasser: Energieverbrauch		8	(1)=7, (2) – (4)=7, (5), (6)=8, (7)=4	(i)=8, (ii) =6, (iii)=3, (iv)=5, (v)=1	
	[37]		(1) – (6)	(i),(ii)	Ist/weltweit
	[38]		(1) – (6)	(i)	2007/hypothetische Stadt, Australien
	[39]		(5)–(7)	(i) – (iv)	Ist/hypothetisches Wassersystem, USA
	[32]		(1) – (6)	(i), (ii), (iv)	Ist/weltweit
	[6]		(1) – (7)	(i), (ii), (iv), (v)	Ist/USA
	[40]		(1) – (6)	(i), (iv)	Ist/Kalifornien, USA
	[7]		(1) – (7)	(i) – (iv)	Ist/USA, weltweit
	[41]		(1) – (7)	(i), (ii), (iii)	Ist/weltweit
Energie: Wasserverbrauch		7	(a), (b)=5, (c)=6	(i)=7, (ii)=6, (iii)=3, (iv)=6, (v)=2	
	[37]		(a) – (c)	(i),(ii)	Ist/weltweit
	[42]		(c)	(i) – (v)	2008-2100/ westliche Staaten, USA
	[32]		(a) – (c)	(i), (ii), (iv)	Ist/weltweit
	[6]		(a) – (c)	(i), (ii), (iv), (v)	Ist/USA
	[40]		–	(i), (iv)	Ist/Kalifornien, USA
	[7]		(a) – (c)	(i) – (iv)	Ist/USA, weltweit
	[41]		(a) – (c)	(i) – (iv)	Ist/weltweit
Privathaushalte: Wasser- /Energieverbrauch		8	a)=4, b)=3, c)=4	(i)=4, (ii) =3, (iii)=8, (iv)=4, (v)=0	
	[37]		b), c)	(iii)	Ist/weltweit –
	[42]		c)	(iii)	2008-2100/ westliche Staaten, USA
	[38]		a)	(ii),(iii)	2007/ hypothetische Stadt, Australien
	[39]		a)	(i)-(iii)	Ist/typisches Einfamilienhaus, USA
	[32]		a)	(i)-(iii)	-
	[40]		b), c)	(i), (iii), (iv)	Ist/Kalifornien, USA
	[7]		b), c)	(ii), (iii)	Ist/USA, weltweit
	[41]		a)	(i)-(iii)	Ist/weltweit

Fortsetzung von Tabelle 2

Sektor	Autor	Anzahl der Studien	Komponente/ Aktivität	Bereiche	Untersuchungszeitraum/ Anwendungsort
Landwirtschaft: Wasser- /Energieverbrauch		4	a)=0, b)=3, c)=4	(i)=4, (ii) =3, (iii)=0, (iv)=2, (v)=1	
	[37]		b), c)	(i),(ii)	Ist/Weltweit
	[40]		c)	(i), (iv)	Ist/Kalifornien, USA
	[7]		b), c)	(i), (ii), (iv)	Ist/USA, weltweit
	[41]		b), c)	(i), (ii), (v)	Ist/weltweit
Gewerbe/Industrie: Wasser- /Energieverbrauch		6	a)=1, b)=3, c)=4	(i)=4, (ii) =4, (iii)=3, (iv)=3, (v)=0	
	[37]		b), c)	(i),(ii)	Ist/weltweit
	[42]		c)	(iii)	2008-2100/westliche Staaten, USA
	[38]		a)	(ii)	2007/hypothetische Stadt, Australien
	[32]		–	(i) – (iv)	Ist/weltweit
	[40]		b), c)	(i), (iv)	Ist/Kalifornien, USA
	[7]		b), c)	(i) – (iv)	Ist/USA, weltweit

(1) Wassergewinnung; (2) Wassertransport; (3) Trinkwasseraufbereitung; (4) Trinkwasserverteilung; (5) Abwasserentsorgung; (6) Abwasserreinigung; (7) Abwasserwiederverwendung; (a) Primärenergiegewinnung und Transport; (b) Veredelung und Herstellung von Kraftstoffen; (c) Stromerzeugung; (d) Energieversorgung; (i) Umweltbereich; (ii) Technischer Bereich; (iii) Sozialbereich; (iv) Politikbereich; (v) Wirtschaftsbereich

a) Wasserverbrauch und der damit verbundene Energieverbrauch; b) Wasserverbrauch; c) Energieverbrauch; Ist: Historische/aktuelle Daten (keine Zeitreihe)

In einer Studie [42] wurden die Interdependenzen zwischen Wasser, Energie und Endverbraucher (Privathaushalte, Gewerbe und Industrie) aus der Perspektive des Energiesektors in den westlichen Staaten und mit Hinblick auf die Verringerung des CO₂-Ausstoßes und des Wasserverbrauchs bei der Stromerzeugung untersucht. Dazu wurden verschiedene Szenarien über die zukünftige Entwicklung der Bevölkerung, des Stromverbrauchs der Endverbraucher, des Klimas, der Energietechnologien zur Stromgewinnung und der umweltpolitischen Ziele analysiert. Darauf aufbauend wurde für den Zeitraum 2008 bis 2100 die Umsetzung verschiedener Maßnahmen untersucht, wie z. B. Bau und Betrieb von Kraftwerken oder Implementierung umweltfreundlicher Energietechnologien zur Stromerzeugung. Diese Maßnahmen wurden dann nach verschiedenen Kriterien (Investitionskosten, Wasserverbrauch und CO₂-Ausstoß) bewertet. Dagegen lag der Fokus der Studie [42] auf die Perspektive des Energiesektors und der Stromproduktion.

Später haben [37], [26], [9], [41], [7] und [43], wenn auch mit unterschiedlichen Schwerpunkten, die Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser, Energie, Endverbrauchern (Privathaushalte, Gewerbe und Industrie) und Landwirtschaft untersucht. Dabei wurden Kennzahlen für den Energieverbrauch im Wassersektor, den Wasserverbrauch im Energiesektor sowie den Wasser- und Energieverbrauch der Endverbraucher und der Landwirtschaft ermittelt. In [7] wurde der Bedarf an integrierten Analysen mittels modellbasierter Ansätze sowie an verlässlichen Daten und Informationen für die Unterstützung von Entscheidungsfindungsprozessen hervorgehoben. Darüber hinaus haben [43] und [7] die Herausforderungen der integrierten Planung von Wasser- und Energieinfrastrukturen hinsichtlich technologischer, wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Aspekte identifiziert und Lösungswege aufgezeigt, wie Wasser- und Energiesysteme effizient gemanagt und betrieben werden könnten.

Die Studie [38] befasste sich mit der Quantifizierung der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser, Energie und Endverbraucher im urbanen Raum. Sie bewertete den Energieverbrauch der verschiedenen Aktivitäten des Wassersektors und den mit dem Wasserverbrauch verbundenen Energieverbrauch von Gewerbe und Privathaushalten. Dafür wurde eine hypothetische Stadt mit einer Bevölkerungszahl von 1 Million Einwohnern mit Standort in Australien definiert, deren Parametrierung auf typischen australischen und internationalen Kennzahlen basierte. Anhand des idealen Szenarios konnten die Autoren Mängel bei Analyse und Bilanzierung von Energieströmen und CO₂-Ausstößen in urbanen Gebieten aufdecken. Die Studie beschränkte sich auf die hypothetische Stadt und auf Ermittlung und Darstellung des Ist-Zustandes.

In [39] wurden die Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie mit Hinblick auf nachhaltiges Wasserressourcenmanagement analysiert. Dazu wurden verschiedene Wasserversorgungs- und Sanitärkonzepte (zentralisiert, quazi-zentralisiert und hybrid) auf Haushaltsebene untersucht und energetisch sowie ökologisch (d.h. bezüglich der Kohlenstoffemissionen) bewertet.

Im Rahmen der Studie [32] wurden die Interdependenzen zwischen Wasser und Energie in den Sektoren Wasser, Energie und Endverbraucher (Privathaushalte) hinsichtlich sozialer, ökologischer und technischer Indikatoren untersucht. Ziele der Untersuchung waren, den Bedarf an und die Verfügbarkeit integrierter Management- und Politikstrategien in den Sektoren Wasser und Energie zu identifizieren sowie bestehende Hindernisse und Synergien für die integrierte Planung in beiden Sektoren zu ermitteln. Eine wichtige Schlussfolgerung der Autoren war, dass sich beide Sektoren aufgrund des Mangels an integrierten politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen getrennt voneinander entwickelten. Im bestehenden politischen Rahmen werden wasser- und energiepolitische Ziele bislang getrennt gestaltet.

Analog zu [32] bewertete [6] die Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie in den USA hinsichtlich technischer, ökologischer, ökonomischer und politischer Kriterien. Ziel der Studie war, Schlüsselfaktoren der Interdependenzen zu identifizieren und abzuleiten, die Bundesämter bei der Formulierung und Umsetzung wasser- und energiewirtschaftlicher politischer Ziele auf landesweiter Ebene berücksichtigen müssen. Laut der Studie müssen beispielsweise die Auswirkungen klimatischer Bedingungen auf die zukünftige Wasser- und Energieversorgung sowie Hindernisse (z. B. wirtschaftliche Machbarkeit) bei der Umsetzung effizienterer Wasser- und Energietechnologien betrachtet werden. Darüber hinaus hat die Studie den Bedarf an einem besseren Verständnis der Interdependenzen (z. B. durch Generierung umfassender Daten) und der engen institutionellen Zusammenarbeit zur besseren Planung von Wasser- und Energiressourcen hervorgehoben.

Am Beispiel von Kalifornien wurde das Management der Interdependenzen zwischen Wasser und Energie untersucht [40]. Ziele der Studie waren die Identifizierung von Forschungsbedarfen, erforderlichen Schritten und Hürden auf dem Weg zum effizienten Management von Wasser und Energie in urbanen Gebieten. In Zusammenarbeit mit Nicht-Regierungsorganisationen, Betroffenen und Forschern aus den Sektoren Wasser und Energie konnten zehn strategische Maßnahmenfelder identifiziert werden, mit denen sich Wasser und Energie in den Städten in Zukunft effizienter managen lassen. Als Beispiele wurden integrierte Planung von Strategien und Richtlinien der Sektoren Wasser und Energie (a), Durchführung von Bildungsprogrammen auf verschiedenen Ebenen (b), Bilanzierung und Management der Stoff- und Energieströme in Städten (c), besseres Verstehen der Interdependenzen zwischen Wasser und Energie (d) und treibende Faktoren des Wasser- und Energieverbrauchs von Menschen (e) genannt. Obwohl die Umsetzung aller identifizierten Strategien umfassende Forschungsarbeiten erfordern und Handlungsbedarfe darstellen, wurden vier Bereiche identifiziert, die ein großes Potenzial aufweisen und nur einen geringen bis mittleren Aufwand zur Umsetzung beanspruchen. Es sind dies die Bereiche (a), (b), (d) und (e).

Aus den beispielhaft genannten Arbeiten geht klar hervor, dass die Anerkennung der Interdependenzen zwischen beiden Sektoren sowie Weiterentwicklung und Anwendung von Ansätzen zur integrierten Betrachtung zunehmend in den Fokus rücken. Dies hat dazu beigetragen, dass trotz der Komplexität der verschiedenen Wasser- und Energieinfrastrukturen sowie des Mangels an verlässlichen Daten und an vereinheitlichten Ansätzen – wie in Abschnitt 2.6 gezeigt wird – der Großteil aktueller Studien sich – im Vergleich zu früheren Studien (vgl. [34], [8]) – auf die Betrachtung mehrerer Sektoren konzentriert. Trotz der erzielten Fortschritte sind beide Sektoren hinsichtlich Planung und Betrieb weiterhin nur lose gekoppelt. Bei den aktuellen Studien über die Interdependenzen wurden zumeist ökologische Kriterien berücksichtigt, während technische und politische Kriterien an zweiter bzw. dritter Stelle lagen.

Soziale Kriterien lagen an vorletzter Stelle. Wirtschaftswissenschaftliche Kriterien spielten – im Vergleich zu der von [8] durchgeföhrten Auswertung von Studien zu den Sektoren Wasser und Energie – kaum eine Rolle (vgl. Tabelle 2).

Die Entwicklung externer Bedingungen wie klimatischer und demographischer Variablen sowie die Umsetzung von Technologien, Management- und Betriebsstrategien und politischen Zielen spielt eine wichtige Rolle bei planerischen Entscheidungen in den Wasser- und Energiesektoren. Um mögliche Änderungen im Verhalten beider Systeme und im Verhalten der Interdependenzen zwischen Wasser und Energie infolge ihrer intrinsischen Dynamik, aber auch bedingt durch externe Bedingungen über die Zeit untersuchen zu können, müssen verschiedene zeitliche Auflösungen in der Analyse der Interdependenzen berücksichtigt werden. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von [9] und [7], in denen die Bedeutung verschiedener zeitlicher Skalen (z. B. Tage, mehrere Jahrzehnte) sowohl für die Analyse der Interdependenzen als auch für die integrierte Planung wasser- und energiewirtschaftlicher Infrastrukturen unterstrichen wurde. Wie Tabelle 2 zeigt, beschränken sich die Studien, außer [42], auf die reine Darstellung des Ist-Zustandes. Änderungen im Verhalten der Interdependenzen sowie der sektoralen und transsektoralen Wechselwirkungen infolge variierender Randbedingungen wurden nicht berücksichtigt.

Insgesamt belegen die Unsicherheiten in der Entwicklung externer Variablen und deren Einflüsse auf die Interdependenzen und zukünftige Planung von Wasser- und Energieinfrastrukturen eindeutig die Notwendigkeit und Bedeutung modellbasierter Ansätze. Hier besteht laut [7] der Bedarf an verbesserten Interoperabilitäten und Modellierungsplattformen, um verschiedene Infrastrukturen der Wasser- und Energiesysteme integriert zu betrachten, um wichtige Eigenschaften der Systemkomponenten zu erfassen und um Informationen zwischen ihnen auszutauschen. Weiterhin unterstreichen diese Unsicherheiten die Notwendigkeit der Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus verschiedenen Disziplinen, Ingenieuren und Entscheidungsträgern. Mögliche Auswirkungen planerischer Entscheidungen auf die Interdependenzen können so früher erfasst und quantifiziert werden.

Letztendlich stellt die integrale Betrachtung und Analyse der Sektoren Wasser und Energie zwar eine große Herausforderung dar, da Entscheidungsträger und Betroffene mit unterschiedlichen Interessen und Meinungen einbezogen werden müssen, aber sie ist gleichzeitig der effektivste Weg, um wirksame Managementstrategien zu identifizieren.

2.6 Ansätze zur integrierten Analyse von Wasser und Energie

In den Bereichen der Wasserver- und Abwasserentsorgung sind mathematische Modellierung und dynamische Simulation anerkannte Methoden als Hilfsmittel zur Bemessung und Optimierung von Anlagen. Die Komponenten von Wasserver- und Abwasserentsorgungssystemen können entsprechend der jeweiligen Zielstellungen detailliert oder vereinfacht abgebildet sowie individuell oder integriert betrachtet werden. Die Studien [44], [45] und [4] berichten über Modellansätze und Fallbeispiele zur Kopplung und Untersuchung von mehr als zwei Komponenten urbaner Wassersysteme. Weiterhin führen [4] eine neue Typologie zur Klassifizierung integrierter Modelle urbaner Systeme ein. Hier werden integrierte Modelle urbaner Systeme in vier Integrationsgrade eingeordnet: a) integrierte komponentenbasierte Modelle, b) integrierte urbane Entwässerungsmodelle oder integrierte Wasserversorgungsmodelle, c) integrierte urbane Wasserkreislaufmodelle, d) integrierte Modelle urbaner Wassersysteme. Für einen detaillierten Überblick über die Entwicklungen der integrierten Modellierung urbaner Entwässerungs- und Wassersysteme auf Basis von Prozessmodellen in den zurückliegenden Jahren sei auf [44], [46], [47], [48], [49], [45] und [4] verwiesen.

Eine zur integrierten Modellierung urbaner Wassersysteme vergleichbare Situation findet sich im Bereich der integrierten Modellierung und Analyse transsektoraler Infrastrukturen. In einer Studie [5] über einen systemischen Rahmen und Analyse urbaner Wasser- und Energiesysteme wurde darauf hingewiesen, dass nur sehr wenige Forschungsansätze und Simulationswerkzeuge die integrierte Analyse transsektoraler Infrastrukturen ermöglichen – laut der Autoren fokussieren die meisten der entwickelten Ansätze auf die Analyse des Wasserversorgungssystems. Weitere Ansätze berücksichtigen Komponenten des Entwässerungssystems. Insgesamt wird jedoch nur das urbane Wassersystem abgedeckt.

Für großskalige integrierte Analysen transsektoraler Infrastrukturen und Bilanzierungen, sei es räumlich oder zeitlich, von Stoff- und Energieströmen sind diverse Methoden verfügbar. Beispiele für häufiger eingesetzte Ansätze sind Input-Output-Modelle (vgl. [50], [51], [52]), Betrachtung als urbaner Metabolismus (vgl. [53], [54], [28]), klassische und mathematische Materialflussanalyse (vgl. [11], [55], [56], [57], [28]) sowie der Ökobilanzansatz (vgl. [58], [59]). Tabelle 3 fasst die Studien und angewandten Methoden zusammen.

Tabelle 3: Studien und angewandte Ansätze für die transsektorale Analyse und Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen

Urbanes System/ Sektor	Autor	Methode	Komponente/ Aktivität	Stoff-/ Energie- strom	Bereich	Untersuchungs- raum/ Anwendungsort
Urbanes System	[10]	Urbaner Metabolismus	–	E, SW, DW, LEB, AND	–	Ist/25 größte Megastädte
Wasser/ Abwasser				(i)=6, (ii), (v)=2, (iii)=1, (iv)=3		
	[60]	MFA, MMFA	(4) – (6), (8)	TW**, WW**, FS**, RW**	(i), (iv)	Ist/ Thailand
	[61]	MFA	(1), (2), (4) – (6), (8)	TW**, WW**, FS**, RW**, FW**	(i)	Ist und 2015/ Kumasi, Ghana
	[62]	Zentral-Orte- Konzept	(3) – (7)	TW*, WW*, SW	(i) – (v)	Ist und Szenario/ China
	[54]	Urbaner Meta- bolismus	(4), (5), (7)	TW*, WW*	(i)	Ist/Sydney, Perth Melbourne, Süd- osten von Queensland
	[28]	Urbaner Meta- bolismus, MMFA/ Simulation	(1) – (6), c	Erdgas, Strom, TW*	(i)	2006-2007/ hypothetische Stadt/Einfamilien- haus, Australien
	[5]	Partizipativer methodischer Rahmen	(1) – (7)	RW*, TW*, WW*, E	(i), (ii), (iv), (v)	Ist/Queensland, Australien
Energie					(i)=1, (ii)=1	
	[59]	Ökobilanz- ansatz, Ener- gie- und Stoff- strom-modell	(a), (d)	Wärme, Strom, Treibstoffe, LEB	(i), (ii)	Ist/Brandenburg, Deutschland

Fortsetzung von Tabelle 3

Urbanes System/ Sektor	Autor	Methode	Komponente/ Aktivität	Stoff-/ Energie- strom	Bereich	Untersuchungs- raum/ Anwendungsort
Privat- haushalte					(i), (iii)=6, (iv)=0 (ii), (v)=2	
	[60]	MFA	b), e), g), h)	TW**, WW**, LEB, SW	(i), (ii)	Ist/Thailand
	[61]	MFA	b), g)	TW**, FW**, WW**	(i), (iii)	Ist und 2015/ Kumasi, Ghana
	[59]	Ökobilanz- ansatz, Ener- gie- und Stoff- strommodell	c), e)	Wärme, Strom, Treibstoffe, LEB	(i) – (iii)	Ist/Brandenburg, Deutschland
	[28]	Urbaner Meta- bolismus, MMFA/ Simulation	c), d)	Erdgas, Strom, TW*	(i), (iii)	2006-2007/ hypothetische Stadt/Einfamilien- haus, Australien
	[63]	Urbaner Meta- bolismus, MMFA/ Simulation	b), d)	TW*, WW*, E	(i), (ii), (iii), (v)	Ist/Brisbane, Australien
	[5]	Partizipativer methodischer Rahmen/ MMFA	a)	TW*, WW*, E	(i), (iii), (v)	Ist/Queensland, Australien
Landwirt- schaft					(i)=2, (ii), (iii), (v)=0, (iv)=1	
	[60]	MMFA	b), f), g), j)	RW*, REW**, AND, Dunge- mittel	(i), (iv)	Ist/Thailand
	[61]	MFA	b)	RW**, FW**	(i)	Ist und 2015/ Kumasi, Ghana

Fortsetzung von Tabelle 3

Urbanes System/ Sektor	Autor	Methode	Komponente/ Aktivität	Stoff-/ Energie- strom	Bereich	Untersuchungs- raum/ Anwendungsort
Gewerbe/ Industrie					(i)=4, (ii), (iii)=0, (iv), (v)=1	
	[60]	MMFA, MFA	b), g), j)	TW ^{**} , WW ^{**} , AND	(i), (iv)	Ist/Thailand
	[61]			TW ^{**} , FW ^{**} , WW ^{**}	(i)	Ist und 2015/ Kumasi, Ghana
	[28]	Urbaner Metabolismus, MMFA, Simulation	d)	Erdgas, Strom, TW [*]	(i)	2006-2007/ hypothetische Stadt/ Einfamilienhaus, Australien
	[5]	Partizipativer methodischer Rahmen/ MMFA	a)	TW [*] , WW [*] , E	(i), (v)	Ist / Süd-Ost- Queensland, Australien

(1) Wassergewinnung; (2) Wassertransport; (3) Trinkwasseraufbereitung; (4) Trinkwasserförderung; (5) Abwasserentsorgung; (6) Abwassereinigung; (7) Abwasserwiederverwendung; (8) Gewässer; (a) Primärenergiegewinnung und Transport; (b) Veredelung und Herstellung von Kraftstoffen; (c) Stromerzeugung; (d) Energieversorgung; a) Wasser- und Energieverbrauch; b) Wasserverbrauch; c) Energieverbrauch; d) mit dem Wasserverbrauch verbundener Energieverbrauch; e) Lebensmittelverbrauch, f) Düngemittelverbrauch; g) Abwasseranfall; h) Abfallanfall; i) anderer Stoffverbrauch; j) andere(r) Stoffproduktion/-anfall; RW: Flusswasser; REW: Regenwasser; TW: Trinkwasser; WW: Abwasser; E: Energie; FS: Fäkalschlamm; FW: Grundwasser; SW: Abfall; LEB: Lebensmittel; AND: andere; * nur quantitative Bilanzierung; ** quantitative und qualitative Bilanzierung; (i) Umweltbereich; (ii) Technischer Bereich; (iii) Sozialbereich; (iv) Politikbereich; (v) Wirtschaftsbereich; MFA: Klassische Materialflussanalyse; MMFA: Mathematische Materialflussanalyse; Ist: historische/aktuelle Daten (keine Zeitreihe)

Auf Grundlage von Literaturwerten und von vor Ort erhobenen Informationen wurden in [10] mit dem Ansatz des Urbanen Metabolismus verschiedene Stoff-, Güter- und Energiestrome in urbanen Systemen am Beispiel von 25 Megastädten für den Ist-Zustand untersucht, wobei Wasser, Energie und Lebensmittel die wichtigsten Eingangsgrößen in diesen urbanen Räumen darstellten. Laut der Autoren lag der Energieverbrauch in einer typischen Megastadt zwischen 100 Petajoule (27,8 TWh) und 1000 Petajoule (277,8 TWh) pro Jahr und die Wasserströme reichten von 0,03 Mio. m³/d bis hin zu 7,6 Mio. m³/d. Die Autoren stellten im Ergebnis fest, dass Daten über Stoff- und Energiestrome auf StadtEbene extrem begrenzt sind und dass in vielen Fällen Informationen über Wasser- und Energiestrome in Megastädten unzureichend dokumentiert sind. Einer der Hauptgründe dafür ist, dass in vielen Megastädten nicht die ganze Bevölkerung an das Trinkwasser- und Kanalnetz angeschlossen ist.

Nachteile der Studie sind die Vernachlässigung sektoraler und transsektoraler Wechselwirkungen zwischen den Sektoren Wasser und Energie und die alleinige Darstellung des Ist-Zustandes. Die Autoren haben aber den Bedarf an transsektoralen Analysen sowie integrierten und multidisziplinären modellbasierten Ansätzen explizit hervorgehoben, um die Entwicklung von Stoff- und Energieströmen – insbesondere in Bezug auf Wasserströme – in urbanen Systemen besser zu verstehen.

In [60] wurden die Methoden der mathematischen Materialflussanalyse (MMFA) und der klassischen Materialflussanalyse (MFA) zur qualitativen Beurteilung des Zustands des Flusses Thachin in Thailand angewendet. Mittels der Studie konnten die Einträge von Nährstoffen (Phosphor und Stickstoff) im Einzugsgebiet des Gewässers quantifiziert werden. Hierzu wurden die aus den Sektoren Aquakultur und Tierhaltung, Industrie und Privathaushalte anfallenden Abwässer sowie die bei der Entwässerung aus Ackerflächen abflusswirksamen Düngemittel bilanziert. Darauf aufbauend wurden verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität des Gewässers untersucht und bewertet. Diese reichten von der Behandlung des aus Aquakultur und Tierhaltung anfallenden Abwassers und Schlamms und der kommunalen Abwasserreinigung bis hin zur Minimierung des Einsatzes von Düngemitteln in der Landwirtschaft.

Aufgrund des Umfangs der Studie [60] wurden die Stoffströme in den betrachteten Komponenten des wasserwirtschaftlichen Systems (Verteilungs- und Entsorgungsnetze, Kläranlagen) sowie in den Privathaushalten und der Industrie stark vereinfacht und mittels der MFA abgebildet, wobei zum Beispiel keine Korrelationen zwischen Trinkwasserverbrauch und Abwasseranfall in den Privathaushalten berücksichtigt wurden. Im Gegensatz dazu fiel die Untersuchung der Stoffströme in der Aquakultur, Tierhaltung und Landwirtschaft mittels der MMFA etwas detaillierter aus. Auf der Grundlage der Ergebnisse hat die Autorin Bedarfe an detaillierten Abbildungen und Untersuchungen der Entwässerung von Ackerflächen - insbesondere im Reisanbau - herausgestellt, um bereits identifizierte Schmutzfrachtquellen weiter zu verfolgen. Ein weiterer Bedarf besteht an detaillierter Quantifizierung der verschiedenen Abwasserströme aus der Industrie. Aufgrund der angewendeten vereinfachten Modellansätze – nach der MFA – konnten das Zeitverhalten und die dynamischen Zusammenhänge zwischen den Eingangsflüssen, Umwandlungen und Ausgangsflüssen von Nährstoffen in den betrachteten sektoralen Komponenten und Prozessen nicht abgebildet werden. Die Anwendung dynamischer Prozessmodelle zur detaillierten Abbildung und Untersuchung der Änderungen der Stoffströme über die Zeit könnte ein möglicher Lösungsweg sein. Transsektorale Wechselwirkungen zwischen den Sektoren Wasser und Energie wurden nicht berücksichtigt. Damit beschränkten sich die Studie und der angewendete Ansatz auf die Bilanzierung verschiedener Stoffströme in den Sektoren Wasser- und Landwirtschaft, Privathaushalte und Nicht-Haushalte (Gewerbe, Industrie) für den Ist-Zustand.

Mit ähnlichen Zielen wie [60], nur auf urbaner Ebene, wendete [61] die MFA zur Bilanzierung der Wasser- und Abwasserströme und der Nährstoffströme in der Stadt Kumasi (Ghana) an, wobei die Sektoren Privathaushalte, Industrie und Landwirtschaft berücksichtigt wurden. Die Modellierung und Bilanzierung der Stoffströme in den gewählten Sektoren und Komponenten basierten auf vereinfachten Modellvorstellungen und daraus abgeleiteten Transferkoeffizienten. Auf der Basis der Ergebnisse des Ist-Zustandes wurden verschiedene Maßnahmen zur Minimierung der Belastung von Wasserquellen hinsichtlich der Nährstoffeinträge bewertet. Diese beinhalten die Steigerung der Effizienz des Abfallentsorgungssystems, Verbote phosphorhaltiger Waschmittel sowie Minimierung offenen Urinierens. Darüber hinaus wurde das System bzgl. diverser Szenarien für das Jahr 2015 (Ist-Zustand) untersucht. Die Studie berücksichtigte keine transsektoralen Wechselwirkungen zwischen den Sektoren Wasser und Energie.

Auf der Grundlage des raumwissenschaftlichen Modells „Zentral-Orte-Konzept“ (vgl. [64]) entwickelte [62] einen Ansatz für vollintegrierte semizentrale Ver- und Entsorgungssysteme. Ziel war die Unterstützung der Infrastrukturentwicklung in den Sektoren Wasser und Abfall in schnell wachsenden urbanen Räumen. Dabei wurden geeignete technische Verfahren für die Trinkwasseraufbereitung, Abwasserbehandlung (Grau- und Schwarzwasser) sowie Abfallentsorgung betrachtet. Diese wurden anschließend in verschiedenen Kombinationen und Größenordnungen als integrierte semizentrale Systeme miteinander verglichen und aus den Ergebnissen Empfehlungen für den Einsatz in schnell wachsenden urbanen Gebieten abgeleitet. Die Studie und die angewendeten Ansätze begrenzen sich auf die Perspektive der Sektoren Abfall und Wasser. Hier wurden Trinkwasser-, Abwasser- und Abfallströme innerhalb der exemplarisch gewählten Infrastrukturen für den Ist-Zustand bilanziert. In einer Untersuchung diverser Szenarien wurden verschiedenen Technologien (z. B. zur Trinkwasseraufbereitung) bewertet. Transsektorale Wechselwirkungen zwischen den Sektoren Wasser und Energie bzw. zwischen Abfall und Energie wurden nicht berücksichtigt.

In [65] wurde ein methodischer Rahmen auf der Grundlage der Methode des Urbanen Metabolismus zur Untersuchung und Bilanzierung von Wasserströmen in anthropogenen und natürlichen Systemen vorgestellt, der dann in verschiedenen Städten Australiens angewendet wurde. Für die Bilanzierung der Wasserströme wurden verschiedene Eingänge (Grundwasser, Trinkwasser, Niederschlag) und Ausgänge (Abwasser, Regenwasser, Fremdwasser, Evapotranspiration) des urbanen Wassersystems berücksichtigt. Aufgrund der Komplexität und Dynamik urbaner Systeme, insbesondere in Bezug auf die Wassersysteme, wurden die exemplarisch gewählten Eingangs- und Ausgangsgrößen auf der Basis vor Ort erhobener Messwerte und Daten sowie vereinfachter Modellvorstellungen quantifiziert. Die Studie und der

angewendete Ansatz beschränkten sich auf die Perspektive des Wassersektors und die Darstellung des Ist-Zustandes.

Basierend auf vorherigen, von [38] durchgeführten Studien setzte sich [28] mit der Nutzung der Methode des Urbanen Metabolismus und der MMFA zur Beschreibung des Energieverbrauchs der verschiedenen Aktivitäten des Wassersektors in einer hypothetischen Stadt (1 Mio. EW) bzw. der mit dem Wasserverbrauch verbundenen Energieverbräuche in einem australischen Einfamilienhaus auseinander. Dabei trugen die angewendeten Ansätze zum besseren Verstehen der Auswirkungen der Aktivitäten des Wasser- und Abwassersektors und des Wasserverbrauchs von Privathaushalten und Nicht-Haushalten auf dem Energieverbrauch (transsektorale Wechselwirkungen) in Städten bei. Darüber hinaus konnten die wesentlichen Einflussfaktoren des Wasserverbrauchs auf den Energieverbrauch in dem Einfamilienhaus identifiziert werden.

In einer Studie [63] wurde die MMFA zur Bilanzierung der Trinkwasser- und Energieströme und des damit verbundenen CO₂-Ausstoßes sowie der in einem typischen australischen Einfamilienhaus (Endverbrauchersektor) anfallenden Kosten angewendet. Darauf aufbauend wurden die Schlüsselfaktoren der Wasser- und Energieströme identifiziert und verschiedene Maßnahmen, wie z. B. Ersatz konventioneller Warmwassersysteme (Elektro bzw. Gas) durch solarbasierte Systeme und Wassersparmaßnahmen (z. B. Reduzierung der Dusch- und Badezeiten), untersucht. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wurde auf Verringerung des Wasser- und Energieverbrauchs sowie der Kohlenstoffemissionen hin geprüft. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die Kombination von Wasserspar- und technischen Maßnahmen großes Potential zur effizienteren Nutzung der Wasserressourcen als auch hinsichtlich des CO₂-Ausstoßes aufweist.

Auf der Grundlage partizipativer Verfahren (Umfragen, Workshops) entwickelten [5] einen methodischen Rahmen zur integrierten Analyse transsektoraler Infrastrukturen am Beispiel der Sektoren Wasser und Energie von Queensland, Australien. Der methodische Rahmen konzentrierte sich auf die Perspektive des Wassersystems, das mit seinen Komponenten in drei Ebenen bzw. „Systemgrenzen (SG)“ eingeteilt wurde: das Wasserversorgungssystem (SG1), das urbane Wassersystem einschließlich der Verbraucher (SG2) und das regionale Wassersystem (SG3). In diesem Kontext trug der Rahmenansatz zum besseren Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Wasser und Energie in den verschiedenen Ebenen des Wassersystems bei. Darauf aufbauend wurden die Wasser- und Energieströme in den verschiedenen Komponenten des Wassersystems sowie in den Privathaushalten und Nicht-Haushalten (SG1+SG2) quantifiziert. Die Bilanzierung der Wasser- und Energieströme des urbanen Wassersystems, einschließlich der Endverbraucher, basieren auf vor Ort erhobenen Daten und Informationen sowie auf Literaturwerten. Die Autoren hoben den

Bedarf an der Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Wasser und Energie und der Bilanzierung von Wasser- und Energiestromen auf weiteren Ebenen des Wassersystems – insbesondere auf der Ebene des urbanen und regionalen Wassersystems und darüber hinaus – hervor.

Aus den beispielhaft genannten Studien und entwickelten Ansätzen zur integrierten transsektoralen Analyse der Sektoren Wasser und Energie geht klar hervor, dass die meisten Studien und verwendeten Ansätze sich auf die Perspektive der Sektoren Wasser und Privathaushalte konzentrieren. Einige wenige nehmen eher die Perspektive der Sektoren Gewerbe, Industrie und Landwirtschaft ein. Auffällig ist, dass der Energiesektor kaum berücksichtigt wurde (siehe Tabelle 3). Die genannten Studien und entwickelten Ansätze berücksichtigen keine Ressourcenkapazitäten. Um die Flüsse von Stoffen und Energie in Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen realistisch abzubilden und um Wege zur bestmöglichen Nutzung bestehender, aber auch geplanter, Kapazitäten von Infrastrukturen und natürlichen Ressourcen untersuchen zu können, müssen Kapazitäten und Bedarfe mit in die Betrachtung einbezogen werden. Ein weiterer Punkt ist, dass keine der Studien Änderungen im Verhalten der betrachteten wasser- bzw. energiewirtschaftlichen Infrastrukturen und der sektoralen und transsektoralen Wechselwirkungen berücksichtigt. Auffällig ist die Beschränkung auf die Darstellung des Ist-Zustandes. Zur Bewertung wurden zumeist Umweltkriterien herangezogen. Soziale Kriterien lagen an zweiter Stelle, gefolgt von technischen, politischen und ökonomischen Kriterien.

Aus den oben genannten Einschränkungen bestehender Ansätze ergibt sich die Notwendigkeit, einen Ansatz zu entwickeln, der die integrierte Analyse transsektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen und Endverbraucher ermöglicht.

2.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Komponenten und Prozesse wasser- und energiewirtschaftlicher Infrastrukturen vorgestellt sowie die Herausforderungen der Planung und des Managements von Wasser- und Energieressourcen in urbanen Ballungsräumen im Detail diskutiert. Probleme in Megastädten bereiten

- stetige Zunahme des Wasser- und Energiebedarfs und damit Einschränkungen in der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung durch ihre regionalen Ressourcen,
- überregionale Beanspruchung von Wasserressourcen und unzureichende Deckung des Trinkwasserbedarfs,
- Belastung von Fließgewässern durch Einleitung ungereinigter oder nur grob gereinigter Abwässer und

- Mangel an Sanitäreinrichtungen für große Teile der Bevölkerung, wie es besonders in Entwicklungsländern der Fall ist.

In diesem Kapitel wurden eine Analyse des Stands von Wissenschaft und Technik durchgeführt und die für diese Arbeit relevanten Studien und Ansätze zur Bewertung der Interdependenzen zwischen den Sektoren Wasser und Energie näher behandelt. Darüber hinaus wurden Ansätze zur integrierten transsektoralen Betrachtung und Analyse dieser Sektoren sowie zur Bilanzierung von Stoff- und Energiestromen diskutiert. Aus den exemplarisch erwähnten Arbeiten lässt sich schlussfolgern, dass

- a) trotz der teilweise engen Interdependenzen und der erzielten Fortschritte bei-
de Sektoren sich weiterhin getrennt voneinander entwickeln,
- b) die Anerkennung der Interdependenzen zwischen beiden Sektoren sowie die
Weiterentwicklung und Anwendung von Ansätzen zur integrierten Betrachtung
zunehmend in den Fokus rücken,
- c) die Studien und die entwickelten Ansätze sich auf die Darstellung des Ist-
Zustandes beschränken und temporale Aspekte weiterhin kaum berücksichtigt
werden,
- d) die meisten verwendeten Ansätze sich auf die Perspektive der Sektoren
Wasser und Privathaushalte konzentrieren und den Energiesektor kaum be-
rücksichtigen,
- e) die entwickelten Ansätze keine Ressourcenkapazitäten berücksichtigen,
- f) Änderungen im Verhalten der betrachteten wasser- bzw. energiewirtschaftli-
chen Infrastrukturen nicht berücksichtigt werden und
- g) sektorale und transsektorale Wechselwirkungen infolge variierender Randbe-
dingungen nicht oder nur unzureichend abgebildet werden.

Aus den oben genannten Einschränkungen bestehender Studien für die Interdepen-
denzen und entwickelten Ansätze zur integrierten transsektoralen Analyse ergibt sich
die Notwendigkeit, einen Ansatz zu entwickeln, der die integrierte Analyse trans-
sektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen und der Systemtreiber (Endverbrau-
cher) erlaubt.

3 Integrierte Modellierung transsektoraler Infrastrukturen

3.1 Einführung

Ausgehend von methodischen Grundlagen und Grundprinzipien wird in diesem Kapitel der in dieser Arbeit entwickelte modellbasierte Ansatz zur integrierten Modellierung transsektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen vorgestellt. Darüber hinaus stellt dieses Kapitel die Untersuchung eines Regelungsalgorithmus aus dem Kanalnetzbereich und dessen Übertragung zur Regelung der Wasserabgaben aus Talsperrensystemen vor. Anhand von Beispielen für Prozessmodelle werden Funktionalität, Anwendung und Potenziale des modellbasierten Ansatzes gezeigt.

3.2 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der schnellen Bevölkerungsentwicklung und den daraus resultierenden vielfältigen Problemen der Ver- und Entsorgungsstrukturen in Megastädten hatte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bereits im Jahr 2004 das Forschungsprogramm „Forschung für die nachhaltige Entwicklung der Megastädte von morgen“ ausgeschrieben. Thematische Schwerpunkte waren die Sektoren Wasser, Abfall und Energie sowie Mobilität und Ernährung. Im Rahmen des Programms sollten integrierte Planungs- und Managementkonzepte, die zu nachhaltiger Entwicklung zukünftiger Megastädte beitragen können, eruiert und exemplarisch umgesetzt werden. Eines der im Rahmen dieses Forschungsprogramms geförderten Projekte mit dem Titel „Nachhaltiges Management von Wasser und Abwasser in urbanen Wachstumszentren unter Bewältigung des Klimawandels – Konzepte für Lima Metropolitana (Perú)“ (LiWa) befasste sich mit der Erarbeitung von Konzepten für ein nachhaltiges Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsmanagement der Megastadt Lima. Die vorliegende Arbeit wurde begleitend zum LiWa-Projekt erstellt und orientiert sich an dessen Zielen. Ein Aspekt waren Modellierung und Simulation des Wasserver- und Abwasserentsorgungssystems der Stadt. Die im Rahmen des Projekts entwickelte Lösung basiert methodisch auf Analyse und Darstellung von Stoff- und Energieströmen. Eine vereinfachte algebraische Beschreibung von Strukturelementen wie z. B. Kläranlagen und deren Verknüpfung durch Stoff- und Energieströme (vgl. [66]; [67]) zeigt grundsätzlich die richtige Richtung auf, birgt aber noch einige ungenutzte Potenziale. Dies betrifft die Berücksichtigung von Bedarfen (z. B. Trinkwasser- und Strombedarf) durch eine detaillierte Beschreibung der Endverbraucher (z. B. Privathaushalte), von Kapazitäten (z. B. Speichersysteme, Kläranlagen) und Ressourcen (z. B. Wasser und Energie) sowie die Koordination/Verknüpfung (Steuerung, Auslastung, Verteilung) zwischen den Bedarfen und Kapazitäten. Ein weiterer bisher unberücksichtigter Aspekt ist die Zusammenführung unterschiedlicher

Nutzerschichten (Betriebsführung, Management und Planung) und Experten (z. B. aus dem Wasser- und Energiesektor) an einem Modell des Gesamtsystems.

Der im Weiteren propagierte Ansatz verfolgt die Einbettung von Prozessmodellen in die Materialflussanalyse. Grundsätzlich handelt es sich dabei um eine Ausprägung der mathematischen Materialflussanalyse, wobei die Berücksichtigung von Prozessmodellen eine quantitative und qualitative Bilanzierung von Stoffen und Energie ermöglicht. Aufgrund des Detaillierungsgrades von Prozessmodellen lassen sich die Einflüsse variierender Randbedingungen auf die Systemzustände qualitativ und quantitativ bewerten. So bieten deterministische Modellgrundlagen den Vorteil, Einflüsse schwankender Abwasserzusammensetzungen (z. B. infolge Verringerung bzw. Steigerung des Trinkwasserverbrauchs) auf die Wirksamkeit der Reinigungsleistung biochemischer Prozesse in Kläranlagen hin zu quantifizieren. Somit kann, nur um ein Beispiel zu nennen, ermittelt werden, inwieweit sich eine Verringerung des Trinkwasserverbrauchs infolge der Implementierung von Wassersparmaßnahmen (z. B. wassersparende Armaturen) auf die Bewirtschaftung der Frischwasserressourcen auf der einen Seite und auf die Reinigungsleistung bzw. den Ressourcenverbrauch (z. B. Strom) von Kläranlagen auf der anderen Seite auswirkt.

Ziel ist es, einen flexiblen modellbasierten Ansatz aufzustellen, der es erlaubt, Bedarfe, Kapazitäten und deren Verknüpfungen auf einer makroskopischen Ebene (sektorale und transsektorale Infrastrukturen) zu beschreiben und zugleich einzelne Systemkomponenten detailliert durch Prozessmodelle (Prozessebene) abzubilden. Darüber hinaus soll mittels des Ansatzes die Bandbreite potenzieller Maßnahmen modellmäßig erweitert und deren Wirksamkeit auf der Prozessebene als auch auf der Makroebene untersucht werden. Dafür lassen sich die folgenden konzeptionellen Eigenschaften fordern:

- Detaillierte Beschreibung von Wasserbedarf, Abwasseranfall und Energiebedarf
- Effiziente Steuerung und Verteilung von Ressourcen in beliebig komplexen Systemen
- Hierarchische Strukturierung der Komponenten
- Beschreibung betrieblicher Randbedingungen verfahrenstechnischer Elemente
- Berücksichtigung variierender Randbedingungen (z. B. Bevölkerungsentwicklung)

Als potenzielle Nutzeffekte werden erwartet:

- Transsektorale integrierte Abbildung und Analyse der Infrastrukturen
- Quantitative und qualitative Beschreibung von Stoff- und Energieströmen
- Einsatz bei Vorplanung und Evaluierung von Infrastrukturmaßnahmen

- Beurteilung von Betriebs- und Managementstrategien aus Makro- und Prozesssicht
- Unterstützung von Entscheidungsfindungsprozessen auf Betriebs- und Managementebene

Der im Folgenden beschriebene Ansatz greift die bereits in [11] vorgeschlagene Integration von Prozessmodellen in die mathematische Materialflussanalyse (MMFA) auf und entwickelt sie durch Anwendung eines generischen Konzepts zur Bewirtschaftung von Ressourcenkapazitäten und zur Deckung von Bedarfen (vgl. [68]) in transsektoralen Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen weiter. In diesem Kontext ermöglicht der hier entwickelte Ansatz die integrierte Modellierung und Analyse transsektoraler Infrastrukturen am Beispiel der Sektoren Wasser und Energie sowie die Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen. Als Beispiele werden Prozessmodelle von Kläranlagen auf der Grundlage etablierter mathematischer Modellansätze (z. B. [69]; [70]), Prozessmodelle von Talsperrensystemen (vgl. [71], [72]) sowie detaillierte Modelle zur Beschreibung des Ressourcenbedarfs in Privathaushalten (vgl. [68]) mit der MMFA gekoppelt. Zusätzlich beinhaltet der hier entwickelte Ansatz einen aus dem Kanalnetzbereich übertragenen generischen Algorithmus zur Abflussregelung von Talsperrensystemen.

Nach der Klassifizierung [4] integrierter Modelle urbaner Wasserbewirtschaftung handelt es sich bei dem hier entwickelten Ansatz um eine Methode zur integrierten Modellierung urbaner Wassersysteme, da der Ansatz Konzepte zur Bewirtschaftung und Verteilung von Wasserressourcen und mathematische Modelle zur Abbildung von Komponenten mit Prozessen in Wasserversorgungssystemen (z. B. Talsperren, Endverbraucher und Änderung des Nachfrageverhaltens von Wasserressourcen) und urbanen Entwässerungssystemen (Kläranlagen, Ver- und Entsorgungsnetze) verkoppelt. Zusätzlich werden Komponenten und Prozesse von Energiesystemen (z. B. Talsperren, Stromversorgungsnetze, Wasserkraftwerke und Änderungen des Nachfrageverhaltens von Energiressourcen) berücksichtigt. Damit lassen sich nach den in [5] definierten „Systemgrenzen“ urbaner Wassersystems urbane und regionale Wassersysteme einschließlich der Endverbraucher untersuchen.

3.3 Methodische Grundlagen

3.3.1 Graphentheorie

Wasser- und Energiesysteme sind komplexe Netzwerke, die aus einer Vielzahl miteinander verknüpfter technischer und natürlicher Komponenten bestehen. Derartige Netzwerke lassen sich gut durch das Konzept der Graphentheorie darstellen. Eine

umfassende Übersicht dazu wurde unter anderem in [73] ausgearbeitet. Mit Hilfe der Graphentheorie lässt sich auch der hier vorgestellte Ansatz eingrenzen.

Netzwerke lassen sich formal als Quellen, Senken, Prozesse und Verbindungen abstrahieren. Quellen, Prozesse und Senken dienen der Freisetzung, Umwandlung bzw. Aufnahme von Stoffen, Gütern und Energie. Für Quellen, Prozesse und Senken lassen sich Kapazitäten und Bedarfe formulieren. Für den Austausch von Stoffen und Energie sind Quellen, Prozesse und Senken über entsprechende Elemente (z. B. Leitungen, Kanäle) verbunden. Aus Sicht der Graphentheorie stellen Quellen, Prozesse und Senken Ecken (E) und Verbindungen Kanten (K) dar.

Ein Graph G ist ein Tupel $G = (E, K)$ bestehend aus einer Eckenmenge E und einer Kantenmenge K , wobei gilt: $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ und $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$.

Ein Graph kann gerichtet oder ungerichtet sein. Der hier diskutierte Ansatz beschränkt sich auf gerichtete Graphen, die auf gerichteten Kanten beruhen, auch Diagraphen genannt: $\vec{G} = (E, K)$. Bei gerichteten Graphen bestehen die Kanten K aus geordneten Paaren (x, y) mit $x, y \in E$ und $x \neq y$. Dabei gilt:

$$K \subseteq \{\{x, y\} \mid x, y \in E, x \neq y\}$$

Bild 3 zeigt ein einfaches Beispiel eines gerichteten Graphen, der z. B. ein Trinkwasserverteilungssystem darstellen könnte. Hierbei repräsentieren die Knoten e_1 und e_2 die Quellen (z. B. Grundwasserquellen) und e_5 und e_6 die Bedarfspunkte (z. B. Haushalte in Stadtgebieten). Die Knoten e_3 und e_4 stellen Vereinigungs- bzw. Verzweigungspunkte dar und haben die Aufgabe, Ströme (z. B. Wasserströme) aus den Quellen zusammenzuführen bzw. zu verteilen. Die Verbindungslemente (z. B. Rohrleitungen) sind durch die Kanten k_1 , k_2 , k_3 , k_4 und k_5 dargestellt.

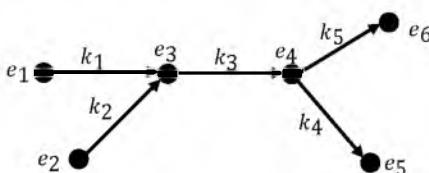


Bild 3: Beispiel eines einfachen gerichteten Graphen

Flüsse in Netzen werden durch Kapazitätsbeschränkungen, Benutzungskosten von Leitungen oder Kapazitätsbeschränkungen von Quellen begrenzt. Derartige Randbedingungen werden durch Zuordnung von Zahlenwerten zu Ecken und Kanten berücksichtigt. Wird beispielsweise der Transport von Stoffen und Energie von einer Quelle zu einer Senke durch Kapazitäten von Kanten (z. B. Transportnetz) begrenzt,

so spricht man von Kantenbewertungen. Wird eine beliebige Menge von Stoffen und Energie durch die Kapazität der Quelle eingeschränkt, so sind dies Eckenbewertungen. Ein Beispiel für Eckenbewertung aus der Sicht des Wasserressourcen-Managements ist physikalische Wasserknappheit. Die Wasserknappheit bezieht sich auf bestehende Wasserressourcen, deren Quantität unzureichend ist, um einen Wasserbedarf vollständig zu decken.

Neben Beschränkungen in Kapazität und Wirtschaftlichkeit wird der Transport von Stoffen und Energie in Netzen auch von den Bedarfänderungen der Senken begrenzt. Eine integrierte Betrachtung der verschiedenen Abgrenzungen auf Seiten des Angebots und der Nachfrage erweitert die Möglichkeiten, Ressourcen effizienter zu bewirtschaften und zu verteilen.

3.3.2 Materialflussanalyse

Klassische Materialflussanalyse

Eine Ausprägung der Graphentheorie ist die Materialflussanalyse, die eine Weiterentwicklung der in [50] vorgestellten Input-Output-Modelle darstellt. Sie befasst sich mit Erfassung, Beschreibung und Interpretation von Stoffwechselprozessen natürlicher und technischer Systeme (vgl. [11]). Gemäß der Materialflussanalyse ist ein System vollständig beschrieben, wenn in einem definierten Raum und Zeitintervall sowohl die Dichten als auch die Ströme von Energie und Materie bekannt sind. Sie umfasst im Wesentlichen die Schritte Systemabgrenzung, Datenerfassung von Stoff- und Energieströmen und deren Quantifizierung.

Ausgehend von bestimmten Fragestellungen zur Bilanzierung von Stoff-, Güter- und Energieströmen wird im ersten Schritt ein System ausgewählt und untersucht. Damit wird im Rahmen der Systemanalyse schon eine erste Entscheidung über die Wahl der Indikatorstoffe gefällt, die wichtig für die Beantwortung der Fragestellungen sind. Der zweite Schritt umfasst die Datenerfassung der Stoff-, Güter und Energieströme. Diese Ströme werden dann im dritten Schritt quantifiziert. Im vierten Schritt erfolgen die schematische Darstellung des Systems und die Auswertung der Ergebnisse. Das ermöglicht es, wichtige Quellen und Senken eines Stoffes und die relevanten Prozesse zu identifizieren und grundlegende Informationen zur Steuerung bzw. Optimierung bereitzustellen.

Zur Bilanzierung der Stoff-, Güter- und Energieströme in den Prozessen eines gewählten Systems gelten die Gesetze der Massen- und Energieerhaltung. Im Rahmen der Systemabgrenzung wird die Anzahl der Ströme N_F bestimmt, die durch das System fließen, wobei jedes System grundsätzlich aus inneren Strömen sowie aus

Eingangs- und Ausgangsströmen besteht. Bild 4 zeigt ein einfaches Beispiel für einen Prozess mit einem Eingangsgut \bar{u} und zwei Ausgangsgütern \bar{y}_1 und \bar{y}_2 .

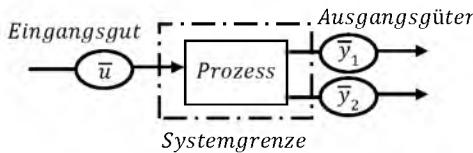


Bild 4: Beispiel eines Prozesses mit einem Eingangsgut und zwei Ausgangsgütern [68]

Für das Beispiel ist die Anzahl der Ströme N_F wie folgt definiert:

$$N_F = N_{In} + N_{Ip} + N_{Op} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

N_{In} ist dabei die Anzahl der inneren Ströme. N_{Ip} und N_{Op} sind die jeweiligen Anzahlen der Eingangs- und Ausgangsströme.

Für Einzelstoffe gilt in diesem Szenario das Gesetz der Massenerhaltung. Die Menge des Eingangsguts \bar{u} und der Ausgangsgüter \bar{y}_1 und \bar{y}_2 ist entweder die Masse eines Guts oder sind die Teilmassen eines Stoffes i in den entsprechenden Gütern \bar{u} , \bar{y}_1 und \bar{y}_2 . Es gilt somit:

$$u_i = y_{1,i} + y_{2,i} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Die in der Gl. 3.2 dargestellte Bilanzgleichung gilt jedoch nur für Prozesse ohne Speicherfunktion.

Die Material- und Energieströme in einem gewählten System können auf Grundlage von Messdaten und einfachen linearen Modellansätzen bilanziert werden. Im Beispiel in Bild 4 können im einfachsten Fall die Ausgangsgüter $y_{1,i}$ und $y_{2,i}$ mittels eines Transferkoeffizienten quantifiziert werden.

$$k_{y1,i} = \frac{y_{1,i}}{u_i} \text{ mit } u_i > 0 \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Es gilt dann für das Beispiel:

$$k_{y1,i} + k_{y2,i} = 1 \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Auch für diese Beziehung gilt die Annahme, dass im Prozess keine Speicherfunktion vorliegt. Die Ausgänge $\bar{y}(t)$ sind von den aktuellen Eingangsgrößen $\bar{u}(t)$ und den Systemparametern \bar{p} abhängig und können wie folgt beschrieben werden:

$$\bar{y}(t) = f(\bar{u}(t), \bar{p}) \quad (\text{Gl. 3.5})$$

Ein Nachteil der klassischen Materialflussanalyse ist, dass Systemzustände, die großen Einfluss auf das Systemverhalten haben, nicht berücksichtigt werden. Damit eignet sich die klassische Materialflussanalyse lediglich zur reinen Darstellung des Ist-Zustands eines Systems oder des Ergebnisses eines Systementwurfs.

Mathematische Materialflussanalyse (MMFA)

Die klassische Materialflussanalyse wird durch die MMFA (vgl. [60]) erweitert, die einen relativ weit gefassten Oberbegriff darstellt. Im Prinzip wird versucht, sich von der vereinfachten Darstellung von Prozessen durch messdatenbasierte Transferkoeffizienten zu lösen und diese durch systembeschreibende Funktionen zu ergänzen. Funktionen können von der Darstellung einfacher algebraischer Zusammenhänge bis hin zu Differenzialgleichungen reichen. Allgemein bietet die Methode der MMFA gegenüber der klassischen Materialflussanalyse folgende Vorteile:

- Skalierbarer und allgemeinerer Ansatz zum besseren Verständnis komplexer technischer und natürlicher Systeme, einschließlich der Bilanzierung von Stoff-, Güter- und Energiestromen
- Die Anwendung von MMFA verlangt vergleichsweise wenig Daten und Informationen. In diesem Kontext stellt die Methode einen komplementären und kostengünstigen Ansatz zur Datengewinnung und -generierung dar.
- Treibende Faktoren der Ströme von Stoffen, Gütern und Energie lassen sich auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen identifizieren.

3.3.3 Dynamische Prozessmodelle

Bei der dynamischen Modellierung verfahrenstechnischer Systeme werden dynamische Prozessmodelle zur Abbildung physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse verwendet. Wenn auch nicht in jedem Fall realisiert, sollten dynamische Prozessmodelle grundsätzlich auf der Erhaltung der Massenbilanz der einzelnen Teilprozesse beruhen. Änderungen des Systemzustandes bzw. einzelner Größen im Zeitverlauf sind von den aktuellen Eingangsgrößen $\bar{u}(t)$ und den Systemparametern \bar{p} abhängig und können damit allgemein beschrieben werden als

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = f(\bar{u}(t), \bar{p}) \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Die Ausgangsgrößen $\bar{y}(t)$ sind von den Zustandsänderungen des Systems $\bar{x}(t)$, den Eingangsgrößen $\bar{u}(t)$ und den Systemparametern \bar{p} abhängig und lassen sich allgemein wie folgt beschreiben:

$$\bar{y}(t) = f(\bar{x}(t), \bar{u}(t), \bar{p}) \quad (\text{Gl. 3.7})$$

Die Dynamik bzw. Funktionalität eines Prozesses oder der Zustand eines Systems kann von externen Größen, Betriebsstrategien sowie Steuerungs- und Regelungskonzepten beeinflusst werden. Dynamische Prozessmodelle bieten die Möglichkeit, den Systemzustand unter varierenden technischen und natürlichen Bedingungen abzubilden. Gegenüber der klassischen Materialflussanalyse bietet die Nutzung dynamischer Prozessmodelle folgende Vorteile:

- Für viele verfahrenstechnische Systeme sind etablierte Modellansätze verfügbar.
- Prozessmodelle beruhen auf geschlossenen Massenbilanzen.
- Mit Prozessmodellen lassen sich Systemzustände beschreiben.
- Aus Prozesszuständen lassen sich Kapazitäten und Bedarfe ableiten.
- Prozessmodelle reagieren qualitativ/quantitativ richtig auf varierende Randbedingungen.
- Prozessmodelle ermöglichen die Betrachtung von Automatisierungskonzepten.

Durch Einbettung dynamischer Prozessmodelle in die MMFA bietet der hier vorgestellte Ansatz die Möglichkeit zur Untersuchung des Systemverhaltens sowohl über kürzere Zeiträume (z. B. Tage) hinweg als auch über längere (z. B. Jahre, Jahrzehnte). Auswirkungen planerischer Entscheidungen lassen sich dann qualitativ und quantitativ bilanzieren.

3.4 Modellierung von Quellen

Einfache Modellansätze

Für die Modellierung von Stoff- und Energiequellen ohne Speicher- und Umwandlungsfunktion zeigt Bild 5 eine vereinfachte Darstellung sowie das allgemeine Prinzip der Bewirtschaftung von Stoff- und Energiequellen. Hier stellen die Knoten $e_{Q,F}$ und $e_{Q,E}$ die Stoff- bzw. die Energiequelle dar und die Knoten $e_{S,F}$ und $e_{S,E}$ die Senken, die die Bedarfe an Stoffen $d_{S,F}$ bzw. Energie $d_{S,E}$ formulieren.



Bild 5: Einfaches Prinzip der Bewirtschaftung von Stoff- (links) und Energiequellen (rechts)

$c_{Q,F}(t)$: Förderkapazität der Stoffquelle; $c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Energiequelle; $f_Q(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $f_E(t)$: Energiestrom aus der Energiequelle; $d_{S,F}(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen; $d_{S,E}(t)$: Bedarf der Senke an Energie

Im einfachsten Fall wird die Bewirtschaftung von Stoffen und Energie auf die maximale Förderkapazität der Stoffquelle ($c_{Q,F}(t)$) bzw. der Energiequelle ($c_{Q,E}(t)$) begrenzt. Es gilt somit:

$$c_{Q,F}(t) = \begin{cases} p_S, & \text{KONSTANT} \\ p_S(t), & \text{DYNAMISCH} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

$$c_{Q,E}(t) = \begin{cases} p_E, & \text{KONSTANT} \\ p_E(t), & \text{DYNAMISCH} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

mit:

- p_S : Maximale Förderkapazität der Stoffquelle
 p_E : Maximale Förderkapazität der Energiequelle
 p_S, p_E : konstant oder zeitvariabel

Der Stoffstrom aus der Quelle ($f_Q(t)$) lässt sich wie folgt ermitteln:

$$f_Q(t) = \begin{cases} d_{S,F}(t), & \text{WENN } c_{Q,F}(t) \geq d_{S,F}(t) \\ c_{Q,F}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad \text{mit } 0 \leq f_Q(t) \leq c_{Q,F}(t) \quad (\text{Gl. 3.10})$$

mit:

- $d_{S,F}$: Stoffbedarf der Senke zum Zeitpunkt t

Der Energiestrom aus der Energiequelle ($f_E(t)$) lässt sich analog mittels der folgenden Gleichung berechnen:

$$f_E(t) = \begin{cases} d_{S,E}(t), & \text{WENN } c_{Q,E}(t) \geq d_{S,E}(t) \\ c_{Q,E}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad \text{mit } 0 \leq f_E(t) \leq c_{Q,E}(t) \quad (\text{Gl. 3.11})$$

mit:

$d_{S,E}$: Energiebedarf der Senke zum Zeitpunkt t

Bild 6 zeigt das allgemeine Prinzip der Bewirtschaftung gekoppelter Quellen von Stoffen und Energie ohne Speicher- und Umwandlungsfunktion.

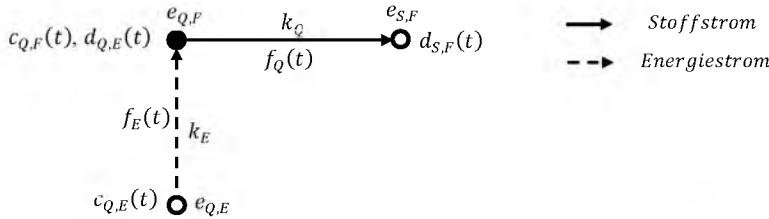


Bild 6: Einfaches Prinzip der Bewirtschaftung gekoppelter Quellen

$c_{Q,F}(t)$: Förderkapazität der Stoffquelle; $c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Energiequelle; $f_Q(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $f_E(t)$: Energiestrom aus der Energiequelle; $d_{S,F}(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen; $d_{Q,E}(t)$: Bedarf der Stoffquelle an Energie

Die maximale Förderkapazität einer Stoffquelle ($c_{Q,F}(t)$) lässt sich in Abhängigkeit von der maximalen Förderkapazität einer Energiequelle ($c_{Q,E}(t)$) wie folgt ermitteln:

$$c_{Q,F}(t) = \text{MIN} \left(p_S, c_{Q,E}(t) \cdot \frac{1}{E_S} \right) \quad \text{mit } E_S > 0 \quad (\text{Gl. 3.12})$$

mit:

- p_S : Maximale Förderkapazität der Stoffquelle
- $c_{Q,E}(t)$: Maximale Förderkapazität der Energiequelle
- E_S : Energie/Abfluss-Verhältnis, also Energieverbrauch pro entnommene Stoffeinheit
- $p_S, E_S, c_{Q,E}(t)$: Konstant oder zeitvariabel

Der Energiebedarf einer Stoffquelle ($d_{Q,E}(t)$) in Zusammenhang mit dem Bedarf an Stoffen der Senke ($d_{S,F}(t)$) kann wie folgt berechnet werden:

$$d_{Q,E}(t) = E_S \cdot \text{MIN} \left(p_S, d_{S,F}(t) \right) \quad \text{mit } E_S > 0 \quad (\text{Gl. 3.13})$$

Auf der Grundlage des Energiebedarfs der Stoffquelle ($d_{Q,E}(t)$) und der maximalen Förderkapazität der Energiequelle ($c_{Q,E}(t)$) lassen sich die Energieströme ($f_E(t)$) zur Stoffquelle wie folgt ermitteln:

$$f_Q(t) = \begin{cases} d_{Q,E}(t), & \text{WENN } c_{Q,E}(t) \geq d_{Q,E}(t) \\ c_{Q,E}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.14})$$

Auf der Basis der in Gl. 3.12 ermittelten maximalen Förderkapazität der Stoffquelle ($c_{Q,F}(t)$) und des Bedarfes der Senke an Stoffen ($d_{S,F}(t)$) lassen sich die Stoffströme aus der Stoffquelle ($f_Q(t)$) mittels Gl. 3.10 berechnen.

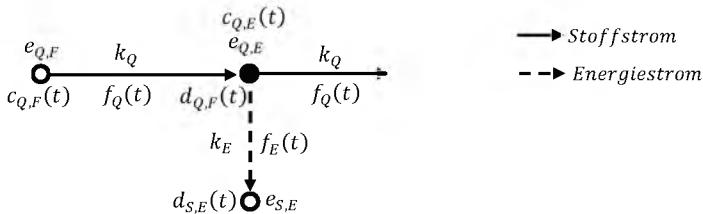


Bild 7: Einfaches Prinzip der Modellierung von Quellen mit Umwandlungsfunktion (Makroebene)

$c_{Q,F}(t)$: Förderkapazität der Stoffquelle; $c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Energiequelle; $f_Q(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $f_E(t)$: Energiestrom aus der Energiequelle; $d_{S,E}(t)$: Bedarf der Senke an Energie; $d_{Q,F}(t)$: Bedarf der Energiequelle an Stoffen

Die Bewirtschaftung von Stoffen oder Energie aus Quellen mit Umwandlungs-, aber ohne Speicherfunktion wird auch im einfachsten Fall auf deren maximale Förderkapazität sowie auf den Bedarf der Senke begrenzt. Bild 7 stellt beispielhaft eine Energiequelle mit Umwandlungs- und ohne Speicherfunktion dar, in der Stoffe in Energie umgewandelt werden.

Die maximale Förderkapazität einer Energiequelle ($c_{Q,E}(t)$) lässt sich in Abhängigkeit von der maximalen Förderkapazität einer Stoffquelle ($c_{Q,F}(t)$) wie folgt ermitteln:

$$c_{Q,E}(t) = \text{MIN} \left(p_E, c_{Q,F}(t) \cdot \frac{1}{S_E} \right) \quad \text{mit } S_E > 0 \quad (\text{Gl. 3.15})$$

mit:

- p_E : Maximale Förderkapazität der Energiequelle
- $c_{Q,F}(t)$: Maximale Förderkapazität der Stoffquelle
- S_E : Abfluss/Energie-Verhältnis, also Stoffverbrauch pro entnommene Energieeinheit
- $p_E, S_E, c_{Q,F}(t)$: Konstant oder zeitvariabel

Der Bedarf an Stoffen der Energiequelle ($d_{Q,F}(t)$) in Zusammenhang mit Energiebedarf der Senke ($d_{S,E}(t)$) lässt sich wie folgt berechnen:

$$d_{Q,F}(t) = S_E \cdot \min(p_E, d_{S,E}(t)) \text{ mit } S_E > 0 \quad (\text{Gl. 3.16})$$

Auf der Grundlage des Bedarfs an Stoffen der Energiequelle ($d_{Q,F}(t)$) und der maximalen Förderkapazität der Stoffquelle ($c_{Q,F}(t)$) lässt sich der Stoffstrom ($f_Q(t)$) zur Energiequelle mittels Gl. 3.17 berechnen.

$$f_Q(t) = \begin{cases} d_{Q,F}(t), & \text{WENN } c_{Q,F}(t) \geq d_{Q,F}(t) \\ c_{Q,F}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.17})$$

Analog kann der Energiestrom ($f_E(t)$) aus der Energiequelle mittels Gl. 3.11 berechnet werden.

Als Gegenbetrachtung zu den bereits angewandten einfachen Modellansätzen zur Bewirtschaftung von Stoff- und Energiequellen werden im Folgenden Prozessmodelle dargestellt.

Prozessmodelle

Prozessmodelle erlauben – in Vergleich zu dem vorgestellten einfachen Modellansatz für die Modellierung von Quellen – die Erfassung der Zustandsänderungen von Systemen unter variierenden Randbedingungen. In diesem Kontext unterscheidet sich die Modellierung von Quellen mittels Prozessmodellen (siehe Bild 8) nur in der Beschreibung der maximalen Förderkapazität.



Bild 8: Allgemeines Prinzip der Modellierung von Quellen mit Transport- und Speicherfunktion

$u(t)$: Zuflüsse von Stoffen zur Stoffquelle; $c_{Q,F}(t)$: Förderkapazität der Stoffquelle; $y(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $d_{S,F}(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen

Die maximale Förderkapazität einer Stoff- oder Energiequelle ist von den aktuellen Eingangs- $u(t)$ und Zustandsgrößen $x(t)$ sowie von den Systemparametern p abhängig und kann allgemein wie folgt beschrieben werden:

$$c_{Q,F}(t) = f(u(t), x(t), p) \quad (\text{Gl. 3.18})$$

Die Änderung eines Stoffes in einem Prozess mit Speicher- und Transportfunktion lässt sich allgemein wie folgt beschreiben:

$$\frac{dx(t)}{dt} = u(t) - y(t) \quad (\text{Gl. 3.19})$$

mit:

- $u(t)$: Zuflüsse von Stoffen zur Stoffquelle
 $y(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle

Der Stoffstrom ($y(t)$) aus Quellen mit Transport- und Speicherfunktion lässt sich ebenfalls mittels Gl. 3.10 ermitteln.

Im Abschnitt 3.8 werden anhand einfacher Beispiele die Grundprinzipien der Modellierung von Quellen mit Transport- und Speicherfunktion gezeigt.

3.5 Modellierung von Senken

Einfache Modellansätze

Bild 9 zeigt eine vereinfachte Darstellung und das allgemeine Prinzip der Modellierung von Senken.



Bild 9: Einfaches Prinzip der Modellierung von Senken

$e_{Q,F}$: Förderkapazität der Stoffquelle; $e_{Q,E}$: Förderkapazität der Energiequelle; $f_Q(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $f_E(t)$: Energiestrom aus der Energiequelle; $d_{S,E}(t)$: Bedarf der Senke an Energie; $d_{S,F}(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen

Im einfachsten Fall wird der Zufluss von Stoffen oder Energie in eine Senke auf deren Bedarf bzw. auf deren maximale Aufnahmekapazität und auf die maximale Förderkapazität der Stoff- oder Energiequelle begrenzt. Die Flüsse von Stoffen oder Energie in Senken lassen sich ebenfalls mittels Gl. 3.10 und Gl. 3.11 ermitteln.

3.6 Modellierung von Prozessen

Einfache Modellansätze

Bild 10 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung von Prozessen mit Transportfunktion von Stoffen und Energie.

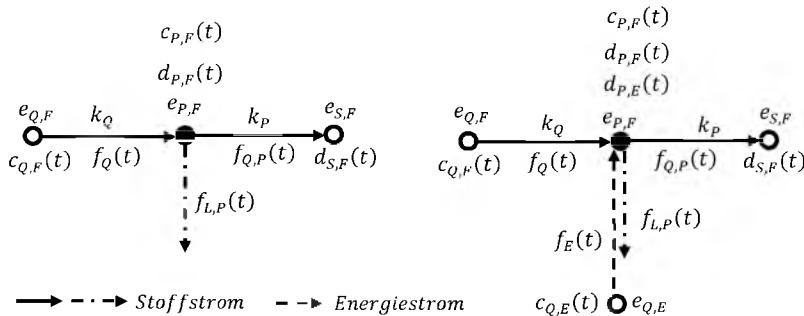


Bild 10: Grundprinzipien der Modellierung von Prozessen mit Transportfunktion

$c_{Q,F}(t)$: Förderkapazität der Stoffquelle; $c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Energiequelle; $c_{P,F}(t)$: Transportkapazität von Stoffen des Prozesses; $f_Q(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $f_E(t)$: Energiestrom aus der Energiequelle; $f_{Q,P}(t)$: Stoffstrom aus dem Prozess; $f_{L,P}(t)$: Verlust von Stoffen innerhalb des Prozesses; $d_{P,E}(t)$ und $d_{P,F}(t)$: Energie- bzw. Stoffbedarf des Prozesses; $d_{S,F}(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen

Der Transport von Stoffen in einem Prozess wird im Prinzip auf dessen Transportkapazität ($c_{P,F}(t)$) begrenzt. Es gilt somit:

$$c_{F,MAX}(t) = \begin{cases} p_S, & \text{KONSTANT} \\ p_S(t), & \text{DYNAMISCH} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.20})$$

mit:

p_S : Maximale Transportkapazität des Prozesses. p_S kann konstant oder zeitvariabel sein

Die relativen Verluste ($L_P(t)$) von Stoffen innerhalb des Prozesses stellen einen weiteren wichtigen Aspekt dar. Diese können im einfachsten Fall auch mittels Einzelparametern oder über zeitvariable Parameter definiert werden.

$$L_P(t) = \begin{cases} p_L/100, & \text{KONSTANT} \\ p_L(t)/100, & \text{DYNAMISCH} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.21})$$

mit:

p_L : Verlust von Stoffen im Prozess. p_L kann konstant oder zeitvariabel sein

Der Gesamtbedarf an Stoffen des Prozesses $(d_{P,F}(t))$ ohne Anschluss an einer Energiequelle (vgl. Bild 10, linke Seite) lässt sich in Abhängigkeit von dessen Transportkapazität $(c_{P,F}(t))$ und dem Bedarf der Senke $(d_{S,F}(t))$ sowie dem Anteil am relativen Verlust $(a(t))$ an Stoffen ermitteln.

$$d_{P,F}(t) = \text{MIN} \left(c_{P,F}(t), d_{S,F}(t) \cdot a(t) \right) \quad (\text{Gl. 3.22})$$

mit:

$$a(t) = \begin{cases} 1 + L_p(t), \text{VerlustNachBedarf} \\ \frac{1}{\text{MAX}(1E-10, (1 - L_p(t)))}, \text{VerlustNachNetz} \end{cases} \quad \text{mit } L_p(t) \geq 1E-10 \quad (\text{Gl. 3.23})$$

Gl. 3.22 und Gl. 3.23 zeigen, dass sich der gesamte Stoffbedarf des Prozesses $(d_{P,F}(t))$ mittels zweier unterschiedlicher Ansätze zur Abschätzung der Stoffverluste quantifizieren lässt: a) Verlust bezogen auf den Bedarf („VerlustNachBedarf“) und b) Verlust bezogen auf den Verbrauch („VerlustNachNetz“). Beim ersten Ansatz werden die Verluste zum Stoffbedarf der Senke $(d_{S,F}(t))$ addiert und dieser mit der Transportkapazität des Prozesses $(c_{P,F}(t))$ verglichen. Das Resultat wird als gesamter Stoffbedarf des Prozesses zur Stoffquelle übermittelt. Beim zweiten Ansatz wird der Stoffbedarf der Senke $(d_{S,F}(t))$ durch die Verluste geteilt und das Resultat mit der Transportkapazität des Prozesses $(c_{P,F}(t))$ verglichen. Das Ergebnis entspricht dem gesamten Stoffbedarf des Prozesses, der zur Stoffquelle übermittelt wird.

Der Gesamtbedarf an Stoffen des Prozesses $(d_{P,F}(t))$ mit Anschluss an einer Energiequelle (vgl. Bild 10, rechte Seite) kann in Abhängigkeit von dessen Transportkapazität $(c_{P,F}(t))$, dem Bedarf der Senke $(d_{S,F}(t))$ und der Förderkapazität der Energiequelle $(c_{Q,E}(t))$ sowie dem Anteil am relativen Verlust $(a(t))$ an Stoffen ermittelt werden.

$$d_{P,F}(t) = \text{MIN} \left(c_{P,F}(t), d_{S,F}(t) \cdot a(t), c_{Q,E}(t) \cdot \frac{1}{E_S} \right) \quad \text{mit } E_S > 0 \quad (\text{Gl. 3.24})$$

mit:

E_S : Energie/Abfluss-Verhältnis, also Energieverbrauch pro transportierte Stoffeinmenge. E_S kann konstant oder zeitvariabel sein

Analog zum gesamten Stoffbedarf des Prozesses mit Anschluss an einer Energiequelle lässt sich der Energiebedarf $(d_{P,E}(t))$ für den Transport von Stoffen wie folgt berechnen:

$$d_{P,E}(t) = E_S \cdot \text{MIN}(c_{P,F}(t), d_{S,F}(t) \cdot a(t), c_{Q,F}(t)) \quad (\text{Gl. 3.25})$$

Der Zufluss von Stoffen $(f_Q(t))$ mit und ohne Anschluss an einer Energiequelle lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_Q(t) = \begin{cases} d_{P,F}(t), & \text{WENN } c_{Q,F}(t) \geq d_{P,F}(t) \\ c_{Q,F}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.26})$$

Die Energieströme aus der Energiequelle ergeben sich schließlich wie folgt:

$$f_E(t) = \begin{cases} d_{P,E}(t), & \text{WENN } c_{Q,E}(t) \geq d_{P,E}(t) \\ c_{Q,E}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.27})$$

Die Abflüsse aus dem Prozess $(f_{Q,P}(t))$ ergeben sich dann wie folgt:

$$f_{Q,P}(t) = f_Q(t) \cdot \begin{cases} 1 - L_P(t), & \text{VerlustNachBedarf} \\ \frac{1}{\text{MAX}(1E - 10, (1 + L_P(t)))}, & \text{VerlustNachNetz} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.28})$$

Die Verluste von Stoffen $(f_{L,P}(t))$ lassen sich in einfacher Form aus der Differenz der Zuflüsse und Abflüsse berechnen:

$$f_{L,P}(t) = f_Q(t) - f_{Q,P}(t) \quad (\text{Gl. 3.29})$$

3.7 Ressourcenbewirtschaftung und -verteilung

3.7.1 Problemstellung

Zu den zentralen Aufgaben und Bewirtschaftungszielen von Infrastrukturen gehören Steuerung und Verteilung von Stoffen und Energie, was letztendlich auf Nachfrage und Angebot basiert. Sind in einem System Bedarfe und Kapazitäten bekannt, so kann die folgende Frage beantwortet werden: Wieviel kann von einer oder mehreren Quellen zu einer oder mehreren Senken transportiert werden, wenn quellenseitig die Kapazität und/oder senkenseitig der Bedarf variiert?

Im Falle einer Quelle von Stoffen oder Energie und einer Senke handelt es sich um einen einfachen Zusammenhang. Die Stoff- und Energieströme lassen sich auf der Grundlage der Grundprinzipien der Modellierung von Quellen und Senken ermitteln und allgemein mittels Gl. 3.10 bzw. Gl. 3.11 (vgl. Abschnitt 3.40) beschreiben.

Die Bewirtschaftung verschiedener Quellen hängt von deren Kapazitäten, dem Bedarf und von Bewirtschaftungszielen ab. Unabhängig davon, ob die verschiedenen Quellen auf der Basis langjähriger Erfahrungen des Betriebspersonals oder mittels Automatisierungstechniken bewirtschaftet werden, kann die Bewirtschaftung von Quellen auf zwei Prinzipien zurückgeführt werden, und zwar nach priorisierter und gleichmäßiger Bewirtschaftung.

3.7.2 Bewirtschaftung nach Priorisierung

Bild 11 zeigt anhand eines einfachen Beispiels das Prinzip der Bewirtschaftung mehrerer Stoff- oder Energiequellen. Hierbei repräsentieren die Knoten e_1 , e_2 und e_n die Quellen, e_z und e_s sind Vereinigungspunkt und Bedarfspunkt (Senke). Die in den grauen Kästchen dargestellten Nummern stellen die Priorisierung der Quellen dar. $c_{Q,1}$ ist die Kapazität der Stoff- oder Energiequelle mit höchster Priorität. Das bedeutet, dass der Bedarf der Senke d_s durch diese Quelle zu jedem Zeitpunkt gedeckt werden soll. Ist deren Kapazität nicht ausreichend bzw. erschöpft, werden weitere Quellen gemäß der Priorisierung bewirtschaftet.

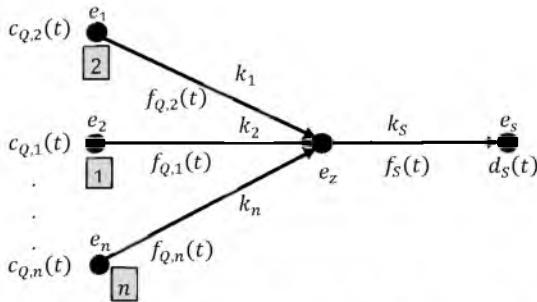


Bild 11: Priorisierte Bewirtschaftung von Quellen [68]

Die Stoff- oder Energieströme in Netzen ohne Kapazitätsbeschränkungen von Transportleitungen (Kanten) und ohne Verluste (idealer Fall) lassen sich analog zu Gl. 3.10 und Gl. 3.11 (vgl. Abschnitt 3.4) berechnen. Es gilt somit:

$$f_{Q,1}(t) = \begin{cases} d_s(t), & \text{WENN } c_{Q,1}(t) \geq d_s(t) \\ c_{Q,1}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.30})$$

$$f_{Q,j}(t) = \begin{cases} b(t), & \text{WENN } c_{Q,j}(t) \geq b(t) \\ c_{Q,j}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.31})$$

$$\text{mit } b(t) = \max \left(0, d_s(t) - \sum_{j=1}^{j-1} c_{Q,j}(t) \right) \quad (\text{Gl. 3.32})$$

j : Nummer der Quelle; $j: 2, \dots, n$

Die Stoff- oder Energieströme aus einem Vereinigungspunkt mit n unterschiedlichen Eingängen und einem Ausgang (vgl. e_z , Bild 11) ergeben sich dann durch:

$$f_s(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) \quad (\text{Gl. 3.33})$$

i : Index des Eingangs; $i: 1, \dots, n$

3.7.3 Gleichmäßige Bewirtschaftung

Bei der gleichmäßigen Bewirtschaftung von Stoff- oder Energiequellen ergeben sich deren Ausgangsströme über die Proportionalität der jeweiligen Kapazität zur Summe der Kapazitäten aller angeschlossenen Quellen.

$$CT_Q(t) = \sum_{j=1}^n c_{Q,j}(t) \quad (\text{Gl. 3.34})$$

$$K_{Q,j}(t) = \frac{c_{Q,j}(t)}{CT_Q(t)} \text{ mit } CT_Q(t) > 0 \quad (\text{Gl. 3.35})$$

$$f_{Q,j}(t) = \begin{cases} c_{Q,j}(t), & \text{WENN } CT_Q(t) < d_S(t) \\ d_S(t) \cdot K_{Q,j}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.36})$$

j : Nummer der Quelle; $j: 1, \dots, n$; $CT_Q(t)$ und $K_{Q,j}(t)$ sind die Gesamtkapazität und der Kapazitätsanteil der Stoff- oder Energiequelle j zum Zeitpunkt t , $f_{Q,j}(t)$ und $d_S(t)$ sind der von Quelle j ausgegebene Stoff- oder Energiestrom und der Bedarf der Senke zum Zeitpunkt t .

3.7.4 Verteilung nach Priorisierung

Bild 12 zeigt anhand eines einfachen Beispiels das Prinzip der Verteilung auf Senken. Hierbei repräsentieren der Knoten e_Q die Quelle und die Knoten e_1, e_2 und e_n die Bedarfspunkte. Die in den grauen Kästchen dargestellten Nummern stellen die Priorisierung der Bedarfspunkte dar.

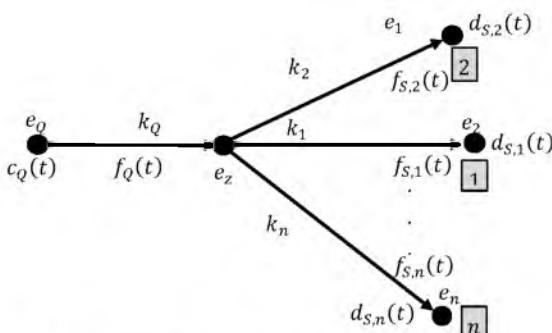


Bild 12: Priorisierte Verteilung auf Senken [68]

Die Verteilung von Stoff- oder Energieströmen nach Priorisierung von einer Stoff- oder Energiequelle zu mehreren Senken lässt sich analog zur priorisierten Bewirtschaftung verschiedener Stoff- oder Energiequellen vornehmen.

$$f_{S,1}(t) = \begin{cases} d_{S,1}(t), & \text{WENN } c_Q(t) \geq d_{S,1}(t) \\ c_Q(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.37})$$

$$f_{S,j}(t) = \begin{cases} c(t), & \text{WENN } d_{S,j}(t) > c(t) \\ d_{S,j}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.38})$$

$$\text{mit } c(t) = \max \left(0, c_Q(t) - \sum_{j=1}^{j-1} d_{S,j}(t) \right) \quad (\text{Gl. 3.39})$$

j : Nummer der Senke; $j: 2, \dots, n$

3.7.5 Gleichmäßige Verteilung

Hier kann ebenso analog zur gleichmäßigen Bewirtschaftung von Stoff- oder Energiequellen vorgegangen werden.

$$DT_S(t) = \sum_{j=1}^n d_{S,j}(t) \quad (\text{Gl. 3.40})$$

$$K_{S,j}(t) = \frac{d_{S,j}(t)}{DT_S(t)} \quad \text{mit } DT_S(t) > 0 \quad (\text{Gl. 3.41})$$

$$f_{S,j}(t) = \begin{cases} d_{S,j}(t), & \text{WENN } c_Q(t) \geq DT_S(t) \\ c_Q(t) \cdot K_{S,j}(t), & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.42})$$

j : Nummer der Senke; $j: 1, \dots, n$

$DT_S(t)$ und $K_{S,j}(t)$ sind der Gesamtbedarf und der Bedarfsanteil der Senke j zum Zeitpunkt t , $f_{S,j}(t)$ und $c_Q(t)$ sind dabei der auf Senke j verteilte Strom und die Kapazität der Quelle zum Zeitpunkt t .

Mit dem hier vorgestellten Weg lassen sich die Transferkoeffizienten für Knoten, die für ein betrachtetes System die Verteilung von Ressourcen realisieren, zu jedem Zeitpunkt automatisch bestimmen.

3.8 Beispiele für Prozessmodelle

3.8.1 Prozessmodell für Endverbraucher

Charakterisierung häuslichen Abwassers

Bisher wurde der Bedarf einer Senke bzw. eines Prozesses an Stoffen oder Energie über konstante oder zeitabhängige Parameter modelliert. Endverbraucher und deren Verbrauchsverhalten stellen die Treiber für die Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen und Infrastrukturen dar.

Zur Charakterisierung von Abwasser aus Privathaushalten wurden zwölf Fraktionen definiert. Die Fraktionen sind in Tabelle A 5 (Abschnitt 6.1) dargestellt und wurden auf der Basis der Arbeiten [74] und [75] definiert (Tabelle A 6, Abschnitt 6.1). Hier wurden die Stickstoff- ($n_{SS}, n_{SI}, n_{XS}, n_{XI}, n_{XB}$) und Phosphoranteile ($p_{SS}, p_{SI}, p_{XS}, p_{XI}, p_{XB}$) sowie die Anteile an Trockensubstanz ($ts_{SS}, ts_{SI}, ts_{XS}, ts_{XI}, ts_{XB}$) einzelner CSB-Fraktionen aus dem ASM3biop-Modell entnommen (vgl. [70]). Für die Bestimmung der Kohlenstoffanteile ($c_{SS}, c_{SI}, c_{XS}, c_{XI}, c_{XB}$) einzelner CSB-Fraktionen wurden die Werte des ADM-Modells für die anaerobe Faulung von Klärschlamm (vgl. [76]) verwendet. Auf der Grundlage der verschiedenen Anteile lassen sich wichtige Schmutzstoffe wie der gesamte Stickstoff (N), gesamte Phosphor (P), gesamte Kohlenstoff (C) und die Trockensubstanz (TS) in den verschiedenen Grau- und Schwarzwasserströmen in den Privathaushalten berechnen. Der gesamte CSB setzt sich aus gelösten leicht abbaubaren organischen Stoffen (SS), gelösten biologisch inerten organischen Stoffen (SI), partikulären leicht abbaubaren organischen Stoffen (XS), partikulären biologisch inerten organischen Stoffen (XI) sowie Biomasse (XB) zusammen. Es gilt somit:

$$CSB = CSB_{SS} + CSB_{SI} + CSB_{XS} + CSB_{XI} + CSB_{XB} \quad \left[\frac{g \text{ CSB}}{p \cdot d} \right] \quad (\text{Gl. 3.43})$$

Die CSB-Anteile wurden auf der Basis der in [74] ermittelten CSB-Aufteilungsfaktoren (f_{SS}, f_{XS}, f_{XB}) (Tabelle A 7, Abschnitt 6.1, Kapitel 6.2) berechnet. Die CSB-Anteile dienen zur Bilanzierung weiterer Fraktionen aus Tabelle A 5 (Abschnitt 6.1), wie dem gesamten organisch gebundenen Stickstoff (ON), dem gesamten organisch gebundenen Phosphor (OP) und dem gesamten organisch gebundenen Kohlenstoff (OC) in Grauwasser-, Schwarzwasser- und Fäkalienströmen in den Privathaushalten. Für die Bilanzierung weiterer Fraktionen aus Tabelle A 5 wie des gesamten anorganischen Stickstoffs (IN), des gesamten anorganischen Phosphors (IP) und des gesamten anorganischen Kohlenstoffs (IP) wurden die in [77] ermittelten Werte verwendet (Tabelle A 7, Abschnitt 6.1). Mittels der Gleichungen von Anhang B zur

Charakterisierung von Abwasser (Ab-schnitt 6.2) werden die einzelnen Fraktionen aus Tabelle A 5 (Abschnitt 6.1) gebildet.

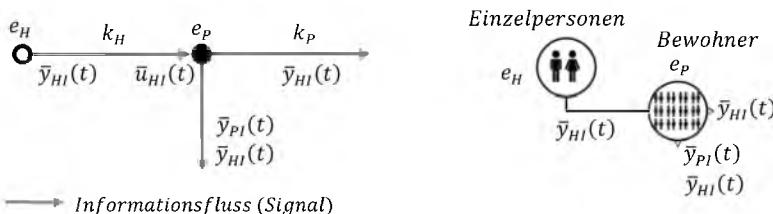


Bild 13: Modellierung der Kontaktpunkte Einzelpersonen und Bewohner

$\bar{y}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{HI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Fäzes und Urin) pro Kopf; $\bar{y}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Durch die plausible Bilanzierung verschiedener Grau- und Schwarzwasserströme in den Privathaushalten lassen sich die Auswirkungen variierender Randbedingungen auf Systemzustand und Reinigungsleistung verfahrenstechnischer Anlagen (z. B. Kläranlagen) quantifizieren.

Auf der Grundlage der vorgestellten Prinzipien für die Charakterisierung der Abwasserströme werden im Folgenden Stoff- und Energieströme in Privathaushalten und Kontaktpunkte (Tabelle A 3, Abschnitt 6.1) mittels Prozessmodellen modelliert. Hier lassen sich einwohnerspezifische Randbedingungen wie Bevölkerungs- und Haushaltzahl sowie physiologische Bedürfnisse von Menschen und Ressourcenbedarfs- und Ressourcenentsorgungsmuster berücksichtigen. Tabelle A 4 (Abschnitt 6.1) zeigt die Stoff- und Energieströme, die in diesem Rahmen eine Rolle spielen. Tabelle A 5 stellt die in den Abwasserströmen berücksichtigten Fraktionen dar. Die Berechnung dieser Fraktionen ist in Anhang B gezeigt. Tabelle A 8 und Tabelle A 9 listen die personenbezogenen Parameter für Grauwasser bzw. Urin und Fäkalien auf. Bild 13 zeigt die Grundprinzipien (linke Seite) und die Anwendung (rechte Seite) der Modellierung einwohnerspezifischer Randbedingungen.

Der Fäkalienanfall pro Kopf (Urin und Fäzes) ($\bar{y}_{HI}(t)$) lässt sich allgemein wie folgt ausdrücken:

$$\bar{u}_{HI}(t) = \bar{y}_{HI}(t) = \begin{pmatrix} \bar{y}_{UR}(t) \\ \bar{y}_{FA}(t) \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3.44})$$

$$\bar{y}_{UR}(t) = \begin{pmatrix} p_{TN,UR} \\ p_{TP,UR} \\ p_{TC,UR} \\ p_{COD,UR} \\ p_{TSS,UR} \\ p_{VSS,UR} \\ p_{Q,UR} \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3.45})$$

$$\bar{y}_{FA}(t) = \begin{pmatrix} p_{TN,FA} \\ p_{TP,FA} \\ p_{TC,FA} \\ p_{COD,FA} \\ p_{TSS,FA} \\ p_{VSS,FA} \\ p_{Q,FA} \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3.46})$$

$\bar{y}_{UR}(t)$ und $\bar{y}_{FA}(t)$ sind dabei die Vektoren, die sich aus den Parametern der Tabelle A 9 (Abschnitt 6.1) zusammensetzen, mit:

$p_{M,FA}(t)$: Pro-Kopf-Frachten des Schmutzstoffs M im Fäzesstrom in $[g\ M/p/d]$

$p_{M,UR}(t)$: Pro-Kopf-Frachten des Schmutzstoffs M im Urinstrom in $[g\ M/p/d]$

$M: TN, TP, TC, CSB, TSS, oTS$

$p_{Q,UR}(t)$: Urinmenge in $[l/p/d]$ (Tabelle A 9)

$p_{Q,FA}(t)$: Fäzesmenge in $[l/p/d]$ (Tabelle A 9)

Der Informationsfluss zu den Kontaktpunkten lässt sich allgemein wie folgt beschreiben:

$$\bar{u}_{pI}(t) = \begin{pmatrix} N_{EW}(t) \\ N_{HH}(t) \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3.47})$$

$N_{EW}(t)$ und $N_{HH}(t)$ sind die Anzahlen der Einwohner und der Haushalte

Die Anzahl der an den Kontaktpunkt Z (Tabelle A 3) angeschlossenen Bevölkerung ($N_{EW,Z}(t)$) lässt sich allgemein wie folgt berechnet:

$$N_{EW,Z}(t) = N_{EW}(t) \cdot p_{EW,Z}(t) \cdot 0.01 [p] \quad (\text{Gl. 3.48})$$

mit:

$N_{EW}(t)$: Gesamtbevölkerung zum Zeitpunkt t in $[P]$

$p_{EW,Z}(t)$: Anteil der an den Kontaktpunkt Z angeschlossenen Bevölkerung zum Zeitpunkt t in [%]

0.01 Umrechnungsfaktor von 100 %

Die berücksichtigten Kontaktpunkte in Privathaushalten Z, die Eingänge von Stoffen und/oder Energie sowie die resultierenden Ausgänge von Stoffen sind in Tabelle A 3 (Abschnitt 6.1) dargestellt. Auf der Grundlage von Tabelle A 3 zeigt Bild 14 beispielhaft die Grundprinzipien der Modellierung des Trinkwasser- und Stromverbrauchs und die daraus resultierenden Wasser-, Grauwasser- und Energieströme für den Kontaktpunkt Wäschewaschen mit Waschmaschine.

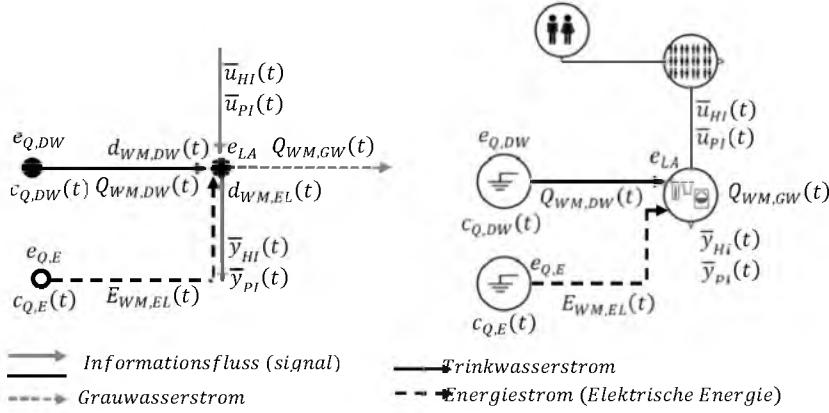


Bild 14: Modellierung des Kontaktpunktes Wäschewaschen mit Waschmaschine

$c_{Q,DW}(t)$ und $c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Trinkwasserquelle bzw. der Energiequelle. $Q_{WM,DW}(t)$ und $E_{WM,EL}(t)$: Trinkwasser- bzw. Energiestrom zum Kontaktpunkt Wäschewaschen. $d_{WM,EL}(t)$ und $d_{WM,DW}(t)$: Bedarf des Kontaktpunktes Wäschewaschen an Energie bzw. Trinkwasser. $Q_{WM,GW}(t)$: Grauwasserstrom aus dem Kontaktpunkt Wäschewaschen. $\bar{u}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Urin und Fäzes) pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Der Trinkwasserbedarf des Wäschewaschens mit $(d_{WM,DW}(t))$ und ohne Waschmaschine $(d_{HW,DW}(t))$ lässt sich mittels Gl. 3.49 bzw. Gl. 3.50 berechnen:

$$d_{WM,DW}(t) = N_{EW,WM}(t) \cdot n_{D,WM}(t) \cdot n_{OH,WM}(t) \cdot p_{WC,WM}(t) \cdot 0.001 \cdot \frac{1}{30} \left[\frac{m^3}{d} \right] \quad (\text{Gl. 3.49})$$

mit:

- $N_{EW,WM}(t)$ Anzahl von Personen in der Bevölkerung mit Anschluss an eine Waschmaschine in [p]
 $n_{D,WM}(t)$ Anzahl der Tage im Monat, an denen die Waschmaschine pro Person genutzt wird in [d/p/Monat]
 $n_{OH,WM}(t)$ Tägliche Betriebsstunden der Waschmaschine in [h/d]
 $p_{WC,WM}(t)$ Wasserverbrauch beim Wäschewaschen mit Waschmaschine in [l/h]
 $1/30$ Umrechnungsfaktor Monat zu Tagen

$$d_{HW,DW}(t) = N_{EW,HW}(t) \cdot n_{D,HW}(t) \cdot n_{H,HW}(t) \cdot p_{WC,HW}(t) \cdot 0.001 \cdot \frac{1}{30} \left\lfloor \frac{m^3}{d} \right\rfloor \quad (\text{Gl. 3.50})$$

mit:

- $N_{EW,HW}(t)$ Anzahl von Personen in der Bevölkerung ohne Waschmaschine in [p]
 $n_{D,HW}(t)$ Anzahl der Wäschewaschungen pro Person und Monat in [Waschungen/p/Monat]
 $n_{H,HW}$ Mittlere Dauer pro Wäschung in [h/Waschen]
 $p_{WC,HW}(t)$ Wasserverbrauch bei manuellem Wäschewaschen in [l/h]

Die Trinkwasserströme des Wäschewaschens ($Q_{WA,DW}(t)$) lassen sich allgemein mittels Gl. 3.10 (Abschnitt 3.4) quantifizieren.

Der Grauwasserstrom des Wäschewaschens ($Q_{WA,GW}(t)$) und dessen Stoffkonzentrationen ($Y_{WA,GW}(t)$) lassen sich allgemein wie folgt ermitteln:

$$Q_{WA,GW}(t) = Q_{WA,DW}(t) \left\lfloor \frac{m^3}{d} \right\rfloor \quad (\text{Gl. 3.51})$$

$$Y_{WA,GW}(t) = \frac{Y_{WA,DW}(t) \cdot Q_{WA,DW}(t) + p_{K,GW}(t) \cdot N_{EW,WA}(t)}{Q_{WA,GW}(t)} \left[\frac{g \cdot Y}{m^3} \right] \text{ mit } Q_{WA,GW}(t) > 0 \quad (\text{Gl. 3.52})$$

mit:

- Y Schmutzstoff im Trink- und Grauwasserstrom
 $Y: IN, IP, IC, ON, OP, OC, SS, SI, XS, XI, XB, XMI$ (Tabelle A 5)
 $Y_{WA,DW}(t)$ Konzentration des Schmutzstoffs Y im Trinkwasserstrom zum Zeitpunkt t in [gY/m^3]
 $Q_{WA,DW}(t)$ Trinkwasserstrom/-verbrauch des Wäschewaschens zum Zeitpunkt t in [m^3/d]
 K Personenbezogene Parameter für Grauwasser
 $K: IN, IP, IC, CSB, TSS, oTS$ (Tabelle A 8)
 $p_{K,GW}(t)$ Fracht pro Kopf des Schmutzstoffs K im Grauwasserstrom zum Zeitpunkt t in [$gK/p/d$]
 $N_{EW,WA}(t)$ Anzahl von Personen in der Bevölkerung mit bzw. ohne Anschluss an eine Waschmaschine zum Zeitpunkt t in [p]

Der Strombedarf der Waschmaschine ($d_{WM,EL}(t)$) lässt sich wie folgt berechnen:

$$d_{WM,EL}(t) = N_{EW,WM}(t) \cdot n_{D,WM}(t) \cdot n_{OH,WM}(t) \cdot p_{WM} \cdot \frac{1}{30} \left\lfloor \frac{kWh}{d} \right\rfloor \quad (\text{Gl. 3.53})$$

- p_{WM} Leistung der Waschmaschine in [kW]

In Zusammenhang mit der Kapazität der Energiequelle ($c_{Q,E}(t)$) und dem Energiebedarf (Strom) des Kontaktpunktes Wäschewaschen (Waschmaschine) lassen sich die Energieströme ($E_{WM,EL}(t)$) auch mittels Gl. 3.11 (Abschnitt 3.4) ermitteln.

Bild 15 zeigt das Prinzip der Modellierung des Trinkwasser- und Stromverbrauchs des Kontaktpunktes Körperpflege.

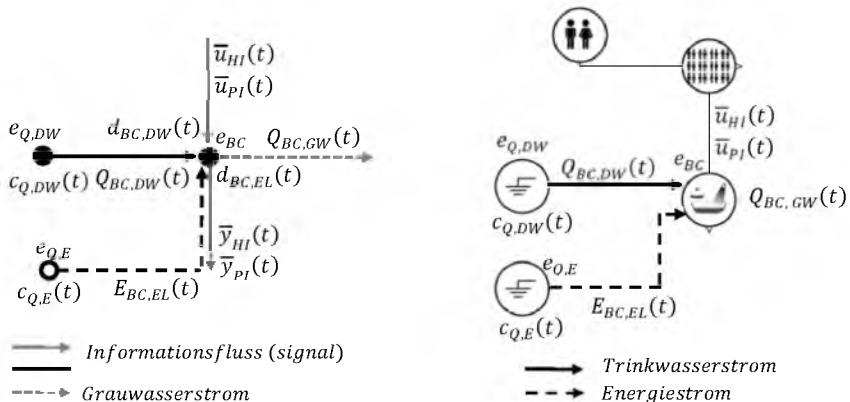


Bild 15: Modellierung des Kontaktpunktes Körperpflege mit Warmwasser

$c_{Q,DW}(t)$ und $c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Trinkwasser- bzw. der Energiequelle. $Q_{BC,DW}(t)$ und $E_{BC,EL}(t)$: Trinkwasser- bzw. Energiestrom zum Kontaktpunkt Körperpflege. $d_{BC,EL}(t)$ und $d_{BC,DW}(t)$: Energiebedarf des Kontaktpunktes Körperpflege zur Warmwasserbereitung bzw. an Trinkwasser. $Q_{BC,GW}(t)$: Grauwasserstrom aus dem Kontaktpunkt Körperpflege. $\bar{u}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Urin und Fäzes) pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Der Trinkwasserbedarf der Körperpflege kann wie folgt berechnet werden:

$$d_{BC,DW}(t) = N_{EW,BC}(t) \cdot p_{WC,BC}(t) \cdot 0.001 \left| \frac{m^3}{d} \right| \quad (\text{Gl. 3.54})$$

mit:

- $N_{EW,BC}(t)$ Angeschlossene Bevölkerung an den Kontaktpunkt Körperpflege zum Zeitpunkt t in $[p]$
- $p_{WC,BC}(t)$ Wasserverbrauch bei der Körperpflege zum Zeitpunkt t in $[l/p/d]$
- 0.001 Umrechnungsfaktor von Liter in Kubikmeter

Der Trinkwasserstrom für den Kontaktpunkt Körperpflege ($Q_{BC,DW}(t)$) lässt sich mittels Gl. 3.10 (Abschnitt 3.4) berechnen und die Grauwasserströme sowie deren Stoffkonzentrationen mittels Gl. 3.51 bzw. Gl. 3.52. Der Strombedarf zur Warmwasserbereitung ($d_{BC,EL}(t)$) lässt sich analog zum Strombedarf von Wäschewaschen mit Waschmaschine mittels Gl. 3.53 quantifizieren. Unter Berücksichtigung der Förderkapazität der Energiequelle ($c_{Q,E}(t)$) und des Strombedarfs dieses Kontaktpunktes lassen sich die Energieströme ($E_{BC,EL}(t)$) mittels Gl. 3.11 (Abschnitt 3.4) bilanzieren.

Bild 16 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung des Trinkwasserbedarfs der Kontaktpunkte Trinken und Kochen.

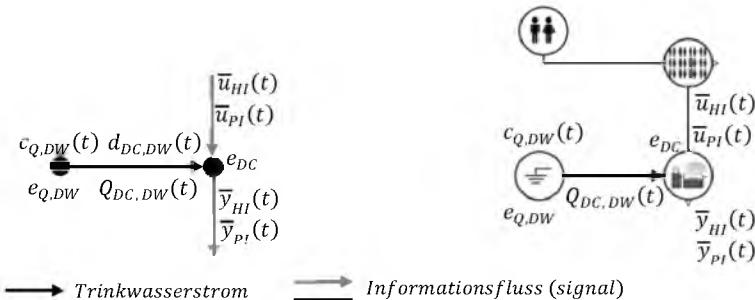


Bild 16: Modellierung des Trinkwasserbedarfs der Kontaktpunkte Trinken und Kochen

$c_{Q,DW}(t)$: Förderkapazität der Trinkwasserquelle. $Q_{DC,DW}(t)$: Trinkwasserstrom zu den Kontaktpunkten Trinken und Kochen. $d_{DC,DW}(t)$: Trinkwasserbedarf der Kontaktpunkte Trinken und Kochen. $\bar{u}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Urin und Fäzes) pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltszahl

Der Trinkwasserbedarf der Kontaktpunkte Trinken und Kochen $(d_{DC,DW}(t))$ lässt sich analog zum Trinkwasserbedarf des Kontaktpunktes Körperpflege ermitteln:

$$d_{DC,DW}(t) = N_{EW,DR}(t) \cdot p_{WC,DC}(t) \cdot 0.001 \left[\frac{m^3}{d} \right] \quad (\text{Gl. 3.55})$$

mit:

- $N_{EW,DC}(t)$ Angeschlossene Bevölkerung an die Kontaktpunkte Trinken/Kochen zum Zeitpunkt t in $[p]$
- $p_{WC,DC}(t)$ Wasserverbrauch beim Trinken und Kochen zum Zeitpunkt t in $[l/p/d]$
- 0.001 Umrechnungsfaktor von Liter in Kubikmeter

Der Anteil des Wasserverbrauchs beim Kochen bezieht sich hier auf die für die Zubereitung von Speisen verwendete Wassermenge. In diesem Kontext werden Grauwasseranfälle vernachlässigt.

Bild 17 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung des Trinkwasserbedarfs und des Grauwasseranfalls des Kontaktpunktes Küche (Geschirrspülen).

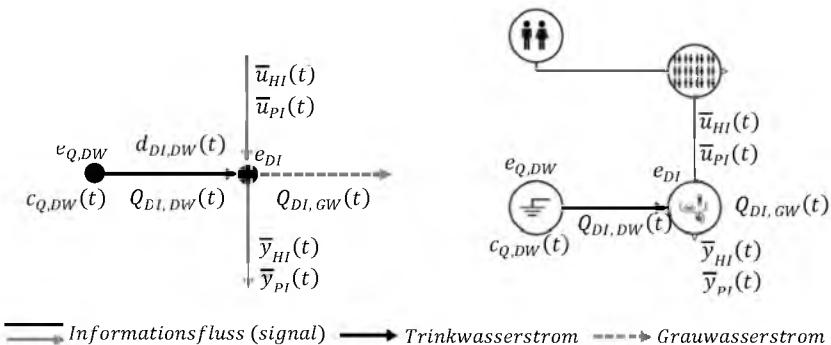


Bild 17: Modellierung des Kontaktpunktes Küche (Handgeschrirrspülung ohne Warmwasser)

$c_{Q,DW}(t)$: Förderkapazität der Trinkwasserquelle. $Q_{DI,DW}(t)$: Trinkwasserstrom zum Kontaktpunkt Geschirrspülung. $d_{DI,DW}(t)$: Trinkwasserbedarf des Kontaktpunktes Geschirrspülung. $Q_{DI,GW}(t)$: Grauwasserstrom aus der Aktivität Geschirrspülung. $\bar{u}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Urin und Fäzes) pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Der Trinkwasserbedarf des Kontaktpunktes Geschirrspülung ohne Spülmaschine lässt sich mittels der folgenden Gleichung ermitteln:

$$d_{DI,DW}(t) = N_{EW,DI}(t) \cdot n_{N,DI}(t) \cdot n_{NH,DI}(t) \cdot p_{WC,DI}(t) \cdot 0.001 \cdot \frac{1}{30} \left[\frac{m^3}{d} \right] \quad (\text{Gl. 3.56})$$

mit:

- $N_{EW,DI}(t)$ Angeschlossene Bevölkerung an den Kontaktpunkt Geschirrspülung zum Zeitpunkt t in [p]
- $n_{N,DI}(t)$ Anzahl der Geschirrspülungen pro Person und Monat zum Zeitpunkt t in [Spülung/p/Monat]
- $n_{NH,DI}(t)$ Dauer pro Geschirrspülung zum Zeitpunkt t in [h/Spülung]
- $p_{WC,DI}(t)$ Trinkwasserverbrauch der Handgeschrirrspülung zum Zeitpunkt t in [l/h]

Der Trinkwasserstrom zum Kontaktpunkt Geschirrspülung ($Q_{DI,DW}(t)$) lässt sich mittels Gl. 3.10 (Abschnitt 3.4) bilanzieren. Der Grauwasserstrom ($Q_{DI,GW}(t)$) und dessen Stoffkonzentrationen aus dem Kontaktpunkt Geschirrspülung werden analog zur Berechnung der Grauwasserströme und Stoffkonzentrationen des Kontaktpunktes Wäschewaschen und mittels Gl. 3.51 bzw. mittels Gl. 3.52 ermittelt.

Bild 18 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung des Trinkwasserbedarfs und des Trinkwasserstroms sowie des Schwarzwasseranfalls des Kontaktpunktes Spültoiletten.

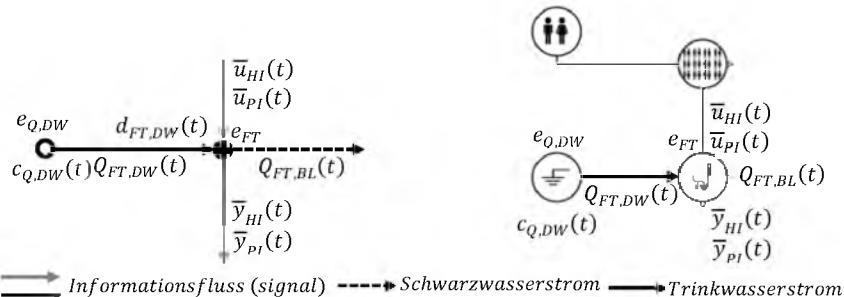


Bild 18: Modellierung des Kontaktpunktes Spültoiletten

$c_{Q,DW}(t)$ Förderkapazität der Trinkwasserquelle. $Q_{FT,DW}(t)$ Trinkwasserstrom zum Kontaktpunkt Spültoiletten. $Q_{FT,BL}(t)$: Schwarzwasserstrom aus dem Kontaktpunkt Spültoiletten. $d_{FT,DW}(t)$: Trinkwasserbedarf des Kontaktpunktes Spültoiletten. $u_{Hl}(t)$ und $u_{Pl}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Urin und Fäzes) pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Der Trinkwasserbedarf für die Toilettenspülung lässt sich wie folgt berechnen:

$$d_{FT,DW}(t) = N_{EW,FT}(t) \cdot p_{WC,FT}(t) \cdot 0.001 \cdot p_{NF}(t) \cdot \left| \frac{m^3}{d} \right| \quad (Gl. 3.57)$$

mit

$N_{EWF,T}(t)$	Angeschlossene Bevölkerung an den Kontaktpunkt Spültoiletten zum Zeitpunkt t in [p]
$p_{WC,FT}(t)$	Wasserverbrauch der Spültoilette pro Spülung zum Zeitpunkt t in [l/Spülung]
$n_{WC}(t)$	Anzahl von Spülungen pro Person und Tag in [Spülung/p/d]

Der Trinkwasserstrom zum Kontaktpunkt Spültoilette $(Q_{FT,DW}(t))$ wird mittels Gl. 3.10 (Abschnitt 3.4) bestimmt.

Der Schwarzwasserstrom $(Q_{FT, BL}(t))$ und dessen Stoffkonzentrationen lassen sich mittels der folgenden Gleichungen ermitteln:

$$Q_{FT,BL}(t) = Q_{FT,DW}(t) + N_{EW,FT}(t) \cdot \left(p_{Q,UR}(t) + p_{Q,FA}(t) \right) \cdot 0.001 \cdot \left| \frac{m^3}{d} \right| \quad (Gl. 3.58)$$

$$Y_{FT,BL}(t) = \frac{Y_{FT,DW} \cdot Q_{FT,DW}(t) + (p_{M,UR} + p_{M,FA}) \cdot N_{EW,FT}(t)}{Q_{FT-BL}(t)} \left[\frac{g \cdot Y_1}{m^3} \right] \text{ mit } Q_{FT,BL} > 0 \quad (\text{Gl. 3.59})$$

mit:

$Q_{FT,DW}(t)$	Trinkwasserstrom zum Kontaktpunkt Spültoilette zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
$N_{DW}(t)$	Angeschlossene Bevölkerung an den Kontaktpunkt Spültoiletten zum Zeitpunkt t in $[n]$

$p_{Q,UR}(t)$	Urinanfall pro Kopf zum Zeitpunkt t in $[l/p/d]$
$p_{Q,FA}(t)$	Fäzesanfall pro Kopf zum Zeitpunkt t in $[l/p/d]$
Y	Schmutzstoff im Trink- und Schwarzwasserstrom
	$Y: IN, IP, IC, ON, OP, OC, SS, SI, XS, XI, XB, XMI$ (Tabelle A 5)
$Y_{FT,DW}$	Konzentration des Schmutzstoffs Y im Trinkwasserstrom zum Zeitpunkt t in $[gY/m^3]$
$Q_{FT,DW}(t)$	Trinkwasserstrom/-verbrauch der Toilettenspülung zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
M	Personenbezogene Parameter für Urin und Fäkalien
	$M: N, P, C, CSB, TSS, oTS$ (Tabelle A 9)
$p_{M,UR}(t)$	Fracht pro Kopf des Schmutzstoffs M im Urin zum Zeitpunkt t in $[gM/p/d]$
$p_{M,FA}(t)$	Fracht pro Kopf des Schmutzstoffs M im Fäzes zum Zeitpunkt t in $[gM/p/d]$

Bild 19 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung des Fäkalienanfalls des Kontaktpunktes Trockentoiletten.

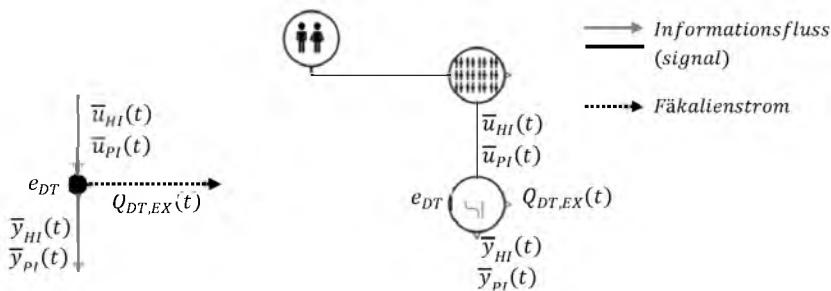


Bild 19: Modellierung des Kontaktpunktes Trockentoiletten

$Q_{DT,EX}(t)$: Fäkalienstrom aus dem Kontaktpunkt Trockentoiletten. $\bar{u}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall (Urin und Fäzes) pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Die Ströme von Fäkalien (Urin und Fäzes) ($Q_{DT,EX}(t)$) und deren Stoffkonzentrationen aus Trockentoiletten (DT) ergeben sich schließlich wie folgt:

$$Q_{DT,EX}(t) = N_{EW,DT}(t) \cdot \left(p_{Q,UR}(t) + p_{Q,FA}(t) \right) \cdot 0.001 \cdot \left| \frac{m^3}{d} \right| \quad (Gl. 3.60)$$

$$Y_{DT,EX}(t) = \frac{(p_{M,UR} + p_{M,FA}) \cdot N_{EW,DT}(t)}{Q_{DT,EX}(t)} \left[\frac{g \cdot Y}{m^3} \right] \quad \text{mit } Q_{DT,EX}(t) > 0 \quad (\text{Gl. 3.61})$$

mit

$N_{EW_DT}(t)$ Angeschlossene Bevölkerung an das Interface Trockentoiletten zum Zeitpunkt t in [p]

Bild 20 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung des Strombedarfs und die damit verbundenen Energieströme von Kontaktpunkten der Klasse C und der Beleuchtung in Privathaushalten (Tabelle A 3, Abschnitt 6.1).

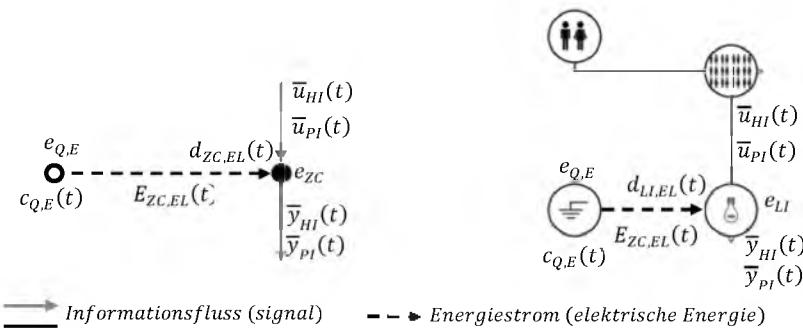


Bild 20: Modellierung von Haushalts- und Elektrogeräten (Kontaktpunkte Klasse C) (links) am Beispiel des Kontaktpunktes Beleuchtung (rechts)

$c_{Q,E}(t)$: Förderkapazität der Energiequelle. $E_{ZC,EL}(t)$ und $E_{LI,EL}(t)$: Energiestrom zum Kontaktpunkt Z der Klasse C bzw. zum Kontaktpunkt Beleuchtung. $d_{ZC,EL}(t)$ und $d_{LI,EL}(t)$: Bedarf des Kontaktpunktes Z der Klasse C bzw. des Kontaktpunktes Beleuchtung an elektrischer Energie. $\bar{u}_{HI}(t)$ und $\bar{u}_{PI}(t)$: Informationsfluss (Signal) über Fäkalienanfall pro Kopf bzw. über Bevölkerungs- und Haushaltzahl

Gl. 3.62 zeigt die Berechnung des Strombedarfs von Kontaktpunkten der Klasse C ($d_{ZC,EL}(t)$). Es gilt somit:

$$d_{ZC,EL}(t) = N_{HH,ZC}(t) \cdot n_{ZC,HH}(t) \cdot n_{D,ZC}(t) \cdot n_{OH,ZC}(t) \cdot p_{ZC} \quad \left[\frac{kWh}{d} \right] \quad (\text{Gl. 3.62})$$

mit:

$$N_{HH,ZC}(t) = N_{HH}(t) \cdot p_{HH,ZC}(t) \cdot 0.01 \quad [\text{HH}] \quad (\text{Gl. 3.63})$$

$N_{HH,ZC}(t)$ Anzahl der an den Kontaktpunkt Z der Klasse C angeschlossenen Haushalte zum Zeitpunkt t in [HH]

$N_{HH}(t)$ Gesamtzahl der Privathaushalte zum Zeitpunkt t in [HH]

$p_{HH,ZC}(t)$ Anteil der an den Kontaktpunkt Z der Klasse C angeschlossenen Privathaushalte zum Zeitpunkt t in [%]

$n_{ZC,HH}(t)$ Anzahl des Kontaktpunktes Z der Klasse C pro Haushalt zum Zeitpunkt t in [n_{ZC}/HH]

$n_{D,ZC}(t)$ Anzahl der Tage im Monat, an denen der Kontaktpunkt Z der Klasse C gebraucht wird in [$d/Monat$]

$n_{OH,ZC}(t)$ Anzahl der täglichen Betriebsstunden des Kontaktpunktes Z der Klasse C in [h/d]
 p_{ZC} Leistung des Kontaktpunktes Z der Klasse C in [kW]

Bild 21 stellt ein Beispielmodell von Endverbrauchern dar. Das Modell besteht aus verschiedenen Interfaces und ermöglicht die integrierte Berücksichtigung und Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen (z. B. Trink-, Grau-, Schwarz-wasserströme) in Privathaushalten. Auf der linken Seite sind die Konzepte zu Ressourcenverteilung (Abschnitt 3.7) dargestellt.

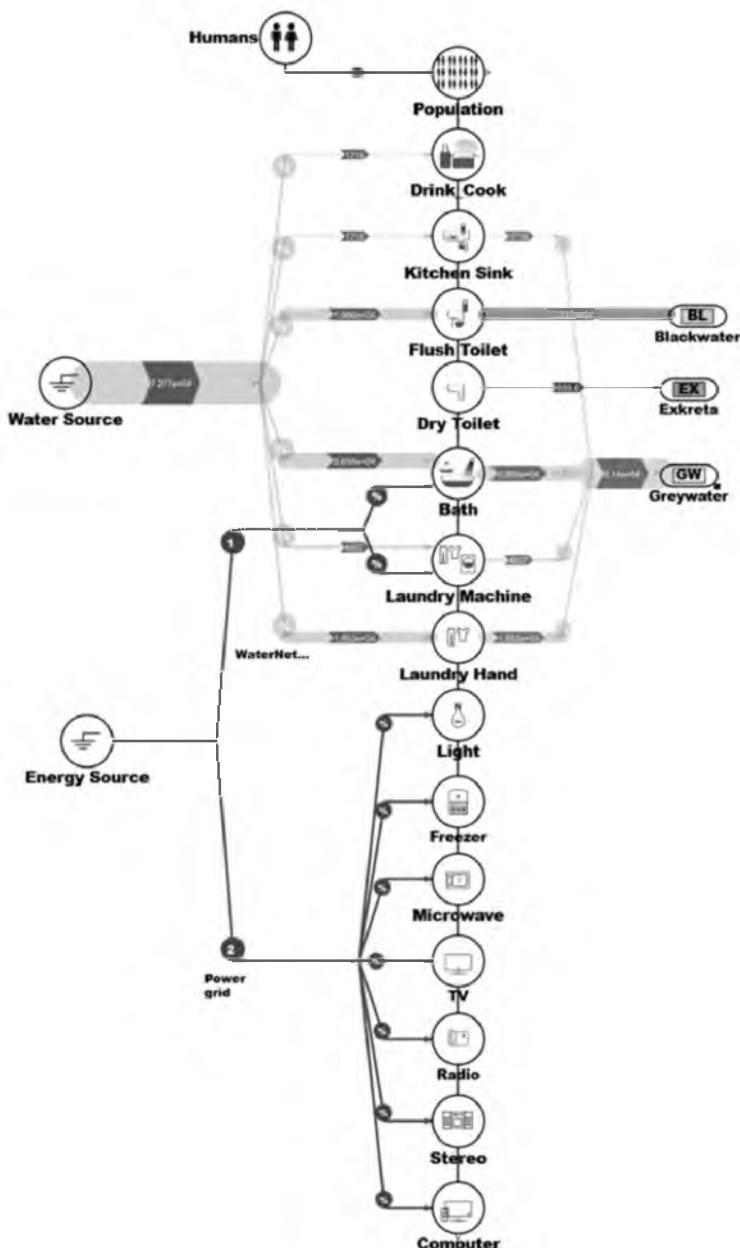


Bild 21: Beispielmodell von Endverbrauchern (Privathaushalte)

Quelle: Selbst erstellt auf Grundlage von [125]

3.8.2 Kopplung von Prozess- mit Makromodellen

Kopplung und Modellierung von Prozessen mit Transport- und Speicherfunktion

Auf der Grundlage der bisher vorgestellten Ansätze zur Modellierung von Quellen, Senken und Prozessen werden Prozessmodelle als unterlagerten Submodelle mit Makromodellen gekoppelt und integriert betrachtet. Die Kopplung zwischen den Modellebenen erfolgt durch den Austausch von Informationen (z. B. Förderkapazität einer Quelle, Transportkapazität eines Prozesses, Bedarfe einer Senke). Ein Prozessmodell kann beliebig komplex sein und aus verschiedenen Teilprozessen mit Transport-, Speicher- und Umwandlungsfunktion bestehen.

Bild 22 zeigt das Grundprinzip der Kopplung von Prozess- und Makromodellen. Das Beispiel stellt das Prozessmodell einer Stoffquelle dar und ist mit einem einfachen Modell eines Stoffverteilungsnetzes (Makromodell) gekoppelt.

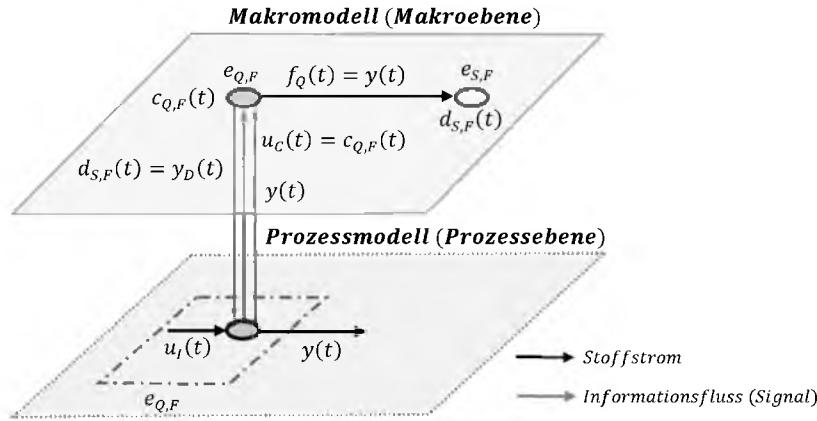


Bild 22: Prinzip der Kopplung von Prozess- und Makromodellen für die Modellierung von Quellen mit Speicher- und Transportfunktion

$c_{Q,F}(t)$ und $u_c(t)$: Förderkapazität der Stoffquelle; $f_Q(t)$ und $y(t)$: Stoffstrom und Informationsfluss über den Stoffstrom aus der Stoffquelle; $d_{S,F}(t)$ und $y_d(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen; $u_i(t)$: Zulaufstrom zu der Stoffquelle

Mittels des folgenden akademischen Beispiels soll demonstriert werden, wie eine Stoffquelle $e_{Q,F}$ durch Prozessmodelle modelliert werden kann. Bild 23 zeigt ein Prozessmodell einer Quelle mit Transport- und Speicherfunktion. Es ist Bestandteil des Gesamtmodells von Bild 22.

Prozessmodell und Bewirtschaftung der Stoffquelle ($e_{Q,F}$)

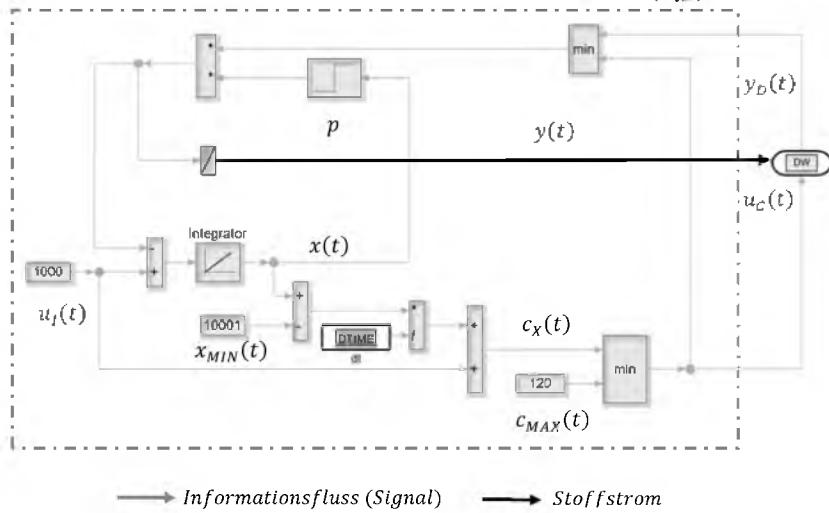


Bild 23: Akademisches Beispiel eines Prozessmodells mit Transport- und Speicherfunktion

$u_C(t)$ und $c_{MAX}(t)$: Maximale umgerechnete bzw. maximale Förderkapazität der Stoffquelle;
 $y(t)$: Stoffstrom aus der Stoffquelle; $y_D(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen; $u_I(t)$: Zuflüsse von Stoffen zum Prozess; $x_{MIN}(t)$: Minimales im Prozess gespeichertes Volumen von Stoffen

Gl. 3.64 zeigt den Bedarf der Senke ($d_{S,F}(t)$) als Informationsfluss. $y_D(t)$ dient hier als Schnittstelle zur Übertragung von Informationen über Bedarfe zwischen den Modellebenen (Prozess- und Makroebene).

$$y_D(t) = d_{S,F}(t) \quad (\text{Gl. 3.64})$$

Die Änderung eines Stoffes in einem Prozess mit Speicher- und Transportfunktion lässt sich allgemein wie folgt beschreiben:

$$\frac{dx(t)}{dt} = u_I(t) - y(t) \quad (\text{Gl. 3.65})$$

mit:

$u_I(t)$ Eingangsstoff in den Prozess zum Zeitpunkt t . $u_I(t)$ kann konstant oder zeitvariabel sein
 $y(t)$ Ausgangsstoff aus dem Prozess zum Zeitpunkt t

Die in Zusammenhang mit dem Prozesszustand verfügbare Förderkapazität der Stoffquelle lässt sich mittels Gl. 3.66 bestimmen.

$$c_X(t) = \frac{x(t) - x_{MIN}(t)}{dt} + u_I(t) \quad (\text{Gl. 3.66})$$

mit:

$x_{MIN}(t)$: Minimales gespeichertes Volumen von Stoffen oder Gütern im Prozess zum Zeitpunkt t . $x_{MIN}(t)$ kann konstant oder zeitvariabel sein.

Die in Gl. 3.66 ermittelte Förderkapazität der Quelle kann von weiteren technischen Randbedingungen ($c_{MAX}(t)$) begrenzt sein. Die maximale umgerechnete Förderkapazität der Stoffquelle ($u_C(t)$) lässt sich wie folgt ermitteln:

$$u_C(t) = \text{MIN}(c_{MAX}(t), c_X(t)) \quad (\text{Gl. 3.67})$$

mit:

$$c_{Q,F}(t) = u_C(t) \quad (\text{Gl. 3.68})$$

$c_{MAX}(t)$ Maximale Förderkapazität der Quelle zum Zeitpunkt t . $c_{MAX}(t)$ kann konstant oder zeitvariabel sein

Die Stoffströme ($f_Q(t)$) aus Quellen mit Speicherfunktion lassen sich auch mittels Gl. 3.10 ermitteln. Es gilt somit für dieses Beispiel:

$$y(t) = (\text{MIN}(y_D(t), u_C(t))) \cdot p(t) \quad (\text{Gl. 3.69})$$

mit:

$$f_Q(t) = y(t) \quad (\text{Gl. 3.70})$$

$$p(t) = f(x(t)) \quad (\text{Gl. 3.71})$$

$p(t)$ ist eine Funktion der im Prozess gespeicherten Stoffmenge und liegt für dieses Beispiel zwischen 0 und 1.

Auf der Grundlage der bereits dargestellten Grundprinzipien und Beispiele der Modellierung von Quellen mit Transport- und Speicherfunktion mittels Prozessmodellen und der Modellierung von Prozessen mit Transportfunktion mittels einfacher Ansätze (Abschnitt 3.6) werden im Folgenden am Beispiel von Talsperrensystemen Quellen im Verbund modelliert.

Bild 24 zeigt ein einfaches Beispiel der Kopplung von Prozess- und Makromodellen für die Bewirtschaftung von Quellen mit Speicher- und Transportfunktion im Verbund und für die Verteilung von Stoffen zwischen Quellen und Senken. Die Kopplung zwischen dem Makro- und Prozessmodell wird durch Austausch von Informationen und Stoffen realisiert. Hier werden für die Bewirtschaftung des Verbundsystems Informationen über die Transportkapazitäten ($y_c(t)$) und Stoffbedarfe ($d_{P,F}(t)$) von Prozessen, mit denen die Quelle verbunden ist, ausgetauscht. Die im Verbundsystem geregelten Stoffströme ($y(t), y_{Q,F1}(t), y_{Q,F2}(t)$) werden dann zur Deckung des Stoffbedarfs des Prozesses ($d_{P,F}(t)$) und der Senke ($d_{S,F}(t)$) verteilt. Mittels der Kopplung von Prozessmodellen mit Makromodellen lassen sich Stoffströme auf Makro- und Prozessebene bilanzieren und verteilen.

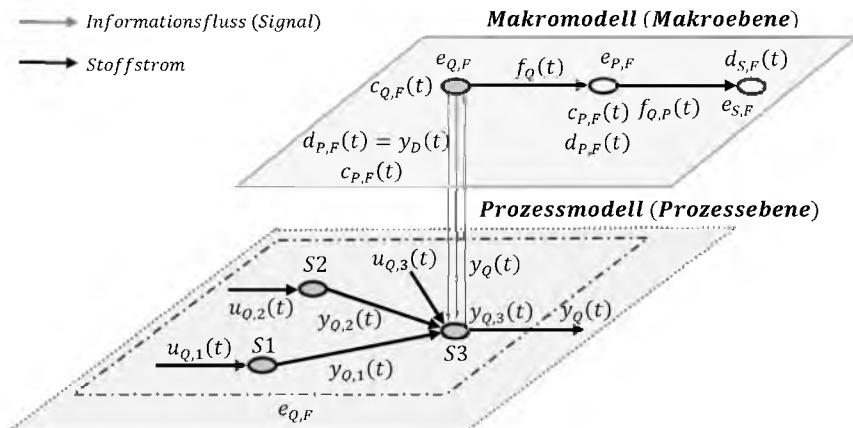


Bild 24: Einfaches Beispiel für die Kopplung von Prozess- und Makromodellen zur Modellierung von Quellen mit Speicher- und Transportfunktion in Verbund
 $c_{P,F}(t)$ und $y_c(t)$: Maximale Transportkapazität des Prozesses; $d_{S,F}(t)$: Bedarf der Senke an Stoffen; $f_Q(t)$ und $y(t)$: Stoffstrom aus der Quelle; $f_{Q,P}(t)$: Stoffstrom aus dem Prozess; $d_{P,F}(t)$ und $y_D(t)$: Stoffbedarf des Prozesses; $u_{Q,1}(t)$ und $y_{Q,1}(t)$: Stoffstrom zur bzw. aus der Stoffquelle S1; $u_{Q,2}(t)$ und $y_{Q,2}(t)$: Stoffstrom zur bzw. aus der Stoffquelle S2; $u_{Q,3}(t)$ und $y_{Q,3}(t)$: Stoffstrom zur bzw. aus der Stoffquelle S3

Bild 25 zeigt die Grundprinzipien der Modellierung von Quellen mit Speicher- und Transportfunktion im Verbund am Beispiel dreier Speicher (S_1, S_2, S_3). Das Prozessmodell ist Bestandteil des in der Bild 24 gezeigten Gesamtmodells. Die Änderung des Volumens in den Speichern S_1 und S_2 lässt sich allgemein mittels des folgenden Volumenbilanzmodells beschreiben:

$$\frac{dV_k(t)}{dt} = u_{Q,k}(t) - y_{Q,k}(t) - y_{Q,OV,k}(t) + A_k(t) \cdot (P_k(t) - E_k(t)) \quad [m^3] \quad (\text{Gl. 3.72})$$

mit:

$$V_{MIN,k} \leq V_k(t) \leq V_{MAX,k} \quad (\text{Gl. 3.73})$$

$$y_{MIN,Q,k}(t) \leq y_{Q,k}(t) \leq y_{MAX,Q,k}(t) \quad (\text{Gl. 3.74})$$

$$y_{MAX,Q,k}(t) = \psi \cdot a_k(t) \cdot \omega_k(t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_k(t)} \quad [m^3/d] \quad (\text{Gl. 3.75})$$

k	Speichernummer. $k = 1, 2$
$u_{Q,k}(t)$	Natürliche Zuläufe zum Speicher k zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
$y_{Q,k}(t)$	Wasserabgaben aus dem Speicher k zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
$y_{Q,OV,k}(t)$	Überläufe aus dem Speicher k zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
$A_k(t)$	Wasserspiegeloberfläche des Speichers k zum Zeitpunkt t in $[m^2]$
$E_k(t)$	Verdunstungsrate an der Wasserspiegeloberfläche zum Zeitpunkt t in $[m/d]$
$P_k(t)$	Niederschlagsrate auf die Wasserspiegeloberfläche zum Zeitpunkt t in $[m/d]$
$V_{Q,MIN,k}$	Minimale Speicherkapazität des Speichers k
$V_{Q,MAX,k}$	Maximale Speicherkapazität des Speichers k
$y_{Q,MIN,k}(t)$	Minimale Drosselabgabe aus dem Speicher k zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
$y_{Q,MAX,k}(t)$	Maximale Drosselabgabe aus dem Speicher k zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
ψ	Kontraktionszahl. ψ – liegt zwischen 0,61 und 0,64 für scharfkantige Öffnungen und bei ≥ 1 gerundete Öffnungen
$a_k(t)$	Öffnungshöhe des Schiebers vom Speicher k
$\omega_k(t)$	Seitliche Breite des Schiebers vom Speicher k
g	Fallbeschleunigung in $[m/s^2]$
$h_k(t)$	Wasserstand über der Schwerpunktlage der Seitenöffnung zum Zeitpunkt t in $[m]$
dt	Zeitintervall in $[d]$

Die Änderung des Volumens im Speicher $S3$ lässt sich allgemein wie folgt ermitteln:

$$\frac{dV_3(t)}{dt} = u_{Q,3}(t) - y_{Q,3}(t) - y_{Q,OV,3}(t) + A_3(t) \cdot (P_3(t) - E_3(t)) + \left(\sum_{k=1}^2 (y_{Q,k}(t) + y_{Q,OV,k}(t)) \right) [m^3] \quad (\text{Gl. 3.76})$$

mit:

k : Speichernummer $k: 1, 2$

Die Wasserabgaben ($y_Q(t)$) aus dem Verbundsystem lassen sich in Abhängigkeit von der Transportkapazität ($y_C(t)$) und dem Bedarf ($y_D(t)$) des Prozesses sowie vom Systemzustand, den maximalen und minimalen Wasserabgaben und der Speicherkapazität des Gesamtsystems allgemein wie folgt beschreiben:

$$y_Q(t) = f \left(y_C(t), y_D(t), V_k(t), V_{Q,MIN,k}, V_{Q,MAX,k}, y_{Q,MIN,k}(t), y_{Q,MAX,k}(t) \right) \quad (\text{Gl. 3.77})$$

mit:

$$y_C(t) = c_{P,F}(t) \quad (\text{Gl. 3.78})$$

$$y_D(t) = d_{P,F}(t) \quad (\text{Gl. 3.79})$$

$y_C(t)$ Maximale Transportkapazität des Prozesses zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$
 $y_D(t)$ Bedarf des Prozesses an Wasser zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$

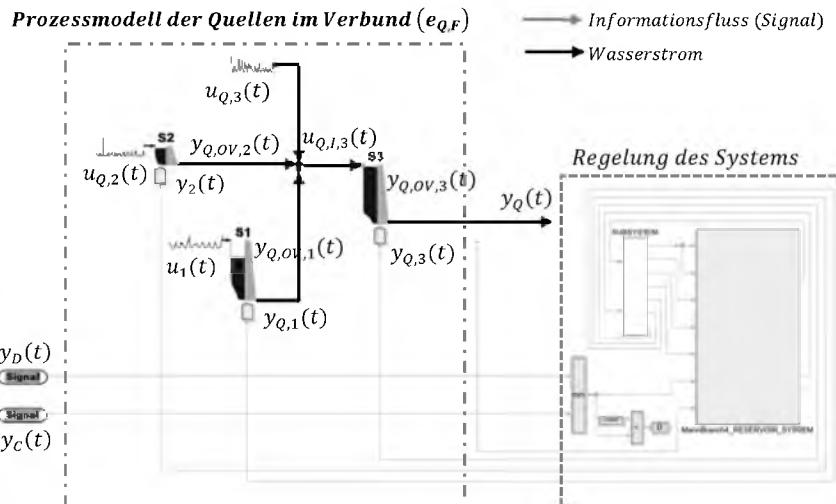


Bild 25: Akademisches Beispiel eines Prozessmodells bestehend aus drei Quellen mit Speicher- und Transportfunktion im Verbund

k : Speichernummer, $k: 1, \dots, 3$; $u_{Q,k}(t)$: Natürliche Zuläufe zum Speicher k ; $u_{Q,l,k}(t)$: Zuläufe zum Speicher S_l ; $y_{Q,ov,k}(t)$ und $y_{Q,k}(t)$: Überlaufvolumen bzw. Abfluss aus dem Speicher k ; $y_D(t)$ und $d_{P,F}(t)$: Bedarf des Prozesses an Stoffen; $y_Q(t)$: Stoffstrom aus dem Verbundsystem; $y_C(t) = c_{P,F}(t)$: Maximale Transportkapazität des Prozesses

Für dieses Beispiel lassen sich die Wasserströme ($y_Q(t)$) aus dem Verbundsystem mittels Gl. 3.80 berechnen:

$$y_Q(t) = y_{Q,3}(t) + y_{Q,ov,3}(t) \quad (\text{Gl. 3.80})$$

mit:

$$\begin{aligned} y_{Q,3}(t) & \quad \text{Wasserabgaben aus dem Speicher } S3 \text{ zum Zeitpunkt } t \text{ in } [m^3/d] \\ y_{Q,ov,3}(t) & \quad \text{Überlaufvolumen aus Speicher } S3 \text{ zum Zeitpunkt } t \text{ in } [m^3/d] \end{aligned}$$

Die Zuflüsse zum Prozess lassen sich wie folgt berechnen:

$$f_Q(t) = \begin{cases} d_{P,F}(t) & \text{WENN } y_Q(t) \geq d_{P,F}(t) \\ y_Q(t) & \text{ANSONSTEN} \end{cases} \quad (\text{Gl. 3.81})$$

Kopplung und Modellierung von Prozessen mit Transport-, Umwandlungs- und Speicherfunktion

Bild 26 zeigt die Grundprinzipien der Kopplung von Makro- mit Prozessmodellen mit Transport-, Speicher- und Umwandlungsfunktion. Hier erfolgt die Kopplung beider Modelle durch den Austausch von Informationen über die maximale Transportkapazität des Prozesses ($c_{P,F}(t)$) und den Bedarf der Senke an Transport von Stoffen ($d_{S,F}(t)$) sowie den Zulauf und Ablauf von Stoffströmen.

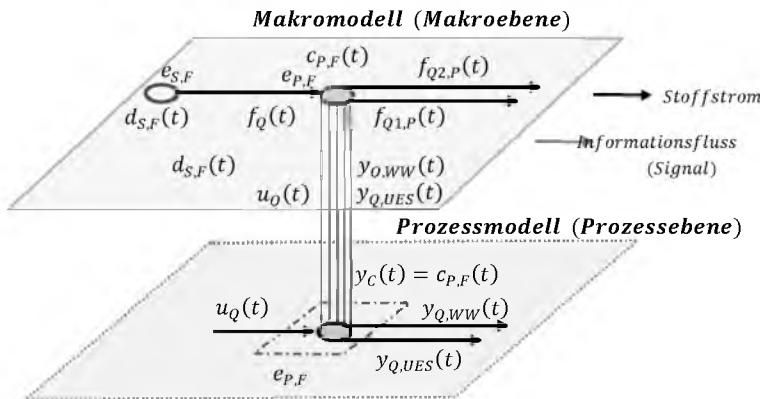


Bild 26: Prinzip der Kopplung von Prozess- und Makromodellen für die Modellierung von Prozessen mit Transport-, Speicher- und Umwandlungsfunktion
 $d_{S,F}(t) = u_Q(t)$: Bedarf der Senke an Transport von Stoffen; $c_{P,F}(t) = y_C(t)$: Transport-/Aufnahmekapazität des Prozesses; $u_Q(t)$ und $f_Q(t)$: Stoffstrom zum Prozess; $f_{Q1,p}(t)$, $f_{Q2,p}(t)$, $y_{Q,WW}(t)$ und $y_{Q,UES}(t)$: Stoffströme aus dem Prozess

Auf der Grundlage von Bild 26 zeigt Bild 27 ein akademisches Beispiel der Prozesse einer Belebtschlammanklage für die Abwasserreinigung. Diese Prozesse dienen dem Transport, der Speicherung und der Umwandlung von Stoffen.

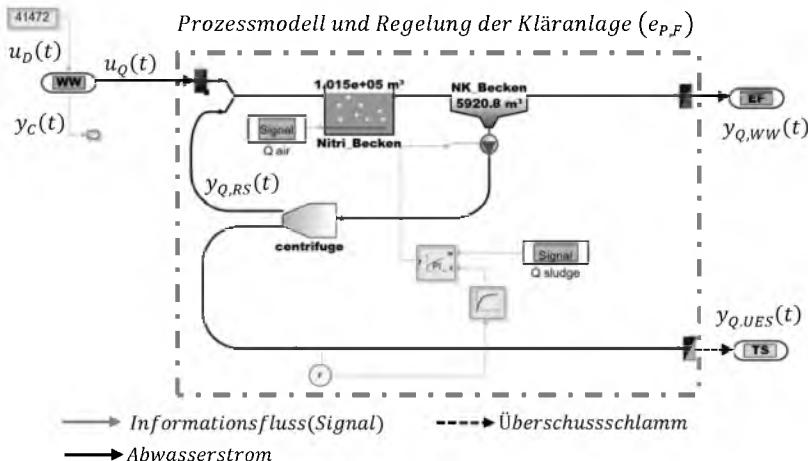


Bild 27: Akademisches Beispiel der Prozesse einer Belebtschlamm anlage mit Transport-, Speicher- und Umwandlungsfunktion

$y_c(t) = c_{P,F}(t)$: Maximale Kapazität der Anlage; $u_Q(t)$: Abwasserstrom im Zulauf der Kläranlage; $d_{S,F}(t) = u_D(t)$: Bedarf der Senke an Transport von Abwasser; $y_{Q,WW}(t)$ und $y_{Q,UES}(t)$: Abwasserstrom im Ablauf der Kläranlage bzw. Überschusschlammstrom; $y_{Q,RS}(t)$: Rücklaufschlammstrom

Der Bedarf der Senke an Transport von Abwasser ($d_{S,F}(t)$) wird mittels des Signals ($y_D(t)$) an das Prozessmodell übertragen. Es gilt somit:

$$u_D(t) = d_{S,F}(t)$$

Der Abwasserstrom im Zulauf des Prozessmodells lässt sich mittels Gl. 3.82 berechnen:

$$f_Q(t) = \text{MIN} \left(c_{P,F}(t), d_{S,F}(t) \right) \quad (\text{Gl. 3.82})$$

mit:

$$y_c(t) = c_{P,F}(t) \quad (\text{Gl. 3.83})$$

$$f_Q(t) = u_Q(t) \quad (\text{Gl. 3.84})$$

Der Abwasserstrom und der Überschusschlammstrom aus dem Gesamtprozess lassen sich allgemein wie folgt berechnen:

$$y_{Q,WW}(t) = f(u_Q(t), y_{Q,UES}(t), y_{Q,RS}(t)) \quad (\text{Gl. 3.85})$$

$$y_{Q,UES} = f(u_Q(t), y_{Q,RS}(t)) \quad (\text{Gl. 3.86})$$

mit:

$y_{Q,RS}(t)$ Rücklaufschlammstrom zum Zeitpunkt t in $[m^3/d]$

$$y_{Q,WW}(t) = f_{Q1,P}(t) \quad (\text{Gl. 3.87})$$

$$y_{Q,UES}(t) = f_{Q2,P}(t) \quad (\text{Gl. 3.88})$$

3.9 Generischer Ansatz zur Abflussregelung von Talsperrensystemen

Planung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen und -infrastrukturen, insbesondere Talsperren, sehen sich mit sich ständig verändernden ökologischen, ökonomischen und sozialen Rahmenbedingungen konfrontiert. In vielen Regionen müssen verfügbare Wasserressourcen auf immer mehr Verbraucher (Haushalte, Industrie, Landwirtschaft) verteilt werden. Der notwendige Ausbau der Wasserinfrastrukturen entwickelt sich in vielen Fällen aufgrund begrenzter finanzieller Mittel deutlich langsamer als die Nachfrage. Aus diesem Grunde hat zum einen effiziente Bewirtschaftung von Wasserressourcen besonderes Gewicht und zum anderen sorgt der erwartete klimatische Wandel für zusätzliche Unsicherheiten. Schwer vorhersagbare Randbedingungen, wie Bevölkerungswachstum und Klimawandel, haben zur Entwicklung und Erprobung von Methoden geführt, die Planung und Betrieb von Talsperren unterstützen. Diese reichen von einfachen Betriebsregeln (vgl. [78]) bis hin zu unterschiedlich komplexen Ansätzen aus dem Bereich der Regelungstechnik wie PID- (vgl. [79]), H_∞- oder auch modellprädiktiven Reglern (vgl. [80]). Weiterhin wurden zur Optimierung von Betriebsregeln verschiedene Verfahren angewendet (vgl. [81], [82]). Die Vielzahl der Ansätze lässt darauf schließen, dass diese, obwohl erfolgreich, nicht ohne weiteres auf andere Speichersysteme übertragbar sind. Gründe sind unterschiedliche Systemstrukturen und Bewirtschaftungsziele. Automatisierungs- und Betriebskonzepte für Speichersysteme sind in der Regel als Einzellösungen zu betrachten. In [81] wird geschlussfolgert, dass die Auswahl eines für eine bestimmte Anwendung geeigneten Optimierungsverfahrens aufgrund der unübersichtlichen Anzahl bereits erprobter Methoden unklar ist. Ähnliches lässt sich auch bezüglich Steuerung und Regelung vermuten. Auch wenn Ziele und Randbedingungen eindeutig beschrieben werden können, bleibt die Auswahl eines geeigneten Verfahrens schwierig.

Eine zur Abflussregelung von Talsperren vergleichbare Situation findet sich im Bereich der Abflussregelung von Speicherbecken (Regenüberlaufbecken) in Kanalnetzen, die der Entwässerung von Siedlungsgebieten dienen. Um in Kanalnetzen (Mischsysteme) nachgeschaltete Kläranlagen bei Regenereignissen hydraulisch und stofflich zu entlasten, dienen Speicherbecken zur Abflussverzögerung. Den Talsperren ähnlich, handelt es sich dabei häufig um einen Verbund von Speicherbecken. Auch wenn die Motivation eine andere ist, bestehen durchaus vergleichbare Bewirtschaftungsziele. In Tabelle 4 sind Vergleichskriterien bezüglich des Betriebs von Speicherbecken in Kanalnetzen und Talsperren exemplarisch gegenübergestellt.

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Talsperren und Speicherbecken

Kriterium	Talsperren	Speicherbecken
Konfiguration	Einzel, seriell, parallel oder im Verbund	Einzel, seriell, parallel oder im Verbund
Kopplung	Über natürliche/künstliche Gerinne	Über Kanalrohrleitungen
Periodizität	Füllungs- und Entleerungsperiode	keine
Aufgaben	Ausgleich zwischen Wasserdargebot und -bedarf	Ausgleich zwischen Mischwasseranfall und Kläranlagenkapazität
Bewirtschaftungsziele	Füllungsperiode: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Maximaler Wasserrückhalt ▪ Minimierung von Überlaufvolumen Entleerungsperiode: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicherstellung der Bedarfsdeckung ▪ Zurückhaltung eines Reservevolumens 	Füllung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Maximaler Mischwasserrückhalt ▪ Minimierung von Überlaufvolumen Entleerung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schnelle Wiederverfügbarkeit von Speichervolumen ▪ Rückhalt von Schmutzfracht
Randbedingungen	Zulässiger Zufluss zu Verbrauchern Maximale Speicherkapazität Maximale Drosselabflüsse	Zulässiger Zufluss zur Kläranlage Maximale Speicherkapazität Maximale Drosselabflüsse

Quelle: [71]

Als Antwort auf die Forderung nach übertragbaren und aufwandsarm implementierbaren Ansätzen zur Abflussregelung im Kanalnetzbereich wurde in [83] ein generischer Lösungsansatz vorgestellt. Dieser wurde in weiteren Arbeiten [84] konkretisiert und in die Praxis überführt [85]. Bei dem Ansatz handelt es sich um einen Algorithmus zur Abflussregelung von Verbundspeichersystemen mit dem Ziel, Überlaufvolumen durch gleichmäßige Auslastung der Speicher bei varierendem Zulaufregime zu minimieren. Für eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes sei auf [83], [84], [85] und [86] verwiesen.

Aufgrund der grundsätzlichen funktionalen Gemeinsamkeiten zwischen Talsperren und Speicherbecken in Kanalnetzen und der dort vorliegenden ausgeprägten Füllungs- und Entleerungsperioden wurde der Ansatz auf Talsperrensysteme übertragen und erprobt. Zu diesem Zweck wurde das Regelungskonzept um einen Regler zur Gewährleistung der Wasserabgabe ergänzt („Abgaberegler“). Der Ansatz stellt

eine Verbundregelung durch Koordination an sich einfacher lokaler und globaler Regler dar. Bild 28 zeigt das Grundprinzip des Regelungsansatzes am Beispiel dreier Speicher.

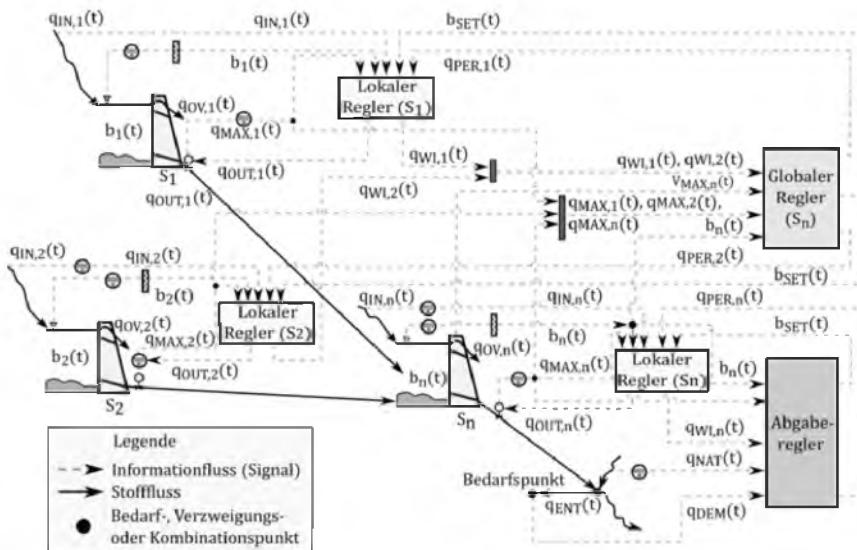


Bild 28: Grundprinzip des Regelungskonzeptes am Beispiel eines Speichersystems

Quelle: [72]

Jedem Speicher ist ein lokaler Regler und jedem Speicher mit vorgeschalteten Speichern ist zusätzlich noch ein globaler Regler zugeordnet. Zur Gewährleistung der Abgabe dient ein Abgaberegler. Dessen Aufgaben bestehen in der Generierung eines dynamischen Sollwertes ($q_{PER,n}$) für die maximal zulässigen Abgaben und Füllgradsollwerte (b_{SET}) für die oben liegenden Speicher. Zu diesem Zweck wird der Wasserbedarf (q_{DEM}) mit den natürlichen Zuläufen (q_{NAT}) verglichen und die erforderliche Abgabemenge aus dem Talsperrensystem ermittelt.

Die Aufgabe der lokalen Regler besteht in der Formulierung von Abgabewünschen ($q_{WI,k}$), die aus dem Füllgrad (b_k) und dem von einem globalen Regler vorgegebenen Füllgradsollwert (b_{SET}) abgeleitet werden. Die Regelung der Wasserabgaben erfolgt unter Berücksichtigung der maximal möglichen Abgabe ($q_{MAX,k}$) sowie einer maximal zulässigen Abgabe ($q_{PER,k}$), die ebenfalls von einem globalen Regler vorgegeben wird. Abgabewünsche ($q_{WI,k}$) lokaler Regler werden an globale Regler übergeben. Die Aufgaben globaler Regler bestehen zum einen in der Koordinierung der Wünsche ($q_{WI,k}$) zur Abgabe aus den vorgeschalteten Speichern durch Vorgabe

maximal zulässiger Abgaben ($q_{PER,k}$) und zum anderen in der gleichmäßigen Auslastung der Speicherbecken durch Festlegung von Füllgradsollwerten (b_{SET}). Diese richten sich nach der Vorgabe des Abgabereglers. Die Verschaltung dieser einfachen Grundelemente, und deren Kommunikation untereinander, führt zu gleichmäßiger Auslastung der Speicher.

Tabelle 5: Konfiguration und mathematische Grundlagen des Abgabereglers

Konfiguration Grundlagen

	$q_{PER,k}(t) = \begin{cases} q_{SET}(t) & \text{WENN } q_{SET}(t) > 0 \text{ UND } q_{WI,k}(t) > 0 \\ 0 & \text{ANSONSTEN} \end{cases}$
	$b_{SET}(t) = b_k(t)$
(a) mit Speicher	mit: <i>$q_{PER,k}(t)$ ist die zulässige Drosselabgabe aus Speicher k. q_{SET} ist die erforderliche Drosselabgabe aus dem Speichersystem. $q_{WI,k}$ ist der Abgabewunsch des Speichers k. $b_k(t)$ und $b_{SET}(t)$ sind dabei der Füllgrad bzw. der Füllgradsollwert [0...1]. n: Anzahl der Speicher. k: 1,..,n</i>
	$q_{PER,i}(t) = \begin{cases} \frac{q_{WI,i}(t)}{c(t)} \cdot q_{SET}(t) & \text{WENN } q_{SET}(t) > 0 \text{ UND } c(t) > 0 \\ 0 & \text{ANSONSTEN} \end{cases}$
	$b_{SET}(t) = \text{MIN}(b_i(t))$
	mit:
(b) ohne Speicher	$q_{SET}(t) = \text{MAX}[0, (q_{DEM}(t) - q_{NAT}(t))]$ $c(t) = \sum_{i=1}^n q_{WI,i}(t)$ <i>$q_{PER,i}(t)$ und $q_{WI,i}(t)$ sind die zulässige Drosselabgabe aus und der Abgabewunsch des Zweigs i. q_{SET} ist die erforderliche Drosselabgabe aus dem Speichersystem. $b_{SET}(t)$ ist der Füllgradsollwert [0...1]. $b_i(t)$ ist der Füllgrad des direkt mit Zweig i verbundenen Speichers. $q_{DEM}(t)$ und $q_{NAT}(t)$ sind der Wasserbedarf und die natürlichen Zuläufe. n: Anzahl der Zweige. i: 1,..,n</i>

Der hier vorgestellte Ansatz lässt sich mit geringem Aufwand auf weitere Sektoren (z. B. Abfall) übertragen und anwenden und wird im folgenden Kapitel am Beispiel der Wasser- und Elektrizitätsinfrastrukturen des urbanen Ballungsraums Lima demonstriert.

3.10 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung eines Ansatzes zur integrierten Modellierung transsektoraler Infrastrukturen vorgestellt. Er entwickelt die bereits in [11] vorgeschlagene Integration von Prozessmodellen in die mathematische Materialflussanalyse (MMFA) durch Anwendung eines generischen Steuerungskonzepts zur Bewirtschaftung von Kapazitäten und Deckung von Bedarfen (siehe Abschnitt 3.7) weiter. Darauf aufbauend lassen sich zum einen die MMFA und Prozessmodelle aufwandsarm koppeln und zum anderen Kapazitäten, Bedarfe und deren Verknüpfungen auf Makroebene (sektorale und transsektorale Infrastrukturen) und zugleich die Abbildung einzelner sektoraler Komponenten (Endverbraucher, verfahrenstechnische Anlagen) durch Prozessmodelle (Prozessebene) beschreiben. Dies ist besonders wichtig, wenn größere Zeitbereiche simulativ untersucht werden sollen. Hier ergeben sich, bedingt durch die veränderlichen Zustände der Prozessmodelle, zur Laufzeit neue Konstellationen von Ressourcenkapazitäten und Bedarfen.

Anhand von Beispielen für Prozessmodelle wurden auch die Grundprinzipien, Funktionalität und Potenziale des entwickelten modellbasierten Ansatzes gezeigt. Durch seine Entwicklung leistet diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zur integrierten Modellierung und Analyse transsektoraler Infrastrukturen in urbanen Räumen.

In diesem Kapitel wurde die Idee der Übertragung und Anwendung eines Regelungsalgorithmus aus dem Kanalnetzbereich zur Regelung der Wasserabgaben aus Talsperrensystemen skizziert. Aufgrund der grundsätzlichen funktionalen Gemeinsamkeiten zwischen Talsperren und Speicherbecken in Kanalnetzen und der dort vorliegenden ausgeprägten Füllungs- und Entleerungsperioden wurde der Ansatz auf Talsperrensysteme übertragen. Er wird auf das Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Flusses Rimac (Peru) (siehe Abschnitt 4.4.9) angewendet und erprobt. Durch die Bereitstellung dieses neuen und vielversprechenden Ansatzes zur bestmöglichen Bewirtschaftung der Wasserabgaben aus Talsperrensystemen trägt dieser Arbeit weiterhin zum Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Talsperrenbewirtschaftung bei.

4 Integrierte transsektorale Modellierung der Wasser- und Elektrizitätsinfrastruktur der Stadt Lima

4.1 Einführung

In diesem Kapitel wird die Anwendung des in Kapitel 3 vorgestellten Ansatzes zur integrierten Modellierung transsektoraler Infrastrukturen anhand eines Beispiels für die peruanische Hauptstadt Lima demonstriert. Zunächst werden die Herausforderungen der Trinkwasserversorgung, der Abwasserentsorgung und der Stromversorgung der Stadt vorgestellt. Weiterhin wird die Anwendung des Ansatzes für die integrierte transsektorale Modellierung der Wasser- und Elektrizitätsinfrastrukturen der Stadt präsentiert. Im Rahmen der Anwendung werden die exemplarisch gewählten Komponenten und Prozesse der Sektoren Wasser und Energie sowie Maßnahmen und deren Bewertungskriterien vorgestellt. Im Anschluss werden die erreichten Ergebnisse mittels des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes für den Ist-Zustand (2007–2013) und Szenarien (2014–2030) ohne Maßnahmen (S1) und mit mehreren Maßnahmen (S2) veranschaulicht und diskutiert.

4.2 Die Trinkwasserver- und Abwasserentsorgungssituation

Die peruanische Hauptstadt Lima und die Provinz Callao (im Folgenden zusammenfassend Lima genannt) liegen an der südamerikanischen Pazifikküste. Lima ist mit ca. 9 mm Jahresniederschlag nach Kairo die zweittrockenste Hauptstadt der Welt. Die mittlere jährliche Temperatur der Region liegt bei 20 °C. Lima hat eine Fläche von 2.803 km², was 0,22 % der gesamten Fläche Perus entspricht (vgl. [87]). In Lima leben 29 % der Gesamtbevölkerung Perus (vgl. [87]). Die Bevölkerungszahl ist von 0,65 Mio. Einwohnern im Jahr 1940 auf mittlerweile 9,5 Mio. Einwohner (2015) angestiegen. In diesem Zeitraum schwankte die Wachstumsrate der Stadt erheblich. Die höchste Wachstumsrate von 5,5 % wurde zwischen den Jahren 1961 und 1972 verzeichnet (vgl. [88]). Seitdem nimmt die Wachstumsrate bis heute stetig ab und betrug bis 2012 im Durchschnitt 2,1 % pro Jahr (vgl. [89]).

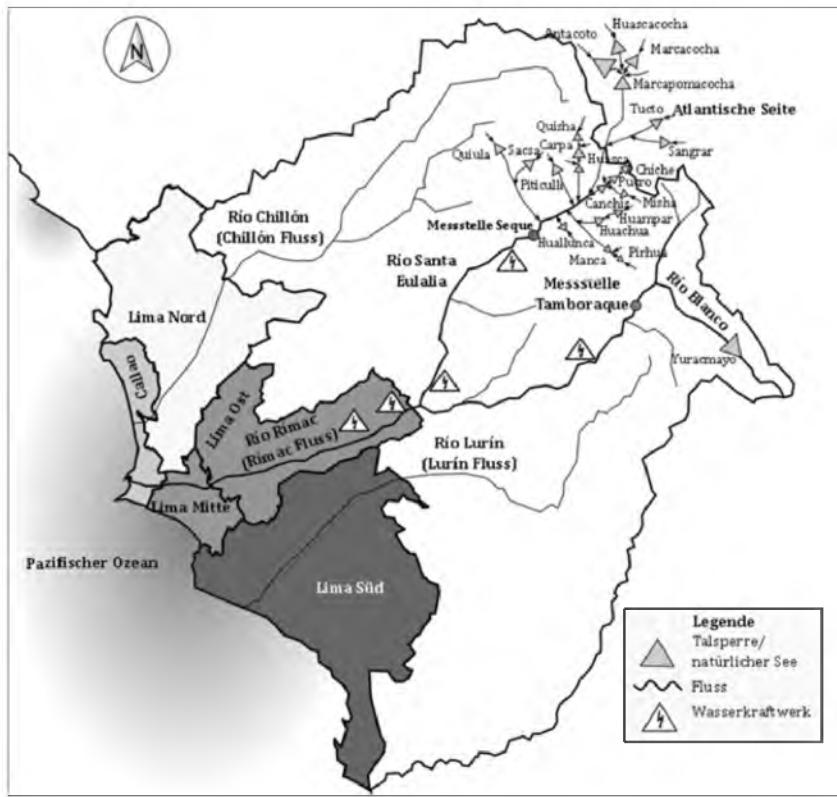


Bild 29: Stadtbezirke von Lima und die wichtigsten Wasser- und Energiequellen für die Wasser- und Stromversorgung der Stadt

Quelle: selbst erstellt auf Grundlage von [90]

Lima ist in fünf Bezirke (Lima-Nord, Lima-Süd, Lima-Ost und Lima-Mitte sowie die Provinz Callao) gegliedert, die wiederum in Summe aus 49 Stadtteilen bestehen (Tabelle A 10, Anhang A). Die bevölkerungsreichsten Stadtteile von Lima befinden sich in den nördlichen Bezirken, wo 27 % der Gesamtbevölkerung lebt (vgl. [87]). Die Bevölkerungsstruktur über die einzelne Stadtteile ist sehr heterogen. Im Jahre 2007 lebten 22 % der Bevölkerung (462.347 Einwohner) der nördlichen Stadtteile in Armut. Dagegen waren nur 6% der Bevölkerung (112.507 Einwohner) in den zentralen Stadtteilen als arm zu bezeichnen (vgl. [91]).

Die urbane Entwicklung der Stadt – insbesondere in den nördlichen Stadtteilen – steht zum großen Teil nicht im Einklang mit den Stadtentwicklungsplänen. Als Gründe gelten unzureichende rechtliche, finanzielle, technische und personelle Mittel für eine angemessene Steuerung der Stadtentwicklung (vgl. [88]). Das führt zu schneller

und unstrukturierter Bildung periurbaner Ansiedlungen, in denen in der Regel keine sichere Wasser- und Energieversorgung gewährleistet ist.

Tabelle 6: Stadtbezirke von Lima

Bezirk	Lima-Nord	Lima-Ost	Lima-Mitte	Lima-Süd	Provinz Callao	Gesamt
Fläche [km ²]	857	814	148	853	131	2.803
Einwohnerzahl*	2.083.583	2.111.289	1.841.357	1.569.513	876.877	8.482.619

Quelle: [87]; * Diese Zahlen stellen die durch die Volkszählung von 2007 nominal gezählte Bevölkerung dar.

Die große Anzahl von Menschen ohne sicheren Zugang zu grundlegenden Dienstleistungen, die stetige Zunahme der Bevölkerung und die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot stellen Wasser- und Energieunternehmen sowie Stadtplaner in Lima vor große Herausforderungen. Die begrenzten Ressourcen, vor allem Wasser, müssen auf immer mehr häusliche, gewerbliche und landwirtschaftliche Verbraucher verteilt werden. Die Nachfrage nach Wasser, Sanitäreinrichtungen und Strom übersteigt saisonal bereits die verfügbaren regionalen und überregionalen Ressourcen und Infrastrukturkapazitäten. Ausbau und Instandhaltung, vor allem der Wasserinfrastrukturen, entwickeln sich aufgrund begrenzter finanzieller Mittel deutlich langsamer als die Nachfrage.

4.2.1 Wassergewinnung und Trinkwasserversorgung

Für die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung ist das staatliche Unternehmen SEDAPAL verantwortlich. Die 49 Stadtteile werden von SEDAPAL in die drei Versorgungsbezirke Nord, Mitte und Süd sowie sieben Versorgungsteilbezirke gegliedert. Nach [87] sind 83 % der Einwohner an das Trinkwassernetz angeschlossen. Der Rest der Bevölkerung wird überwiegend durch Tankwagen versorgt.

Lima verfügt über erneuerbare Frischwasserressourcen in Form von Oberflächenwasser (Einzugsgebiet des Flusses Rimac) in Höhe von ca. 149 m³ pro Person und Jahr (vgl. [92]). Gemäß dem Falkenmark-Index (vgl. [93]) ist Lima durch extremen Wassermangel gekennzeichnet. Aufgrund der begrenzten regionalen Wasser- und Energiressourcen sind die Trinkwasser- und Stromversorgung überwiegend vom Wasserdargebot aus dem Andengebiet abhängig. Rund 82 % der Wasserversorgung wird von Niederschlägen aus den Anden gedeckt. Die wichtigsten Flüsse für die Wasserversorgung der Stadt sind die Flüsse Chillón und Rimac. Laut [94] tragen der Chillón ca. 3 % und der Rimac ca. 79 % zur Trinkwasserversorgung bei. Die restlichen 18 % werden durch Grundwasserentnahmen auf dem Stadtgebiet gedeckt.

Der Chillón entspringt im Anden-Gebirgszug „Cordillera la Viuda“ in einer Höhe von über 4.600 m.ü.d.M. und mündet nach 126 km in den Pazifischen Ozean. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von 2.353 km² [90]. Die Abflüsse des Chillón haben einen ausgeprägten saisonalen Charakter. Nach Angaben von [90] beträgt das mittlere jährliche natürliche Wasserdargebot 320 Mio.m³ (10,2 m³/s).

Für die Trinkwassergewinnung werden in der Regenzeit ca. 1,5 m³/s durch die Trinkwasseraufbereitungsanlage „Planta Chillón“ entnommen. Tabelle 7 zeigt eine Gegenüberstellung der mittleren jährlichen Abflüsse des Chillón und der Entnahmen für den Zeitraum von 2003 bis 2013. Die Wasseraufbereitungsanlage Chillón hat eine maximale Kapazität von 2,5 m³/s und versorgt die nördlichen Stadtteile Puente Piedra, Ancón, Carabayllo, Comas und Santa Rosa, sowie den Stadtteil Ventanilla der Provinz Callao.

Tabelle 7: Mittlere jährliche Abflüsse und Entnahmen des Chillón [m³/s]

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Abfluss	5,98	3,18	2,58	4,98	6,48	5,37	9,36	6,14	6,56	5,95	5,41
Entnahme	0,54	0,47	0,57	0,66	0,81	0,72	1,10	0,74	0,94	0,88	0,83

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [95]; [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]; [101]

Der Rimac entspringt in den Hochanden in einer Höhe von 5.000 m.ü.d.M. und mündet nach 127 km in den Pazifischen Ozean. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von 3.504 km². Nach Angaben von [90] beträgt das mittlere jährliche natürliche Wasserdargebot 850,5 Mio. m³ (ca. 27 m³/s). Der mehrjährige mittlere Abfluss des Rimac (natürliche Abflüsse) betrug für den Zeitraum von 1965 bis 2010 25,8 m³/s, davon 18,6 m³/s während der Trockenzeit.

Der Abfluss des Rimac wird durch 22 Talsperren und eingestaute natürliche Seen reguliert. Die Speicher befinden sich in den oberen Einzugsgebieten der Flüsse Mantaro, Santa Eulalia und Río Blanco in den Hochanden (vgl. Bild 29). Sechs Speicher befinden sich auf der atlantischen und 16 auf der pazifischen Seite der kontinentalen Wasserscheide. Das Talsperrensystem hat eine maximale Speicherkapazität von 331 Mio. m³. Zu diesem Volumen tragen das Einzugsgebiet des Mantaro (atlantische Seite) 206 Mio.m³, das Einzugsgebiet des Santa Eulalia 77 Mio.m³ und das Einzugsgebiet des Río Blanco 48 Mio.m³ (pazifische Seite) bei (vgl. [102], [103]). Die Speicherkapazitäten der einzelnen Talsperren und natürlichen Seen reichen von 0,70 Mio. m³ bis zu 120 Mio. m³ (siehe Anhang, Tabelle A 11). Im mittleren und unteren Einzugsgebiet des Rimac dienen fünf Wasserkraftwerke der Stromerzeugung, die zu 11 % der landesweiten Stromproduktion beitragen. Durchschnittlich 17 % (2,7 m³/s) bzw. 5,3 % (0,90 m³/s) der Wasserabgabe decken den Wasserbedarf der regionalen Landwirtschaft bzw. Industrie. Der Rest des Wassers deckt zu 79 % die Trinkwasserversorgung von Lima.

Aufgrund der klimatischen Bedingungen werden die Talsperren während der Regenzeit von Dezember bis April gefüllt und während der Trockenzeit kontrolliert entleert. Ziel ist es, im Rimac einen konstanten Abfluss von 21 m³/s zu erreichen und eine Reserve für das jeweilige Folgejahr zu erhalten. Dabei gilt es, am Ende der Entleerungsperiode für normale und feuchte Abflussjahre ein Restvolumen von 140 Mio. m³ und für trockene Abflussjahre von 70 bis 80 Mio. m³ zurückzuhalten (vgl. [103]) (die Daten gelten ohne den Ende 2012 in Betrieb genommenen Speichersee „Huascacocha“). Für den Betrieb der Talsperren und natürlichen Seen ist das Energieunternehmen EDEGEL in Kooperation mit SEDAPAL verantwortlich. Beide Unternehmen erstellen in Absprache einen regelmäßig angepassten Plan für die Gesamtabgabe. Die betriebliche Umsetzung der Wasserabgaben der einzelnen Speicher liegt in der Verantwortung der Mitarbeiter vor Ort und richtet sich nach dem Plan für die Gesamtabgabe, den aktuell gespeicherten Volumina, den Zielvolumina am Ende der Entleerungsperiode und Prognosen natürlicher Zuläufe. Dafür werden die Abflüsse aus den Speichern manuell fortwährend so eingestellt, dass sowohl die Bewirtschaftungsziele als auch das Restvolumen bei variablen Systemzuständen (Füllgrade) und schwankenden Randbedingungen (natürliche Zuläufe) erreicht werden können. Der Großteil der durch die Talsperrenbewirtschaftung regulierten Abflüsse des Rimac wird in den Wasserwerken „La Atarjea“ und „Huachipa“ entnommen und aufbereitet. Die Anlage „La Atarjea“ hat eine maximale Kapazität von 18,5 m³/s. Die Anlage „Huachipa“ hat eine maximale Kapazität von 12 m³/s und wurde im Jahr 2012 in Betrieb genommen, um die regulierten Abflüsse aus dem Speichersee „Huascacocha“ aufzubereiten. Beide Anlagen nutzen konventionelle Aufbereitungsprozesse wie Siebung, Sedimentation, Flockung, Fällung und Desinfektion. Tabelle 8 zeigt eine Ge genüberstellung der mittleren jährlichen Abflüssen des Rimac und die Entnahmen für den Zeitraum von 2003 bis 2013. Aufgrund einer Dürre im Abflussjahr 2003/2004 lieferte der Fluss 2004 im Durchschnitt 21,1 m³/s, also ca. 26 % unter dem jährlichen historischen Durchschnitt für den Zeitraum von 1997 bis 2013.

Tabelle 8: Mittlere jährliche Abflüsse und Entnahmen des Rimac in m³/s

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Abfluss	28,4	21,7	24,7	26,5	30,2	25,2	32,1	32,2	34,8	33,3	32,5
Entnahme	16,8	14,5	16,4	16,5	16,8	16,4	17,0	17,3	17,6	17,5	17,4

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [95]; [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]; [101]

Die Abflüsse des Rimac werden nahezu vollständig für die Wasserversorgung genutzt. Während der Trockenzeit von Mai bis November fließt nach der Entnahme der Trinkwasseraufbereitungsanlage „La Atarjea“ (ca. 20 km vor der Mündung in den Pazifischen Ozean) kaum noch Wasser im Rimac.

Die zweite maßgebliche Wasserquelle für Lima stellt das Grundwasservorkommen im Stadtgebiet dar, das zu 18 % zur Wasserversorgung beiträgt. Der quartäre Grund-

wasserleiter von Lima hat eine Ausdehnung von 390 km^2 (vgl. [104]). Die gesättigte Zone liegt zwischen 100 m und 500 m Tiefe und besteht zum Teil aus wasserundurchlässigen Schichten, was sie nicht vollständig verwertbar macht. Infolge der zunehmenden Nachfrage nach Wasser stiegen die Grundwasserentnahmen von weniger als $1 \text{ m}^3/\text{s}$ im Jahr 1955 auf ca. $12 \text{ m}^3/\text{s}$ im Jahr 1997, davon $8 \text{ m}^3/\text{s}$ allein durch 378 Grundwasserbrunnen von SEDAPAL (vgl. [104]) (vgl. Bild 30). Der Rest wurde durch 800 private Grundwasserbrunnen (Industrie und Privatpersonen) entnommen. In [104] wird postuliert, dass im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung des Grundwasservorkommens nicht mehr als $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ($518.400 \text{ m}^3/\text{d}$), davon $3 \text{ m}^3/\text{s}$ aus den vom Wasserunternehmen betriebenen Grundwasserbrunnen, entnommen werden sollten. Mittlerweile werden von SEDAPAL im Sinne einer nachhaltigen Nutzung die Grundwasservorkommen künstlich durch Oberflächenwasser (Einstauungen von Fließgewässern) angereichert und die Entnahmen teilweise durch Oberflächenwasser substituiert. Damit konnten in Summe die Grundwasserentnahmen bis zum Jahr 2002 auf $9 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert werden. Im gleichen Zeitraum ist der Grundwasserspiegel um 0,25 bis 3,75 Meter pro Jahr gestiegen (vgl. [104]). Die von SEDAPAL entnommenen Mengen sind stark zurückgegangen und betragen 2011 im Durchschnitt nur noch $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (vgl. [94]). Bild 30 zeigt die durchschnittliche jährliche Grundwasserentnahme durch den Brunnen von SEDAPAL für den Zeitraum von 1955 bis 2007 sowie exemplarisch die jährliche Änderung des Grundwasserspiegels für zwei repräsentative Brunnen (P-156, P-181). Trotz dieser Maßnahmen zur nachhaltigen Grundwasser-bewirtschaftung sinkt der Grundwasserspiegel immer noch in einigen Gebieten wie z. B. in den Stadtteilen Puente Piedra im Norden von Lima, Ate im Osten und Surquillo im Zentrum.

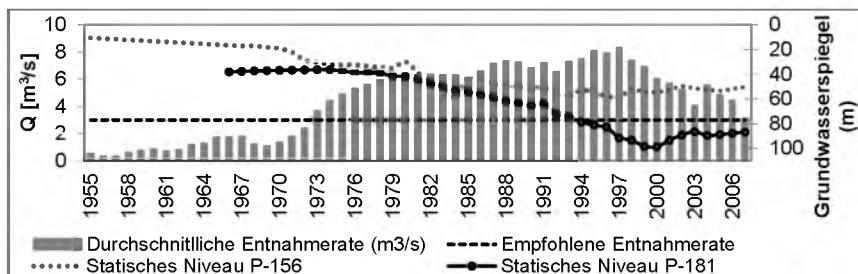


Bild 30: Entnahmen aus den Brunnen von SEDAPAL und Änderung des Grundwasserspiegels für zwei repräsentative Brunnen von 1955 bis 2007
Quelle: SEDAPAL

Insbesondere während trockener Abflussjahre wird die quantitative Versorgung schwieriger. Ein Beispiel dafür ist das trockene Abflussjahr 2003/2004, bei dem die Wasserentnahme über der maximal empfohlenen Menge von $6 \text{ m}^3/\text{s}$ lag. Allein durch die Brunnen von SEDAPAL wurden $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$ entnommen, dazu kommt die Wasser-

entnahme durch privaten Brunnen, die in legale und illegale Brunnen einzuordnen sind. Die privaten legalen Brunnen entnehmen entsprechend Angaben des Betriebspersonals im Jahrsdurchschnitt ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Entnahmemengen aus illegalen Brunnen sind unbekannt.

Unter den normalen hydrologischen Bedingungen, die seit 2007 herrschen, hat die Trinkwasserproduktion bis 2011 durchschnittlich um 1,2 % pro Jahr zugenommen (siehe Bild 31).

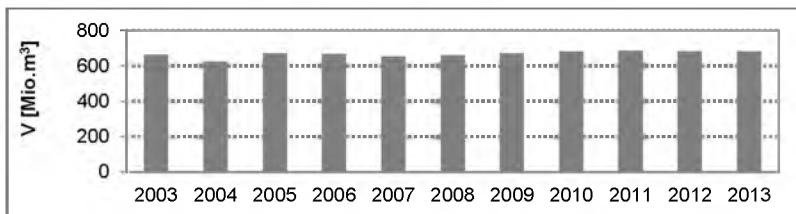


Bild 31: Jährliche Trinkwasserproduktion in Lima von 2003 bis 2013

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [95]; [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]; [101]

Mit steigender Grundwasserentnahme und -aufbereitung steigt auch der Verbrauch elektrischer Energie. Obwohl Grundwasserentnahmen im Durchschnitt nur zu 18 % zur Wasserversorgung der Stadt beitragen, erfordert der Betrieb der entsprechenden Förder- und Aufbereitungsanlagen 28,4 % des Stromverbrauchs, der für die gesamte Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung notwendig ist (z. B. für das Jahr 2011 134,28 MWh/a, vgl. [94]). Dagegen beträgt der Stromverbrauch für die Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächengewässern 3,3 % (4,41 MWh/a) des gesamten Verbrauchs (siehe Bild 32).

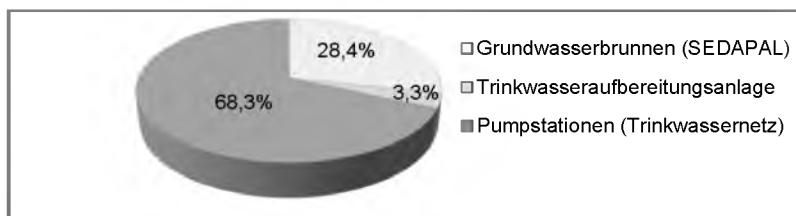


Bild 32: Anteil des Stromverbrauchs der Wasserversorgung in Lima (Jahr 2011)

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [94]

An das Trinkwassernetz sind 83 % der Bevölkerung (7,01 Mio. EW) angeschlossen (vgl. [87]), mithin haben 1,4 Mio. Einwohner keinen Zugang zum Netz. Die nicht angeschlossenen Bevölkerungsteile werden hauptsächlich durch Tankwagen

oder private Grundwasserbrunnen versorgt. Tabelle 9 zeigt die Zusammensetzung der verschiedenen Wasserversorgungsformen für jeden Stadtbezirk von Lima.

Tabelle 9: Wasserversorgungsformen in Lima (2007)

Bezirk	Gesamte Einwohnerzahl	Anteile Wasserversorgungsform					
		TWN [%]	OTA [%]	TWA [%]	PGW [%]	OGW [%]	Andere [%]
Lima Nord	2.075.446	81,2	5,0	9,0	2,6	0,3	1,9
Lima Ost	2.084.289	79,5	5,2	10,1	2,4	0,7	2,0
Lima Mitte	1.810.591	97,8	0,7	0,3	0,0	0,1	1,1
Lima Süd	1.560.907	78,4	3,0	13,7	2,1	0,1	2,8
Provinz Callao	869.536	77,4	6,2	13,4	1,4	0,1	1,6

Quelle: [87]; TWN: Trinkwassernetz; OTA: Öffentliche Trinkwasseranschlüsse; TWA: Tankwagen;

PGW: Private Grundwasserbrunnen; OGW: Oberflächengewässer

Von den Trinkwasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Chillón“ und den Grundwasserwerken gelangt das Trinkwasser über insgesamt 13.626 km Wassertransportleitungen zu den Endverbrauchern (vgl. [100]). Das Trinkwasserverteilungsnetz untergliedert sich in ein primäres Netz sowie sekundäre Regionalnetze. Im primären Netz werden 15 Hochbehälter, deren Speicherkapazität von 3000 m³ bis zu 55.000 m³ reicht, zur Zwischenspeicherung betrieben. Das primäre Netz hat eine Länge von 710 km und das sekundäre Netz ist 12.916 km (vgl. [101]) lang.

Ein großer Teil des aufbereiteten Trinkwassers geht auf dem Weg zu den Verbrauchern im Trinkwassernetz verloren. Die Verluste beruhen zum einen, als physikalische Verluste, auf Leckagen in den Rohren, Trinkwasserspeichern und Hausanschlüssen sowie auf Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. Reinigung von Rohrleitungen). Der Wasserverbrauch illegaler Anschlüsse und Ablesefehler bei Wassermesszähler werden von SEDAPAL ebenfalls den Verlusten zugeordnet (vgl. [105]). Im welchem Verhältnis die einzelnen Verlustarten quantitativ zueinander stehen, lässt sich nur vermuten, da die Anzahl der illegalen Anschlüsse und deren Wasserverbrauch unbekannt ist. Es stehen zumindest Abschätzungen über die Gesamtverluste als Differenz aus der bekannten aufbereiteten Wassermenge und den in Rechnung gestellten Verbräuchen und grobe Abschätzungen über die gesamten physikalischen Wasserverluste zur Verfügung. Durch weitere Maßnahmen – wie z. B. Leckageerkennungstests, Instandsetzungsarbeiten und Überwachung der Volumenströme in Teilbereichen (z. B. Messzonen) – konnten die gesamten Wasserverluste während des Zeitraums von 2009 bis 2013 um ca. 9 % auf 29 % reduziert werden. Bild 33 zeigt die Entwicklung der gesamten und der abgeschätzten physikalischen Wasserverluste für den Zeitraum von 2003 bis 2013.

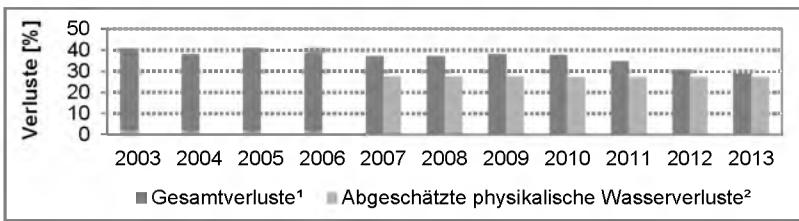


Bild 33: Gesamte Trinkwasserverluste in Lima von 2003 bis 2013

Quelle: ¹Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [95]; [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]; [101]; ²[89]

Mit den Wasserverlusten, im Besonderen mit den Leckageverlusten, geht nicht nur Wasser, sondern auch die bei der Trinkwasseraufbereitung eingesetzte elektrische Energie verloren. In Vergleich zur Wassergewinnung, Abwasserentsorgung und Abwasserreinigung ist die Trinkwasserverteilung der größte Energieverbraucher. Im Jahr 2011 hatte die Trinkwasserverteilung einen Anteil 51,3 % (178,62 MWh/a) am gesamten Stromverbrauch des Wasser- und Abwassersystems (vgl. Bild 34).

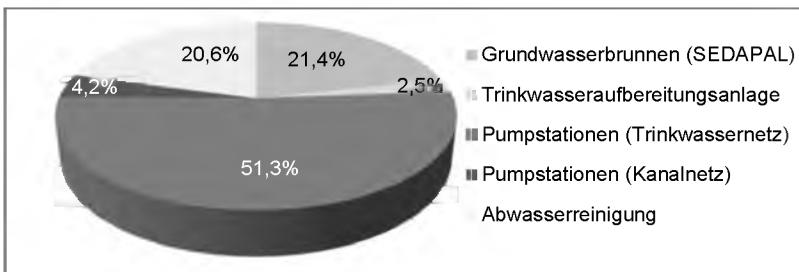


Bild 34: Anteile des Stromverbrauchs im Wassersystem von Lima (2011)

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [94]

Die Trinkwasserversorgung durch SEDAPAL ist hauptsächlich aufgrund der knappen Wasserressourcen, insbesondere während der Trockenzeit, begrenzt. Wie bereits erwähnt sind 7,01 Mio. Einwohner an das Trinkwassernetz in Lima angeschlossen. Davon werden 6,96 Mio. Einwohner sieben Tage in der Woche mit Trinkwasser versorgt (vgl. [87]). Nicht alle haben jedoch für volle 24 Stunden am Tag Zugang zu Trinkwasser (vgl. Bild 35).

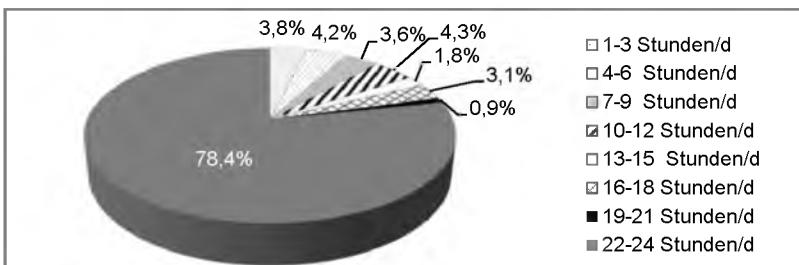


Bild 35: Zugang zum Trinkwasser in Lima (2007)

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [87]

4.2.2 Trinkwasserverbrauch

In Lima verbraucht eine Person im Durchschnitt 250 l/d (einschließlich der physikalischen Wasserverluste und des Gewerbeanteils). Je nach Wasserversorgungsform und Bevölkerungsgruppe weicht der Verbrauch erheblich von diesem Wert ab und reicht von 30–60 l/d (arme Person), was deutlich unter dem von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) angegebenen minimal erforderlichen Pro-Kopf-Wasser- verbrauch (100 l/d) liegt (vgl. [106]), bis 400 l/d (gut situierte Person). Werden Gewerbeanteil und physikalische Wasserverluste im Verteilungssystem (ca. 27,5 %, Jahr 2007) herausgerechnet, so ergibt sich ein durchschnittlicher personenbezogener Wasserverbrauch von 153 l/d. Dieser Wert wurde als Referenzwert für die Modellierung des Wasserbedarfs der Privathaushalte (Abschnitt 4.4.5) verwendet.

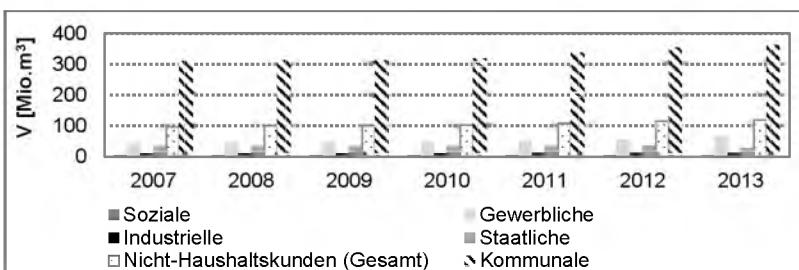


Bild 36: In Rechnung gestellte jährliche Wasservolumen von den Haushalts- und Nicht-Haushaltskunden in Lima je nach Wassertarife

Quelle: Selbst erstellt auf der Grundlage von Daten aus [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]; [101]

Die Nicht-Haushaltskunden lassen sich in gewerbliche, staatliche und industrielle Kunden unterteilen. Bild 36 zeigt das in Rechnung gestellte jährliche Wasservolumen von Haushaltskunden und Nicht-Haushaltskunden in Lima.

4.2.3 Wasserverbrauch von Landwirtschaft und Gewerbe im Einzugsgebiet des Rimac

Außerhalb der Stadt und oberhalb der Wasserwerke entlang des Verlaufs der Flüsse Rimac und Chillón befinden sich Landwirtschaftsflächen und Bergbauindustrien, die Wasser aus beiden Flüssen entnehmen. Gemäß [107] werden für insgesamt 3.946 ha Landwirtschaftsflächen aus dem Rimac ca. 100.8 Mio. m³ Wasser pro Jahr entnommen (Tabelle A 12, Abschnitt 6.1). Bild 37 zeigt die von [107] abgeschätzten Wasserverbräuche der Landwirtschaftsflächen.

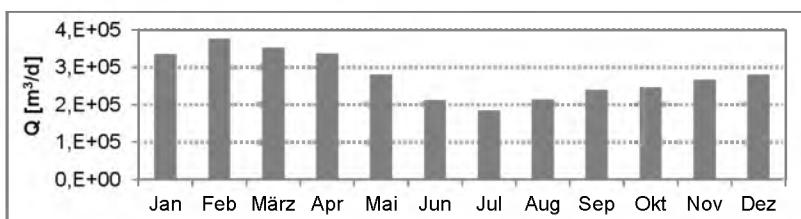


Bild 37: Mittlere monatliche Wasserverbräuche der Landwirtschaft

Quelle: [107]

Nach Angaben von [108] verbraucht die Bergbauindustrie im Durchschnitt 27 Mio. m³ Wasser pro Jahr. Bild 38 und Tabelle A 13 (Abschnitt 6.1) zeigen die von [108] abgeschätzten mittleren monatlichen Wasserverbräuche der Industrie im Einzugsgebiet des Rimac.

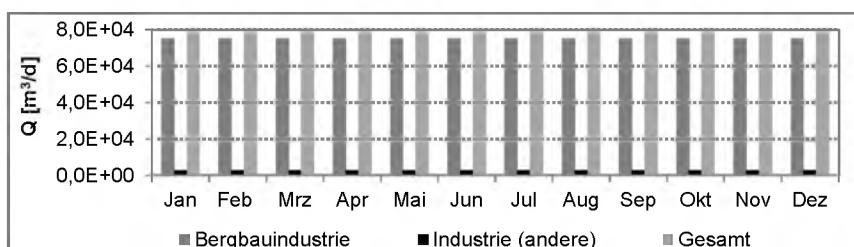


Bild 38: Mittlere monatliche Wasserverbräuche der Industrie

Quelle: [108]

4.2.4 Abwasserentsorgung und Abwasserreinigung

An das Kanalnetz sind 84 % der Bevölkerung (7,06 Mio. Einwohner) angeschlossen (vgl. [87]), während 1,4 Mio. Einwohner keinen Zugang dazu haben. Hier erfolgt die

Abwasserentsorgung über Klärgruben, Sickergruben oder direkt in die Vorflut (Tabelle 10).

Tabelle 10: Abwasserentsorgungsformen in Lima

Bezirk	Gesamte Einwohnerzahl	Anteile Abwasserentsorgungsform		
		KAN [%]	KSG [%]	VOF [%]
Lima Nord	2.075.446	81,1	15,9	3,0
Lima Ost	2.084.289	81,1	14,5	4,4
Lima Mitte	1.810.591	98,6	0,4	1,0
Lima Süd	1.560.907	77,9	19,1	3,0
Provinz Callao	869.536	78,6	18,2	3,2

KAN: Kanalnetz; KSG: Klärgruben und Sickergruben; VOF: Vorfluter (Flüsse/Kanäle)

Quelle: [87]

Die an das Kanalnetz angeschlossene Bevölkerung produziert im Durchschnitt eine Abwassermenge von $18,9 \text{ m}^3/\text{s}$, davon werden nur 35 % gereinigt (2013) (vgl. [101]). Das Kanalisationssystem von Lima hat eine Länge von 12.244 km, in dem 98 % des Abwassers mittels Freigefälle transportiert wird. Der Abwassertransport verbraucht dementsprechend kaum Energie. Das Kanalnetz untergliedert sich in ein primäres Netz sowie sekundäre Regionalnetze. Das primäre Kanalnetz hat eine Länge von 885 km und besteht aus Sammlern, deren Durchmesser von 350 mm bis zu 2400 mm reichen (vgl. [101]). Tabelle A 14 (Abschnitt 6.1) zeigt die mittleren jährlichen Durchflüsse in den Hauptsammelröhren für den Zeitraum von 2007 bis 2013 sowie die Behandlungs-/Entsorgungsarten der abgeleiteten Abwässer. Die Summe der durchschnittlich abgeleiteten Abwassermengen ist in diesem Zeitraum von $17,8 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $18,9 \text{ m}^3/\text{s}$ gestiegen (siehe Bild 39).

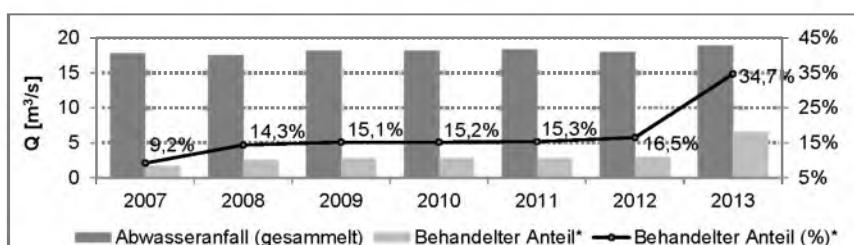


Bild 39: Entwicklung der mittleren jährlichen Abwasserentsorgung und des behandelten Anteils von 2007 bis 2013

Quelle: selbst berechnet auf der Grundlage von [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]; [101]

* Die Werte beziehen sich auf die von SEDAPAL betriebenen Kläranlagen

Ein großes Problem stellen illegale Anschlüsse an das Kanalnetz dar, insbesondere die Einleitung von Abwässern aus Gerbereien, Schlachthöfen und der metallarbeitenden Industrie. Die Anzahl der illegalen Anschlüsse ist unbekannt. Aller-

dings sind die Auswirkungen der illegalen Anschlüsse auf den Zustand des Kanalnetzes (Ablagerungen, Geruchsemissionen) und auf die Reinigungsleistung einiger kommunaler Kläranlagen greifbar. Durch 22 von SEDAPAL betriebene Kläranlagen werden 35 % des abgeleiteten Abwassers (2013) gereinigt. Tabelle A 15 (Abschnitt 6.1) zeigt die Reinigungsverfahren der Kläranlagen. Die maximale hydraulische Kapazität der Anlagen variiert erheblich und reicht von 0,001 m³/s bis zu 14,71 m³/s (Tabelle A 16).

Mit dem Anstieg des Trinkwasserbedarfs und des Abwasseranfalls gewinnt effizienter Anlagenbetrieb zunehmend an Bedeutung. Grundsätzlich sind die Kapazitäten hinsichtlich Abwasserentsorgung und -reinigung völlig unzureichend. Im Jahr 2013 waren sieben Kläranlagen hydraulisch deutlich überlastet. Tabelle A 16 (Abschnitt 6.1) zeigt eine Gegenüberstellung des Bemessungszulaufs und der mittleren jährlichen Zuläufe der Kläranlagen für den Zeitraum von 2007 bis 2013. SEDAPAL plante in den vergangenen Jahren den Bau weiterer Abwasserreinigungsanlagen, mit dem langfristigen Ziel, in Zukunft 100 % des Abwassers zu reinigen. So wurde 2013 die Kläranlage „Taboada“ (nur mechanische Reinigung) im Betrieb genommen. Mit einem Bemessungszulauf von 14 m³/s ist sie die größte Kläranlage Südamerikas. Sie soll 75 % des Abwassers von Lima reinigen (vgl. [109]). In Bau ist derzeit die Kläranlage „La Chira“ (nur mechanische Reinigung), mit einem Bemessungszulauf von 6,3 m³/s (vgl. [110]).

Zusätzlich zur hydraulischen Überlastung führen erhöhte Frachten der Abwasserparameter CSB und BSB₅ zu betrieblichen Problemen. Ursache sind Einleitungen aus Schlachthöfen sowie der Textil-, Papier- und Lederindustrie. Das hat mittlerweile zu einer gravierenden Verschlechterung der Reinigungsleistung geführt. So wurden im Sammler „Puente Piedra“ (Lima Nord) in den Jahren 2009 und 2010 CSB-Werte von bis zu 2000 mg/l gemessen – deutlich höher als der Erwartungswert von 1000 mg/l für kommunales Abwasser (vgl. [111]). Für denselben Zeitraum wurden im Sammler „Ventanilla“, mit Anschluss an die Kläranlage „Ventanilla“, mehrfach CSB-Werte von über 1.500 mg/l gemessen.

4.3 Stromerzeugung

Nach Angaben von [112] hat im Jahr 2009 die Nutzung von Wasserkraft zu 63 % zur gesamten Stromproduktion von Peru beigetragen. Erdgas lag mit einem Anteil von ca. 31 % an zweiter Stelle. Erdgas gewinnt bei der Stromproduktion immer mehr an Bedeutung, sein Anteil in Peru ist zwischen 2000 und 2009 von 3,8 % auf 31,2 % gestiegen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Anstieg von ca. 34 %. Bild 40 zeigt die Entwicklung der gesamten Stromproduktion aus diversen Primär-energieträgern für den Zeitraum von 2000 bis 2009.

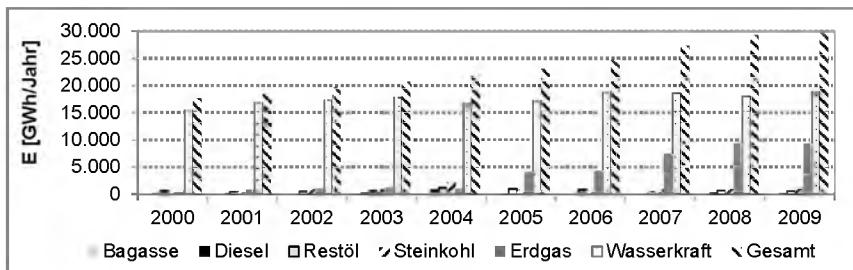


Bild 40: Entwicklung der Stromproduktion nach Primärenergieträgern in Peru

Quelle: [112]

Im Jahr 2010 betrug die jährliche Stromproduktion ca. 36 GWh, davon wurden 56 % durch Wasser- und 44 % durch Wärmekraftwerke produziert. Lima verbraucht 47 % der gesamten in Peru produzierten elektrischen Energie (vgl. [113]). Der Strombedarf wird zum großen Teil durch Wasserkraft gedeckt (vgl. [88], [114]), wovon 21,3 % auf fünf Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac entfallen. Für den Betrieb der Wasserkraftwerke ist das private Energieunternehmen EDEGEL verantwortlich. Die Nennleistungen der Wasserkraftwerke reichen von 28 MW bis zu 240 MW (Tabelle 11) und machen in Summe 7 % der gesamten in Peru installierten Leistung von 7.986 MW aus (vgl. [115]). Die in Tabelle 11 angegebenen maximalen Durchflüsse werden, insbesondere während der Trockenzeit, aufgrund der zwischen SEDAPAL und EDEGEL vereinbarten Wasserabgaben in der Regel nicht ausgeschöpft.

Tabelle 11: Parameter der Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac

Wasserkraftwerk	Nennleistung [MW]	Maximaler Durchfluss [m³/s]	Leistungsfaktor [MW/m³/s]
Huinco	240,0	24,4	9,84
Matucana	120,0	14,8	8,11
Callahuana	80,5	20,0	4,03
Moyopampa	64,7	17,5	3,70
Huampaní	28,0	18,5	1,51
Gesamt	533,2		

Quelle: [103]; EDEGEL

Bild 41 zeigt für die Jahre 2002 bis 2010 die Entwicklung der landesweiten Stromerzeugung im Vergleich zur Stromproduktion der fünf Wasserkraftwerke. Die Daten zeigen eine deutliche Reduktion der Stromproduktion der Wasserkraftwerke im Jahr 2004 um 41% im Vergleich zum Vorjahr. Ursache war eine Dürre im Abflussjahr 2003/2004. Dies verdeutlicht noch einmal die Bedeutung der Wasserkraft für Peru und insbesondere für Lima.

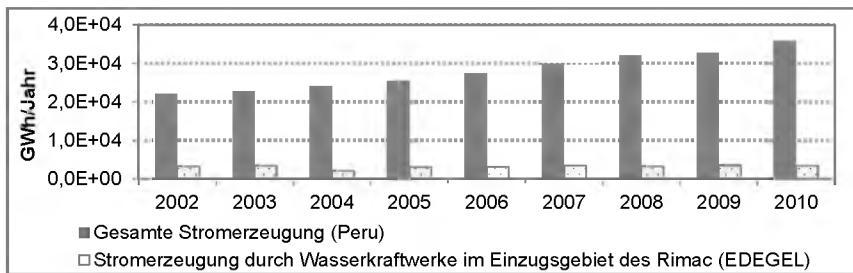


Bild 41: Gesamte Stromerzeugung in Peru und Stromerzeugung durch die fünf Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac

Quelle: [116]; [117]; [118]; [119]; [120]; [121]; [122]; [115]; [113]

Hinweis: Die für die gesamte Stromproduktion dargestellten Daten ergeben sich aus der Summe der Stromproduktion aus den Kraftwerken, die Strom für den Strommarkt erzeugen, und der Stromproduktion aus den Kraftwerken privater Unternehmen, die Strom für den eigenen Verbrauch erzeugen.

4.4 Anwendung des Ansatzes

4.4.1 Übersicht

Die Anwendung des in Kapitel 3 vorgestellten Ansatzes zur integrierten Modellierung transsektoraler Infrastrukturen wird auf die Wasser- und Stromversorgung sowie auf die Abwasserentsorgung der Stadt auf der Ebene von Stadtbezirken demonstriert. Dafür werden die fünf Bezirke von Lima als einzelne Module und mittels der in Abschnitt 3.8.1 vorgestellten Prozessmodelle für Endverbraucher modelliert. Neben den Stadtbezirken werden das Talsperrensystem und die Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Flusses Rimac sowie das Aquifersystem im Stadtgebiet von Lima, die von zentraler Bedeutung für die Trinkwasser- und Stromversorgung der Stadt sind, modelliert. Zur Modellierung des Talsperrensystems werden die in Abschnitt 3.8.2 beschriebenen Prozessmodelle angewendet. Für die Regelung der Wasserabgabe aus dem Talsperrensystem wird der im Abschnitt 3.9 diskutierte Regelungsansatz implementiert. Das Modell des Talsperrensystems wird mit dem urbanen Wasser- und Energiesystem der Stadt gekoppelt. So lassen sich die gespeicherten Wasservolumina in den Talsperren und natürlichen Seen in Zusammenhang mit der variierenden Nachfrage nach Wasser und Strom der Stadt und dem variierenden natürlichen Wasserdargebot integriert betrachten.

Auf der Basis verfügbarer Daten wurde der Ist-Zustand des Systems für den Zeitraum von 2007 bis 2013 modelliert. In diesem Zeitraum handelte es sich aus hydrologischer Sicht um normale Abflussjahre. Für die Quantifizierung der Nachfrage nach Wasser und Strom und die damit verbundene Entwicklung der Stoff- und Energie-

ströme in Lima wurden die Daten von [87] und ein mittleres Bevölkerungsszenario aus [89] verwendet. Für die Modellierung und Regelung des Talsperrensystems im Einzugsgebiet des Rimac standen Monatsmittelwerte für natürliche Zuläufe, Verdunstung und Niederschlag für den Zeitraum von 2007 bis 2013 zur Verfügung. Die Daten wurden vom Energieunternehmen EDEGEL bereitgestellt. Für die Modellierung der Grundwasserbewirtschaftung wurden Monatsmittelwerte für die Grundwasserentnahme verwendet. Die Daten wurden vom staatlichen Wasserunternehmen SEDAPAL bereitgestellt.

Die Wasser-, Abwasser- und Energieströme wurden für einen Zeitraum von 23 Jahren (2007–2030) in Monatsschritten bilanziert. Die Untersuchung des Systems in Monatszeitschritten ermöglicht beispielsweise die Abbildung saisonaler Schwankungen beim Wasser- und Strombedarf der Privathaushalte sowie monatlicher Schwankungen des Wasserdargebots der Flüsse und der Grundwasserentnahmen.

Zur Modellierung und Simulation wurden die Softwarewerkzeuge SIMBA# (vgl. [123]) und LiWatool (vgl. [124]) verwendet. SIMBA# dient der dynamischen Modellierung und Simulation von Prozessen in Abwasser- und Talsperrensystemen und LiWatool dient der Modellierung und Simulation von Stoffströmen auf der Grundlage der Materialflussanalyse. Beide Werkzeuge basieren auf demselben Programmkernel (vgl. [125]), sodass LiWatool in dieser Arbeit als Simulationsplattform mit eingebetteten SIMBA#-Prozessmodellen fungiert. Für die Modellierung wurden die in Kapitel 3 beschriebenen Konzepte als Module implementiert. Das Beispiel belegt aufgrund der Komplexität des Systems und der Menge der verwendeten Daten noch einmal nachdrücklich den Bedarf an modellgestützten Methoden.

4.4.2 Aufgabenstellung und Ziele

Die Nachfrage nach Wasser und Strom der Privathaushalte ist direkt mit Verbrauchsverhalten, Lebensstil und sozioökonomischem Status verbunden. Für die Zukunft wird erwartet, dass sich die Niederschlagsmengen verringern werden. Jedoch sind hier die Prognosen nicht eindeutig. So führen unterschiedlich angesetzte klimatische Szenarien zu dem Schluss, dass sich der Abfluss des Rimac bis zum Jahr 2050 um bis zu ca. 12 % verringern oder um bis zu ca. 7 % vergrößern kann (vgl. [126], [127]).

Untersuchungen zur Bevölkerungsentwicklung in Lima kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen. So rechnet [89] beispielsweise für die zukünftige Planung der Wasser- und Abwasserentsorgung mit einer Gesamtbevölkerung von ca. 14,2 Mio. Einwohnern im Jahr 2045. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts „LiWa“ lag die geschätzte Bevölkerung bei 16 Mio. Einwohnern im Jahr 2040 (vgl. [128]). Im Extremfall muss mit einer Zunahme der Bevölkerung auf 17,5 Mio. Ein-

wohner im Jahr 2040 (Szenario mit hohem Wachstum) gerechnet werden (vgl. [89]). Um zukünftige Entwicklungen hinsichtlich der Wasser- und Stromversorgung sowie der Abwasserentsorgung betrachten zu können, werden in diesem Anwendungsbeispiel das Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Rimac und die Grundwasserressourcen gemeinsam modelliert.

Ziel dieser Anwendung ist die Ist-Darstellung der Wasser-, Abwasser- und Energieströme auf regionaler Ebene und darauf aufbauend eine Darstellung der möglichen Auswirkungen der zukünftigen Bevölkerungsentwicklung und der klimatischen Änderungen auf die zukünftige Wasser- und Stromversorgung der Stadt. Anschließend werden Management- und Betriebsstrategien (z. B. Wassersparmaßnahmen), die zukünftig zur nachhaltigen Bewirtschaftung und Nutzung der Ressourcen Wasser und Energie auf Prozessebene (z. B. Privathaushalte) und Makroebene (sektorale und transsektorale Infrastrukturen) beitragen können, untersucht. Hierbei werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Ressourcenverbrauch (z. B. Nutzerverhalten in Privathaushalten) untersucht, um wirksame Maßnahmen zu identifizieren. Dies ermöglicht die Bestimmung mittelfristiger Auswirkung von Wasser-, Abwasser- und Energieströmen auf die Belastung bestehender Infrastrukturen (z. B. Kläranlagen, Wasserwerke) und Ressourcen (Wasser und Energie).

Im Rahmen dieser Arbeit sollten die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie werden sich Bevölkerungsentwicklung und klimatische Änderungen auf Wasser- und Stromversorgung sowie Abwasserreinigung auswirken?
- Wie viel Zeit braucht das Wassersystem, um sich nach zwei trockenen Abflussjahren zu erholen?
- Welche Maßnahmen sind wirksam, um eine effizientere Nutzung von Ressourcen und Infrastrukturen zu erreichen?
- Welche Möglichkeiten bietet die modellbasierte integrierte Analyse von Wasser-, Abwasser- und Energieströmen zur Entwicklung effizienter und nachhaltiger Nutzungskonzepte?

Damit werden die folgenden Ziele verfolgt:

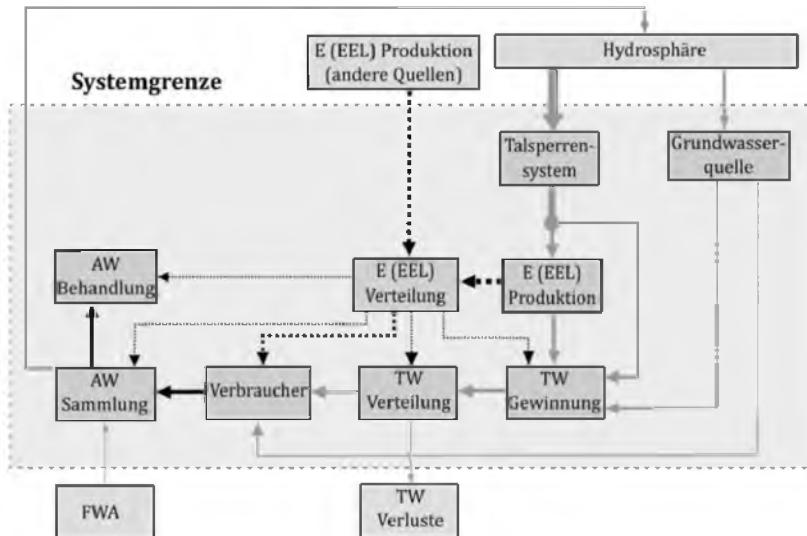
- Darstellung des Ist-Zustands der wesentlichen Wasser-, Abwasser- und Energieströme auf regionaler Ebene
- Untersuchung der Auswirkungen von Kapazitätsänderungen (Änderung des Ressourcendargebots infolge des Klimawandels, Weiterentwicklung von Infrastrukturen)
- Untersuchung der Auswirkungen von Bedarfssänderungen infolge der Bevölkerungsentwicklung

- Untersuchung der Auswirkungen technischer Maßnahmen (z. B. Erweiterung bestehender Infrastruktursysteme, Reduktion von Trinkwasserleckagen) und Managementstrategien (z. B. Wassersparmaßnahmen durch Einsatz von Wasserspargeräten wie wassersparende Toiletten)
- Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen aus Prozess- (Verbraucher, Anlagen) und Makrosicht (transsektorale Infrastrukturen) unter verschiedenen Kriterien
- Ableitung von Handlungsempfehlungen für das Wasser-, Abwasser- und Energiemanagement in Lima

4.4.3 Exemplarisch gewählte Komponente, Prozesse, Volumen- und Stoffströme

Im Sinne integrierter Modellierung und Simulation transsektoraler Infrastrukturen wurde hier die integrierte Analyse ausgewählter Komponenten und Prozesse des Wasser- und Energiesystems von Lima angestrebt. Im Hinblick auf dieses Ziel und der Ausrichtung auf Planungszwecke wurden komplexe Strukturen wie Kanalnetze, Trinkwasser- und Stromverteilungsnetze vereinfacht abgebildet. Aus makroskopischer Sicht wurde nur so weit abstrahiert, dass wichtige Charakteristika für die Erreichung der hier festgelegten Ziele erfasst werden konnten. Tabelle 12 zeigt die gewählten Komponenten sowie die Stoff- und Energieströme.

Das System wurde durch exemplarisch gewählte Komponenten und Prozesse des gekoppelten Wasser- und Energiesystems abgegrenzt. Bild 42 zeigt die Systemgrenze für das Anwendungsbeispiel. Die gewählten Komponenten sowie die Stoff- und Energieströme innerhalb dieser Komponenten wurden auf der Grundlage der in Kapitel 3 dargestellten Grundprinzipien modelliert bzw. bilanziert. Insgesamt wurden 14 verschiedene Stoffströme berücksichtigt. Tabelle A 4 (Abschnitt 6.1) stellt die gewählten Stoff- und Energieströme dar.



TW: Trinkwasser; FWA: Fremdwasser; E (EEL): Energie (Strom); AW: Abwasser

Bild 42: Systemgrenze des Beispiels

Mittels der qualitativen und quantitativen Bestimmung der in den Privathaushalten anfallenden Abwasserströme lassen sich die Zulaufströme in der exemplarisch gewählten Kläranlage von Lima charakterisieren. Volumen- und Stoffströme wurden dann innerhalb der Kläranlage mittels etablierter Prozessmodelle wie des Modells ASM3 der International Water Asociation (vgl. [69]) bilanziert. Hier lassen sich die Auswirkungen variierender technischer, betrieblicher und demographischer Randbedingungen auf Systemzustand und Reinigungsleistung quantifizieren. Die Reinigungsleistung von Kläranlagen und deren Prozesse wurden auf der Grundlage typischer Abwasserparameter, wie des gesamten chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB_{ges}), der Trockensubstanz (TSS), des gesamten Stickstoffs (N_{ges}) und des gesamten Phosphors (P_{ges}) entsprechend der peruanischen Abwasserordnungen, bewertet.

Tabelle 12: Gewählte Komponenten und Stoff- und Energieströme

Komponente	Modell- grundlage	Steuerungs-/ Rege- lungskonzepte	Stoff-/Energiefluss	
			Zulauf	Ablauf
Quellen				
Flüsse	a)	(b)	RW ⁽ⁱ⁾	-
Grundwasserleiter/-brunnen	a)	(a), (b)	FW ⁽ⁱ⁾ , EEL	-
Talsperren/natürliche Seen	b)	(e)	RW ⁽ⁱ⁾	-
Prozesse				
Trinkwasseraufbereitungs- anlagen	a)	(a), (b)	RW ⁽ⁱ⁾	DW ⁽ⁱ⁾
Kläranlagen	b)	-	WW ⁽ⁱⁱ⁾ , EEL	WW ⁽ⁱⁱ⁾
Wasserkraftwerke	a)	-	RW ⁽ⁱ⁾	RW ⁽ⁱ⁾ , EEL
Tankwagen	a)	-	DW ⁽ⁱ⁾	DW ⁽ⁱ⁾
Verbindungselemente				
Trinkwassernetze	a)	-	DW ⁽ⁱ⁾ , EEL	-
Kanalnetze	a)	-	WW ⁽ⁱⁱ⁾ , EEL	-
Stromverteilungsnetze	a)	-	EEL	-
Senken				
Privathaushalte	b)	(c), (d)	DW ⁽ⁱ⁾ , EEL	GW ⁽ⁱⁱ⁾ , WW ⁽ⁱⁱ⁾
Nicht-Haushalte:	a)			
Gewerbe	a)	(d)	DW ⁽ⁱ⁾	WW ⁽ⁱ⁾
Landwirtschaft	a)	(d)	RW ⁽ⁱ⁾	-

a) einfache Modellansätze b) dynamische Prozessmodelle; ⁽ⁱ⁾ nur quantitative Bilanzierung; ⁽ⁱⁱ⁾ quantitative und qualitative Bilanzierung (siehe Tabelle A 5, Tabelle A 6, Tabelle A 7, Tabelle A 8 und Tabelle A 9, Anhang A); (a) gleichmäßige Bewirtschaftung, (b) Bewirtschaftung nach Priorisierung, (c) gleichmäßige Verteilung (d) Verteilung nach Priorisierung; (e) andere (generischer Ansatz zur Abflussregelung von Talsperrensystemen); RW: Flusswasser, FW: Grundwasser, EEL: elektrische Energie, WW: Abwasser, DW: Trinkwasser

4.4.4 Datengrundlage, Annahmen, exemplarisch gewählte Maßnahmen und Bewertungskriterien

Aufgrund des Verlaufs der klimatischen Jahreszeiten in Peru beginnt das hydrologische Jahr am 1. September und endet am 31. August des folgenden Jahres. Um das Wasser- und Energiesystem auch für Zeiten von Wasserknappheit untersuchen zu können, wurde angenommen, dass zwischen 2017 und 2020 zwei trockene Abflussjahre auftreten werden (Bild 43). Hier wurden die Daten der Jahre 2000 bis 2004 an den Zeitraum von 2014 bis 2018 angehängt und im weiteren angenommen, dass sich das natürliche Wasserdargebot von 2019 bis 2020 genauso wie in den trockenen Jahren 2003 und 2004 entwickelt wird. Eine ähnliche Annahme wurde auch für den Zeitraum von 2027 bis 2030 getroffen. Mit diesem pessimistischen Szenario sollte untersucht werden, wie viel Zeit das Talsperrensystem und das gekoppelte System zur Regeneration benötigen und welche Folgen sich für die Stromerzeugung und Wasserversorgung ergeben.

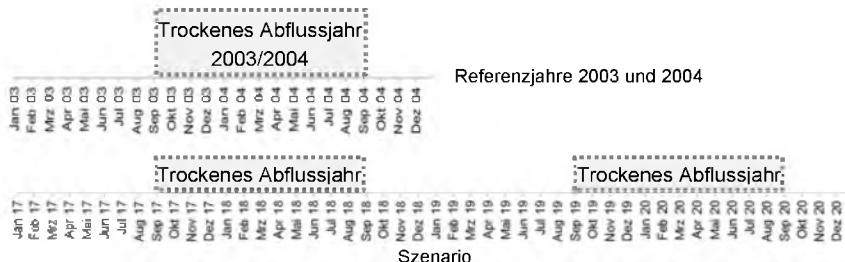


Bild 43: Annahmen für die integrierte Untersuchung des Wasser- und Energie-systems unter Wasserknappheit

Für die Bevölkerung und deren Wasserverbrauch wurde angenommen, dass sie sich mit den Raten des Ist-Zustands weiter entwickeln werden. Tabelle 13 enthält eine Zusammenstellung der für das Anwendungsbeispiel verwendeten Informationen.

Tabelle 13: Ist-Zustand und Szenarien für das Anwendungsbeispiel

Szenario	Zeitraum	Bevölkerungs-entwicklung	Hydrologische Entwick-lung	Grundwasser-entnahmen
Ist	2007-2013	Daten aus der Volks- und Haushaltsszählung von 2007 (vgl. [87]) Mittleres Bevölkerungs-szenario aus [89]	Historische Monatsmittelwer-te natürlicher Zuläufe, Ver-dunstung und Niederschläge	Historische Monatsmittel-werte
S1	2014-2030	Mittleres Bevölkerungs-szenario aus [89]	2014-2018: wie im Zeitraum von 2000 bis 2004 2019-2020: wie im Zeitraum von 2003 bis 2004 2021-2026: wie im Zeitraum von 2005 bis 2010 2027-2028: wie im Zeitraum von 2003 bis 2004 2029-2030: wie im Zeitraum von 2003 bis 2004	2014-2026: wie im Zeitraum von 2000 bis 2012 2027-2028: wie im Zeitraum von 2003 bis 2004 2029-2030: wie im Zeitraum von 2003 bis 2004
S2	2014-2030	Wie in S1	wie in S1	wie in S1

Hinsichtlich der Zukunftsszenarien wurde das System für den Zeitraum von 2014 bis 2030 ohne und mit Implementierung von Maßnahmen (siehe Tabelle 14) untersucht. Die im Modell implementierten Maßnahmen stehen mit Ausnahmen in Einklang mit dem Masterplan von SEDAPAL. Im Rahmen des Szenarios S1 wurde angenommen, dass in Zukunft keine Maßnahmen zur Erhöhung der Wasser- und Energieversorgung implementiert werden. Hier werden Wasser- und Energieinfrastrukturen nicht weiterentwickelt und verbleiben im Ist-Zustand. Im Rahmen des Szenarios S2 wurden exemplarisch sowohl technische als auch nicht-technische Maßnahmen zur

Sicherstellung der Wasser- und Stromversorgung der Stadt implementiert. Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die gewählten Maßnahmen. Tabelle A 41 (Abschnitt 6.1) bietet eine detaillierte Beschreibung der Maßnahmen.

Tabelle 14: Übersicht der exemplarisch gewählten Maßnahmen

Szenario	Zeitraum	Maßnahmen	Umsetzungsjahr/Anwendungsort
Ist	2007-2013	keine	
S1	2014-2030	keine	
S2	2014-2030		
		MA	
		MA1 Erhöhung der Entnahme- und Aufbereitungskapazität von 19 m ³ /s auf 24 m ³ /s	2017/Wasseranlage La Atarjea
		MA2 Bau von drei neuen Talsperren: - „Pomacocha“ mit einer Speicherkapazität von 78,6 Mio. m ³ - „Huallacocha Bajo“ mit einer Speicherkapazität von 11,4 Mio. m ³ - „Autisha“ mit einer Speicherkapazität von 20 Mio. m ³	2020, 2025/Talsperrensystem (Fluss Rimac)
		MA3 Bau von Meerwasserentsalzungsanlagen	2020, 2025/Lima-Süd
		MB	
		MB1 Anwendung wassersparender Toiletten	ab 2014/Privathaushalte von Lima-Nord, Lima-Mitte und Lima-Ost mit sozioökonomischer Schicht C (mittlere Bevölkerungsschicht) und Anschluss an das Trinkwassernetz
		MB2 Reduktion der physikalischen Trinkwasserverluste	ab 2014/Verteilungsnetz (Provinz Callao, Lima-Nord)
		MC Änderung der implementierten Steuerungsstrategien zur Bewirtschaftung der Grundwasserentnahmen	Ab 2014/Grundwasserbrunnen von Lima-Nord
Alle		Alle MA und MB	

Die Maßnahmen stehen, außer MB1 und MC, in Einklang mit dem Masterplan von SEDAPAL.

Die Wirksamkeit der Maßnahmen wurde zunächst in Gruppen untersucht. Hier wurde beispielsweise die Wirksamkeit der Maßnahmen MA1, MA2 und MA3 (Gruppe MA) als Paket untersucht und diese mit der Wirksamkeit der Maßnahmengruppe MB (MB1 und MB2) verglichen. Exemplarisch werden die Ergebnisse für die Implementierung aller Maßnahmen vorgestellt, um deren Wirksamkeit als Ganzes gegenüber dem Szenario ohne Implementierung von Maßnahmen zu prüfen (Abschnitt 4.5.3). Es wurde angenommen, dass einige Maßnahme bereits in der Vergangenheit

implementiert wurden (z. B. Maßnahmengruppe MB), um den Zustand des Systems unter „Was-Wäre-Gewesen-Wenn“-Szenarien untersuchen zu können. So wurde die Wirksamkeit der exemplarisch gewählten Maßnahmen auf der Grundlage bereits aufgetretener und bekannter Ereignisse (z. B. Wasserknappheit, Bevölkerungsentwicklung) und damaliger Systemzustände bewertet. Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Modellierung aller Maßnahmen (also MA und MB, vgl. Tabelle 14) als Diskussionsgrundlage im Sinne der „Was-Wäre-Gewesen-Wenn“-Szenarien zu verstehen ist. Eine Beurteilung hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und sozialer Machbarkeit wurde vernachlässigt. Zur Bewertung der Maßnahmen wurden die in Tabelle 15 aufgeführten Kriterien definiert. Die Definition der Kriterien basiert auf den Zielen der peruanischen Regierung, des Wasserunternehmens und des Energieunternehmens sowie auf der Forschungsfrage dieser Arbeit.

Tabelle 15: Bewertungskriterien für die Maßnahmen

Kriterium	Beschreibung
1	Vollständige Deckung des Wasserbedarfs und Maximierung der Stromerzeugung
2	Sicherstellung des Zielvolumens am Ende der Entleerungsperiode je nach aufgetretenem Abflussjahr
3	Nachhaltige und effiziente Bewirtschaftung von Frischwasserressourcen wie z. B. Grundwasser
4	Effizienter Ressourcenverbrauch im Wassersystem (z. B. durch Verringerung des Stromverbrauchs bei der Wassergewinnung, -aufbereitung, Trinkwasserverteilung, Abwasserentsorgung und -behandlung) und dessen Wirksamkeit auf das Energiesystem (z. B. auf die Stromerzeugung)
5	Belastung bestehender Infrastrukturkapazitäten (Kläranlagen, Wasserwerke)
6	Reinigungsleistung von Kläranlagen durch Einhaltung von Grenzwerten der peruanischen Abwasserverordnung für die Einleitung von Abwässern in Vorfluter

4.4.5 Modellierung von Endverbrauchern

Wasser- und Strombedarf der Privathaushalte

Auf der Grundlage des in Abschnitt 3.8.1 dargestellten Konzepts zur Modellierung von Endverbrauchern wurden der Wasser- und Strombedarf der Privathaushalte von Lima für den Zeitraum von 2007 bis 2013 (Ist-Zustand) modelliert. Bei der Modellierung des Verbrauchsverhaltens der Bevölkerung und des damit verbundenen Wasserbedarfs wurden die verschiedenen Wasserversorgungsformen aus Tabelle 16 berücksichtigt. Für die Projektion der in jedem Stadtbezirk von Lima an das Trinkwassernetz angeschlossenen Bevölkerung wurde das mittlere Bevölkerungsszenario aus [89] für den Zeitraum von 2008 bis 2013 verwendet. Zur Modellierung der Wasser-, Abwasser- und Energieströme wurden monatliche Daten von Haushalts- und Bevölkerungszahlen verwendet. Die Projektionen sind in Tabelle A 17,

Tabelle A 18, Tabelle A 19, Tabelle A 20 und Tabelle A 21 (Abschnitt 6.1) dargestellt. Für die an die anderen Wasserversorgungsformen (Tankwagen, direkte Einnahme aus Flüssen, öffentliche Trinkwassernetzanschlüsse und private Grundwasserbrunnen) angeschlossenen Verbraucher und Haushalte wurden die Daten von 2007 konstant für die Folgejahre angesetzt. Zusätzlich wurden die Geräteausstattungen der Privathaushalte, wie z. B. Waschmaschinen, in jedem Stadtbezirk (Tabelle 17) und die spezifischen Wasserverbräuche je nach Wasserversorgungsform berücksichtigt. Die einzelnen Wasserverbräuche basieren auf vor Ort erhobenen Informationen [129], auf Literaturwerten [130] sowie in Einzelfällen auf eigenen Annahmen. Für diese Untersuchung wurde ein durchschnittlicher Wasserverbrauch von 153 Liter pro Person und Tag als Referenzwert betrachtet. Der gesamte Wasserverbrauch ergibt sich aus der Summe der Nutzungsanteile (Trinken, Kochen, Körperpflege, Handwäsche, Kleiderwäsche und Toilettenspülung). Tabelle 16 zeigt die einzelnen Wasserverbräuche je nach Wasserversorgungsform für Lima. Die personenbezogenen Wasserverbräuche reichen je nach Wasserversorgungsform von 27 l/d bis zu 178 l/d. Wie aus Tabelle 16 ersichtlich wird, ergeben sich fünf relevante Wasserverbrauchswerte für die an das Trinkwassernetz angeschlossenen Haushalte. Diese Werte weichen je nach der Haushaltsausstattung vom Referenzwert 153 l/p/d ab. Verfügt zum Beispiel ein an das Trinkwassernetz angeschlossener Haushalt über eine Waschmaschine, dann verbraucht dieser Haushalt 24 Liter weniger Wasser pro Tag im Vergleich zu einem Haushalt ohne Waschmaschine. Der Wasserverbrauch in Lima unterliegt saisonalen Schwankungen, im Sommer ist der persönliche Bedarf höher. In diesem Zusammenhang wurden für die Haushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz für den Zeitraum von Dezember bis Ende April (Sommersaison) höhere Wasserverbräuche zur Körperpflege angesetzt. Daraus ergibt sich für die Sommersaison ein im Vergleich zum Rest des Jahres um durchschnittlich 13 l/p/d höherer Wasserverbrauch. Da keine Information über die saisonalen Schwankungen des Wasserverbrauchs zur Verfügung stand, wurden die Werte für die Sommersaison anhand der Entnahmen aus dem Rimac abgeschätzt. Der Wasserverbrauch der Privathaushalte mit Zugang zu anderen Wasserversorgungsformen wurde im Jahresverlauf auf konstanten Werten belassen.

Tabelle 16: Nutzungsanteile des Wasserverbrauchs (2007–2030)

Aufteilung [l/p/d]	Wasserversorgungsform				
	TWN	PGW	OTA	TWA	OGW
Trinken (a)¹	2	2	2	2	2
Kochen (b)²	6	6	6	6	6
Speisezubereitung ⁺	2	2	2	2	2
Waschen und Geschirrspülen	4	4	4	4	4
Körperpflege (Baden + Waschbecken)³					
mit Warmwasser (c)	65 ^{*/50**}	-	-	-	-
mit Kaltwasser (d)	40 ^{*/30**}	20	20	15	15
Wäschewaschen (WW)					
mit Waschmaschine (e)	36 ^{4a}	-	-	-	-
Manuelle Wäsche (f)	60 ^{4b}	12 ^{4c}	12 ^{4c}	8 ^{4d}	4 ^{4e}
Toilettenspülung					
Anschluss Wassernetz (g)	45 ^{5a}	-	-	-	-
Spülung mit Eimer (h)	20 ^{5b}	20 ^{5b}	20 ^{5b}	-	-
Gesamter Wasserverbrauch	60	60	31	27	
(a)+(b)+(c)+(e)+(g)	154 ^{*/139**}	-	-	-	-
(a)+(b)+(c)+(f)+(g)	178 ^{*/163**}	-	-	-	-
(a)+(b)+(d)+(f)+(g)	153 ^{*/143**}	-	-	-	-
(a)+(b)+(c)+(f)+(h)	153 ^{*/138**}	-	-	-	-
(a)+(b)+(d)+(f)+(h)	128 ^{*/118**}	-	-	-	-
Durchschnitt	153^{*/140**}	-	-	-	-

TWN: Trinkwassernetz; PGW: private Grundwasserbrunnen; OTA: öffentliche Trinkwasseranschlüsse;

TWA: Tankwagen; OGW: Oberflächengewässer; * Wasserverbrauch während der Sommersaison;

** Wasserverbrauch während der restlichen Jahreszeiten; ¹ [130]; ² [130]; + eigene Annahme: hier werden 2 l/p/d für die Zubereitung von Speisen verwendet, der Rest wird während des Kochens (z. B. Geschirrspülen, Waschen) verwendet; ³ eigene Annahme; [130] ^{4a} [129]: ausgehend von einem Wasserverbrauch von 90 l/h, einem Verbrauch von 1,5 h/d und einer Nutzung von 8 d/p/Monat; ^{4b} [129]: ausgehend von einem Wasserverbrauch von 150 l/h, einem Verbrauch von 1,5 h/d und 8 Wäschenv/p/Monat; ^{4c} eigene Annahme, der Wert wurde ausgehend von einem Wasserverbrauch von 90 l/h, 1 h/d und 4 Wäschenv/p/Monat berechnet; ^{4d} eigene Annahme ausgehend von einem Wasserverbrauch von 75 l/h, 1 h/d und 4 Wäschenv/p/Monat; ^{4e} eigene Annahme ausgehend von einem Wasserverbrauch von 30 l/h, 1 h/d und 4 Wäschenv/p/Monat; ^{5a} geschätzter Wasserverbrauch ausgehend von einem Wasserverbrauch von 9 l/Spülung und 5 Toilettenspülungen/p/d; ^{5b} geschätzter Wasserverbrauch ausgehend von einem Wasserverbrauch von 4 l/Spülung und 5 Toilettenspülungen/p/d

Wäschenv/p/Monat; ^{4c} eigene Annahme, der Wert wurde ausgehend von einem Wasserverbrauch von 90 l/h, 1 h/d und 4 Wäschenv/p/Monat berechnet; ^{4d} eigene Annahme ausgehend von einem Wasserverbrauch von 75 l/h, 1 h/d und 4 Wäschenv/p/Monat; ^{4e} eigene Annahme ausgehend von einem Wasserverbrauch von 30 l/h, 1 h/d und 4 Wäschenv/p/Monat; ^{5a} geschätzter Wasserverbrauch ausgehend von einem Wasserverbrauch von 9 l/Spülung und 5 Toilettenspülungen/p/d; ^{5b} geschätzter Wasserverbrauch ausgehend von einem Wasserverbrauch von 4 l/Spülung und 5 Toilettenspülungen/p/d

Bild 44 zeigt das Modell der Privathaushalte von Lima, bestehend aus verschiedenen Wasserver- und Abwasserentsorgungsformen. Das Modell zeigt auch die Nicht-Haushalten sowie die Stromversorgung durch das Stromnetz.

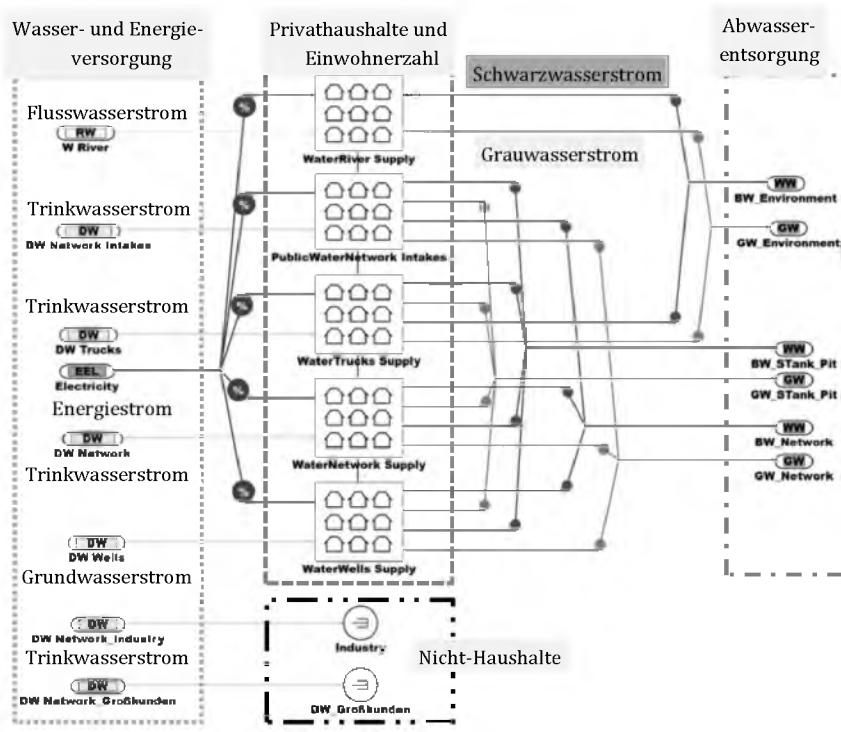


Bild 44: Wasserversorgungs-, Abwasserentsorgungsformen und Stromversorgung der Bevölkerung und Haushalte von Lima

„W River“: Wasserversorgung durch Oberflächengewässer; „TW Network_ Intakes“: Wasserversorgung durch öffentliche Trinkwasseranschlüsse; „TW Trucks“: Wasserversorgung durch Tankwagen; „TW Network“: Wasserversorgung durch Trinkwassernetz (mit Haushaltanschluss); „TW Wells“: Wasserversorgung durch private Grundwasserbrunnen; „WW River“ und „GW River“: Schwarz- bzw. Grauwasserentsorgung durch Oberflächengewässer; „WW STank_Pit“ und „GW STank_Pit“: Schwarz- bzw. Grauwasserentsorgung durch Sickergrube; „WW Environment“ und „GW Environment“: direkte Einleitung des Schwarz- bzw. Grauwassers in die Umwelt ohne Behandlung und zusätzlich zu der Abwasserentsorgung durch Oberflächengewässer; „WW Network“ und „GW Network“: Schwarz- bzw. Grauwasserentsorgung durch die Kanalisation

Der Stromverbrauch der Bevölkerung steht, wie beim Wasser, in direkten Zusammenhang mit der Ausstattung der Haushalte und den Nutzungsgewohnheiten der Bevölkerung. Tabelle 17 zeigt die Ausstattung mit Haushalts- und Elektrogeräten in jedem Stadtbezirk von Lima. Auf der Grundlage von Informationen [131] zu Haushalts- und Elektrogeräten je nach Sozialschicht konnten weitere elektrische Geräte, wie z. B. Beleuchtung, Mikrowelle, Herd und elektrische Warmwassertherme, und deren spezifische Verbräuche in die Betrachtung mit aufgenommen werden (siehe Tabelle A 22, Abschnitt 6.1).

Tabelle 17: Ausstattung der Privathaushalte von Lima (Jahr 2007)

Bezirke	Anzahl von Privathaushalten					
	Radio	Fernseher	Stereo	Waschmaschine	Kühlschrank	Computer
Lima Nord	329.313	384.401	197.470	119.223	257.502	95.489
Lima Ost	345.827	387.325	191.779	100.674	233.848	98.071
Lima Mitte	411.301	452.953	317.024	271.771	378.588	235.597
Lima Süd	250.090	281.229	134.204	73.769	174.725	58.020
Provinz Callao	144.226	171.176	97.338	68.139	115.304	42.640

Quelle: [87]

Aus der Betrachtung der verschiedenen Wasserversorgungsformen, wie z. B. Trinkwassernetz, Tankwagen, private Grundwasserbrunnen (vgl. Tabelle 9), und den dementsprechenden Wasserverbräuchen (vgl. Tabelle 16) sowie der Ausstattung der Haushalte ergibt sich als Resultat ein detailliertes Verbrauchermodell. Es setzt sich aus fünf Submodellen zusammen, die jeweils eine der in Bild 44 dargestellten fünf Wasserversorgungsformen repräsentieren. Bild 45 zeigt beispielhaft die Submodelle für Haushalte, die durch das Trinkwassernetz und durch Tankwagen mit Wasser versorgt werden. Die in Bild 45 dargestellten Submodelle verweisen deutlich auf eine unterschiedliche gerätetechnische Ausstattung der Privathaushalte je nach Bevölkerungsgruppe und Wasserversorgungsform.

Die Verbrauchermodelle bilden die Grundlage für die Quantifizierung des Wasser- und Stromverbrauchs und des Abwasseranfalls der Bevölkerung. Einerseits erlauben die Verbrauchermodelle die Abbildung der einzelnen Wasserverbräuche (z. B. bei der Körperpflege) und die Quantifizierung der damit verbundenen Wasser- und Abwasserströme (z. B. der Abwasseranfall bei Toilettenspülung). Darüber hinaus können durch die Verbrauchermodelle der Stromverbrauch von Haushalts- und Elektrogeräten abgebildet und die einzelnen Energieströme geschätzt werden. Andererseits lassen sich auf Haushaltsniveau die Zusammenhänge zwischen dem Wasser- und Energiesektor (z. B. Stromverbrauch beim Wäschewaschen) abbilden und quantifizieren. Darauf aufbauend ist es möglich, die Wasser-, Abwasser- und Energieströme auf makroskopischer Ebene (sektorale und transsektorale Infrastrukturen) zu quantifizieren.

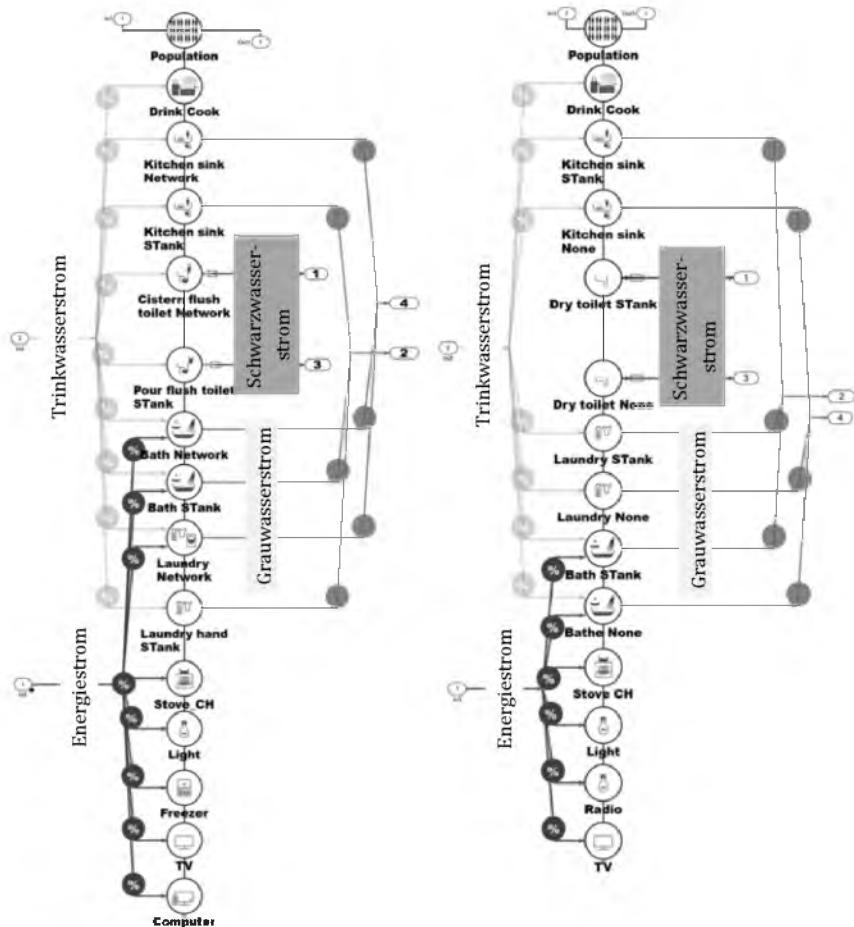


Bild 45: Submodelle der gerätetechnischen Ausstattung (Kontaktpunkte) der Haushalte mit Zugang zum Trinkwassernetz (links) und zu Tankwagen (rechts)

Wasserbedarf der Gewerbe in Lima und von Landwirtschaft und Gewerbe im Einzugsgebiet des Flusses Rimac

Der gewerbliche Wasserbedarf in Lima wurde mittels einfacher Modellansätze (Abschnitt 3.5) und auf der Grundlage von Daten aus der Abrechnungsabteilung des Wasserunternehmens modelliert. Es handelt sich um Daten und Informationen in Rechnung gestellter monatlicher Trinkwasservolumen für den Zeitraum von 2007 bis 2013. Die verwendeten Daten sind in Tabelle A 28 (Abschnitt 6.1) dargestellt.

Der Wasserbedarf landwirtschaftlicher und gewerblicher Flächen außerhalb der Stadt wurde auf der Grundlage von Monatsmittelwerten über den Wasserverbrauch für das Jahr 2004 bzw. 2010 geschätzt. Die Daten entstammen dem peruanischen Landwirtschaftsministerium und sind in Tabelle A 12 bzw. Tabelle A 13 (Abschnitt 6.1) dargestellt. Für die Modellierung wurde angenommen, dass der Wasserbedarf von Gewerbe und Landwirtschaft im Untersuchungszeitraum (2007–2030) konstant bleibt.

4.4.6 Stromversorgung und Stromverbrauch

Für die Stromversorgung von Lima und der zugeordneten Provinzen sind die beiden privaten Energieversorgungsunternehmen EDEL NOR S.A. und Luz del Sur verantwortlich. EDEL NOR S.A. versorgt die nördlichen Stadtteile und Luz del Sur die südlichen. Nach Angaben von [87] haben 96 % der Einwohner (8,1 Mio. EW) von Lima Zugang zum Stromversorgungsnetz. Der Wert variiert je nach Stadtgebiet (Tabelle 18).

Tabelle 18: Anschlussgrad an das Stromverteilungsnetz in Lima

Bezirk	Gesamte Einwohnerzahl	Zugang zum Stromverteilungsnetz	
		Angeschlossene EW	Anschlussgrad [%]
Lima Nord	2.075.446	2.006.057	96,7
Lima Ost	2.084.289	1.963.329	94,2
Lima Mitte	1.810.591	1.799.061	99,4
Lima Süd	1.560.907	1.453.997	93,2
Provinz Callao	869.536	829.581	95,4

Quelle: [87]

Der durchschnittliche jährliche Stromverbrauch pro Person in Lima ist im Zeitraum von 2000 bis 2004 um 5,3 % von 957 kWh auf 1.008 kWh gestiegen (vgl. [88]). Bei Betrachtung der einzelnen sozialen Schichten ist festzustellen, dass der personenbezogene Stromverbrauch erheblich variiert (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Stromnachfrage der Privathaushalte nach sozialer Schicht in Lima

Sozialschicht	Stromverbrauch
	[kWh/Haushalt/Monat]
A	1.050
B	498
C	278
D	130
E	53
Durchschnitt	402

Quelle: [131]

Nach Angaben von [87] leben im Durchschnitt in Lima vier Personen pro Haushalt. Daraus ergibt sich aus dem durchschnittlichen Stromverbrauch pro Haushalt und Monat ein durchschnittlicher Stromverbrauch pro Kopf von 2,8 kWh/d.

4.4.7 Modellierung der häuslichen Abwasserströme auf Stadtbezirksebene

Für die Quantifizierung der aus den Haushalten anfallenden Abwässer wurden die Trinkwasserverbräuche der an die verschiedenen Wasserversorgungsformen angeschlossenen Bevölkerungsteile zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 16 und Bild 44).

Tabelle 20: Abgeschätzte Anteile des Abwasserstroms je nach Wasserversorgungsform

Aufteilung [l/p/d]	Wasserversorgungsform				
	TWN	PGW	OTA	TWA	OGW
Kochen (b)					
Waschen und Geschirrspülen	4	4	4	4	4
Körperpflege (Baden + Waschbecken)					
Warmwasser (c)	65*/50**	-	-	-	-
Kaltwasser (d)	40*/30**	20	20	15	15
Wäschewaschen					
Waschmaschine (e)	36	-	-	-	-
Manuelle Wäsche (f)	60	12	12	8	4
Toilettenspülung					
Anschluss Wassernetz (g)	45	-	-	-	-
Spülung mit Eimer (h)	20	20	20	-	-
Urin und Fäzes					
Urin (i)	1,37 ^{a)}	1,37 ^{a)}	1,37 ^{a)}	1,37 ^{a)}	1,37 ^{a)}
Fäzes (j)	0,14 ^{a)}	0,14 ^{a)}	0,14 ^{a)}	0,14 ^{a)}	0,14 ^{a)}
Abwasserstrom	-	57,5	57,5	28,5	24,5
(b)+(c)+(e)+(g)+(i)+(j)	151,5*/136,5**	-	-	-	-
(b)+(c)+(f)+(g)+(i)+(j)	175,5*/160,5**	-	-	-	-
(b)+(d)+(f)+(g)+(i)+(j)	150,5*/140,5**	-	-	-	-
(b)+(c)+(f)+(h)+(i)+(j)	150,5*/135,5**	-	-	-	-
(b)+(d)+(f)+(h)+(i)+(j)	125,5*/115,5**	-	-	-	-
Durchschnitt	150,7*/137,7**	-	-	-	-

Quelle: ^{a)} [132]; TWN: Trinkwassernetz; PGW: private Grundwasserbrunnen; OTA: öffentliche Trinkwasseranschlüsse; TWA: Tankwagen; OGW: Oberflächengewässer

* Abwasseranfall während der Sommersaison; ** Abwasseranfall während der restlichen Jahreszeiten

Tabelle 20 zeigt die einzelnen Abwasserströme (Grau- und Schwarzwasser) je nach Wasserversorgungsform. Der geschätzte Abwasseranfall pro Kopf lag während des Untersuchungsraums (2007–2030) zwischen 24,5 l/d und 175,5 l/d. Auf der Grundlage der Daten und Annahmen produziert eine Person mit Anschluss an das Trinkwassernetz im Durchschnitt ca. 151 l/d Abwasser.

Das aus den Privathaushalten anfallende Abwasser wird in drei verschiedenen Formen entsorgt. Für die Zuteilung der anfallenden Abwasserströme in jeder Abwasserentsorgungsform ergab sich die Notwendigkeit, die direkten Verbindungen zwischen Wasserverbrauch und Abwasseranfall der Bevölkerung je nach Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsform zu quantifizieren. Ausgehend von den Gesamtzahlen der an den verschiedenen Wasserver- und Abwasserentsorgungsformen angeschlossenen Bevölkerung und Haushalte [87] wurde gemeinsam mit der Planungs- und Investitionsabteilung von SEDAPAL definiert, welche Bevölkerungsteile welche Abwasserentsorgungsformen verwenden. Bild A 1 (Abschnitt 6.1) gibt beispielhaft die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Wasserver- und Abwasserentsorgungsformen und die daran angeschlossene Bevölkerung von Lima-Mitte an.

Tabelle 21: Annahmen zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Wasserversorgung, Endverbraucher und Abwasserentsorgung

Wasserversorgungsformen	Abwasserentsorgungsformen	Entwässerungs-priorität	Abwasseranfall [i/p/d]
Trinkwassernetz	Kanalnetz	1	150,7*/137,7**
	Klär- und Sickergruben	2	
Private Grundwasserbrunnen	Kanalnetz	1	57,5
	Klär- und Sickergruben	2	
Offentliche Trinkwasseran-schlüsse	Kanalnetz	1	57,5
	Klär- und Sickergruben	2	
Tankwagen	Klär- und Sickergruben	1	28,5
	keine	2	
Fluss	keine	1	28,5

Quelle: eigene Annahme in persönlicher Absprache mit SEDAPAL; * mittlerer Abwasseranfall während der Sommersaison; ** mittlerer Abwasseranfall während der restlichen Jahreszeiten

Bild 46 zeigt ein Sankey-Diagramm des sektoralen Modells des Abwassersystems von Lima. Auf der linken Seite sind die Stadtbezirke von Lima dargestellt. Auf der rechten Seite sind die von den Haushaltkunden und Nicht-Haushaltkunden anfallenden Abwässer zu sehen. Für die Haushaltkunden wurde das Abwasser in Grau- und Schwarzwasser aufgeteilt und quantitativ bilanziert. Das Makromodell ist mit den detaillierten Verbrauchermodellen (vgl. Bild 44) gekoppelt. Die technische Kopplung beider Modelle erfolgt durch die Module „Callao“, „Lima-Nord“, „Lima-Mitte“, etc. Mittels dieser Module lassen sich wichtige Informationen (z. B. Wasserverbrauch, Anschlussgrad an Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen) zwischen den Verbrauchermodellen jeder Stadtbezirke und dem Makromodell übertragen. Damit lassen sich Kapazitäten natürlicher Ressourcen und Infrastrukturen auf Makro- und Prozessebene integriert bewirtschaften und wichtige Informationen (z. B. Auslastung und Zustände von Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen, Deckung von Bedarf) über die Zeit ableiten.

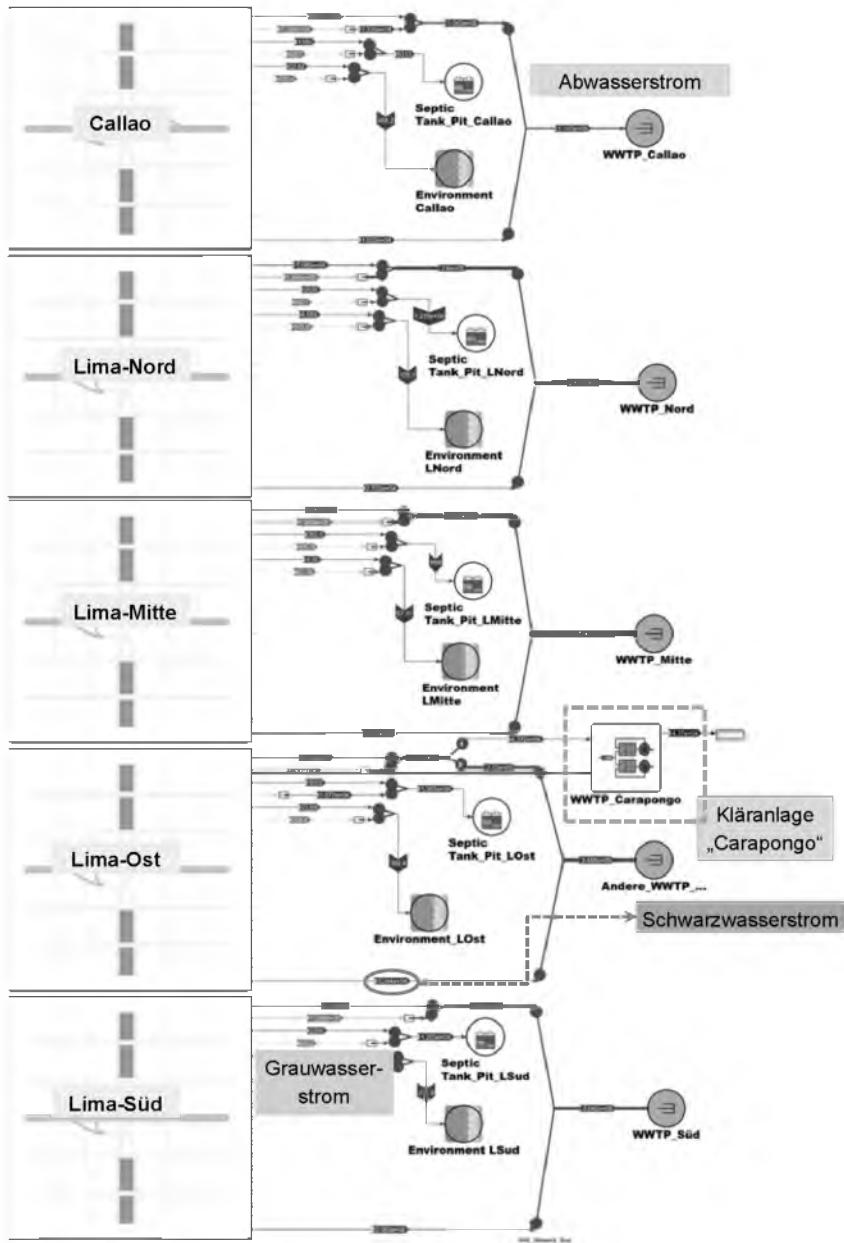


Bild 46: Makromodell des Abwassersystems von Lima

Charakterisierung des häuslichen Abwassers in Lima

Die definierten Schmutzstoffe und deren Fraktionen in den Grau- und Schwarzwasserströmen in Lima wurden auf der Basis von [74] und [75] (Abschnitt 6.2), von Literaturwerten aus [77], [133] und [132] sowie eigener Annahmen quantifiziert. Tabelle 22 stellt die Frachten pro Einwohner und Tag in den einzelnen Grau- und Schwarzwasserströme (Urin und Fäzes) dar.

Tabelle 22: Parametrierung des häuslichen Grau- und Schwarzwasserstroms

Parameter/Einheit	UR	FA	BT+WB	KS	WW	Gesamt
Volumenstrom [l/p/d]	1,37 ^{a)}	0,14 ^{a)}		Siehe Tabelle 20	Siehe Tabelle 20	24,5-175,5 (Tabelle 20)
CSB [g CSB/p/d]	10,00 ^{a)}	60,00 ^{a)}		4,51 ^{b)}	2,58 ^{c)}	22,50 ^{b)} 100,00
TSS [g TSS/p/d]	11,0 ^{a)}	21,00 ^{a)}		1,53 ^{b)}	3,16 ^{b)}	3,16 ^{b)} 39,85
VSS [g VSS/p/d]	7,00 ^{a)}	18,00 ^{a)}		1,49 ^{b)}	2,78 ^{b)}	1,79 ^{b)} 31,10
N [g N/p/d]	3,60 ^{a)}	0,25 ^{a)}				
IN [g IN/p/d]	-	-		0,02 ^{b)}	0,02 ^{c) +}	0,08 ^{b)}
P [g P/p/d]	0,40 ^{a)}	0,30 ^{a)}				
IP [g IP/p/d]	-	-		0,01 ^{d)}	0,05 ^{c) ++}	0,28 ^{d)}
C [g C/p/d]	4,30 ^{e)}	3,50 ^{e)}		-	-	-
IC [g IC/p/d]	-	-		0,57 ^{h)}	0,57 ^{h)}	0,57 ^{h)}
CSB Faktoren						
fSS [g CSB/g CSBs]	0,95 ^{h)}	0,95 ^{h)}		0,20 ^{h)}	0,20 ^{h)}	0,20 ^{h)}
fXS [g CSB/g CSBx]	0,90 ^{h)}	0,90 ^{h)}		0,54 ^{h)}	0,34 ^{h)}	0,34 ^{h)}
fXB [g CSB/g CSBx]	0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}		0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}

UR: Urin; FA: Fäzes; BT: Baden; WB: Waschbecken; KS: Küche; WW: Wäschewaschen; CSB: chemischer Sauerstoffbedarf; TSS: Trockensubstanz, VSS: organische Trockensubstanz; N: Gesamtstickstoff; IN: gesamter anorganischer Stickstoff; P: Gesamtphosphor; IP: gesamter anorganischer Phosphor; C: Gesamtkohlenstoff; IC: gesamter anorganischer Kohlenstoff; fSS: CSB Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB; CSBs: gelöster CSB; fXS: CSB Aufteilungsfaktor zum partikulären CSB; CSBx: partikulärer CSB; fXB: CSB Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB; Quelle: a) [132]; b) [77]; c)+ selbst berechnet auf der Grundlage der in [77] gegebenen Literaturwerte; der Wert ergibt sich aus dem Produkt der CSB-Konzentration von 644 mg/l und dem Wasserverbrauch von 4 l/p/d; c)++ der Wert ergibt sich aus dem Produkt der CSB-Konzentration von 13 mg/l und dem Wasserverbrauch von 4 l/p/d; d) eigene Annahmen auf der Grundlage von [77]; e) [133]; h) [75]; [74]

Mittels der qualitativen und quantitativen Bestimmung der in den Privathaushalten anfallenden Abwasserströme lassen sich die Zulauffrachten in der exemplarisch gewählten Kläranlage von Lima bestimmen. Volumen- und Stoffströme werden dann mittels etablierter Prozessmodelle (vgl. Abschnitt 3.8.2 und Bild A 2, Abschnitt 6.1) bilanziert. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen varierender technischer, betrieblicher und demographischer Randbedingungen auf den Systemzustand und die Reinigungsleistung der exemplarisch gewählten Kläranlage ermittelt. Es muss darauf

hingewiesen werden, dass aufgrund der Datenverfügbarkeit die Kläranlage „Carapongo“ (Lima-Ost) (siehe Bild 46) in dieser Arbeit exemplarisch ausgewählt wurde. Hier wurden die anderen bestehenden Kläranlagen in Lima (siehe Tabelle A 15) vernachlässigt. Ein weiterer Grund war, dass diese Anlage nur häusliche Abwässer behandelt. Damit kann die Anlage mittels der aus den Verbrauchermodellen bilanzierten Abwasserströme modelliert werden.

4.4.8 Modellierung der Abwasserströme der Nicht-Haushalte auf regionaler Ebene in Lima

Zur quantitativen Bilanzierung der von den Nicht-Haushalten anfallenden Abwässer wurden die in Rechnung gestellten Wasservolumina (vgl. Tabelle A 28, Abschnitt 6.1) und ein Faktor 0,85 (vgl. [130]) berücksichtigt. Das anfallende Abwasser resultiert aus der Multiplikation des Trinkwasserverbrauchs mit dem Faktor 0,85.

Neben dem berechneten Abwasserstrom der Privathaushalte und Nicht-Haushalte wurde das Fremdwasser grob abgeschätzt. Fremdwasser kann aus unterschiedlichen Quellen herrühren. Grund- und Sickerwasser kann beispielsweise durch un dichte Kanäle und Bauwerke in die Kanalisation gelangen. Die aus Grund- und Sickerwasser resultierende Fremdwassermenge wurde abgeschätzt. Unter Berücksichtigung des Grundwasserstandes (niedriger, hoher Grundwasserspiegel) und der Materialart der Rohre lieferte [130] grobe Abschätzungen über mögliche Infiltrationsraten von Fremdwasser. Die Werte reichen von 0,05 l/s/km bis 0,80 l/s/km. Ausgehend von einem niedrigen Grundwasserspiegel und der Materialart (Zement) des Kanalisationssystems wurde für Lima eine Infiltrationsrate von 0,20 l/s/km gewählt. Für die Berechnung des Fremdwasserabflusses wurde die Gesamtlänge des Kanalnetzes (Tabelle 23) betrachtet. Der Fremdwasserabfluss resultiert aus der Multiplikation der Länge des Kanalnetzes mit der Infiltrationsrate (Tabelle B 1, Abschnitt 6.2).

Tabelle 23: Daten für die Quantifizierung des Fremdwasserabflusses

Daten	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Infiltrationsrate [l/s/km]*	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamtlänge des Kanalnetzes [km]**	9.666,0	10.131,0	10.553,0	11.245,0	11.504,0	11.987,0	12.244,0

Quelle: * [130]; ** [94]; [101]

4.4.9 Modellierung von Quellen: natürliche Ressourcen und Infrastrukturen

Das Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Rimac

Zur Modellierung des Talsperrensystems im Einzugsgebiet des Rimac wurden die in Abschnitt 3.8.2 dargestellten Prozessmodelle verwendet. Für die Modellierung des Ist-Zustands standen Monatsmittelwerte der gespeicherten Volumen (Tabelle A 34, Abschnitt 6.1), der natürlichen Zuläufe (Tabelle A 35), der Niederschläge (Tabelle A 36) und der Verdunstungsraten (Tabelle A 37) für den Zeitraum von 2007 bis 2013 sowie H-V-Kurven (Wasserstand-Volumen-Verhältnisse) zur Verfügung. Die Daten wurden vom Energieunternehmen EDEGEL bereitgestellt.

Zur Berechnung der maximalen Wasserabgaben aus jedem Speicher zu jedem Zeitpunkt wurden Informationen über den Wasserstand in jedem Speicher sowie die Öffnungsweite und Breite von Schiebern berücksichtigt. Die ermittelten maximalen Wasserabgaben wurden dann für die Regelung der Wasserabgaben aus den Speichern berücksichtigt.

Zur Regelung der Wasserabgabe aus jedem Einzelspeicher wurde der in Abschnitt 3.9 dargestellte Regelungsansatz implementiert. Die Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem wurden in Zusammenhang mit den aus dem detaillierten Verbrauchermodell (Abschnitt 4.4.5) resultierenden variierten Wasserbedarfen der Privathaushalte von Lima sowie mit dem Wasserbedarf von Gewerbe und Landwirtschaft innerhalb und außerhalb der Stadt geregelt. Weitere Informationen waren die maximale Entnahmekapazität der Wasserwerke „La Atarjea“ und „Huachipa“, um die Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem sowohl auf die Wasserbedarfe als auch auf die Infrastrukturkapazitäten zu beschränken. Hier wurde das Modell des Talsperrensystems (Bild 47) mit dem detaillierten Verbrauchermodell (Bild 45) und dem transsektoralen Modell des Wasser- und Energiesystems der Stadt (Bild 50) gekoppelt. Dies ermöglicht eine integrierte Berücksichtigung variiender Bedarfe und Kapazitäten natürlicher Ressourcen und Infrastrukturen.

Neben den technischen Randbedingungen spielen die hydrologischen Bedingungen eine wesentliche Rolle bei der kurz- und mittelfristigen Wasserbewirtschaftung aus dem Talsperrensystem. Dabei gilt es, am Ende der Entleerungsperiode (Ende November), für normale und feuchte Abflussjahre ein Restvolumen von 140 Mio. m³ und für trockene Abflussjahre von 70 bis 80 Mio. m³ zurückzuhalten (vgl. [103]). Um trockene und feuchte Abflussjahre bestimmen zu können, wurde ein Referenzvolumen definiert, mit dem sich normale von trockenen Abflussjahren unterscheiden lassen. Das Referenzvolumen wurde mit 195 Mio.m³ festgelegt und entspricht 59 % der nutzbaren Speicherkapazität des Systems (331 Mio.m³). In diesem Kontext wird das

Gesamtvolumen am Ende der Regenzeit (Ende April) gemessen und das Abflussjahr bestimmt. Bei feuchten Abflussjahren wird der Regelungsansatz das System so regeln, dass der Wasserbedarf zu 100 % gedeckt wird. Bei trockenen Abflussjahren werden die Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem auf ca. 91 % der maximalen Entnahmekapazität der Anlagen „La Atarjea“ und „Huachipa“ reduziert, um das Reservevolumen zu erreichen. Der Wert entspricht dem mittleren entnommenen Abfluss aus dem Rimac in der Anlage „La Atarjea“ ($17,2 \text{ m}^3/\text{s}$) für den Zeitraum von 2007 bis 2012 geteilt durch deren maximale Entnahmekapazität ($18,8 \text{ m}^3/\text{s}$). Der Wasserbedarf von Landwirtschaft und Gewerbe wird jederzeit zu 100 % gedeckt. Die entsprechenden Wasserbedarfe werden dann an den Regelungsalgorithmus übergeben.

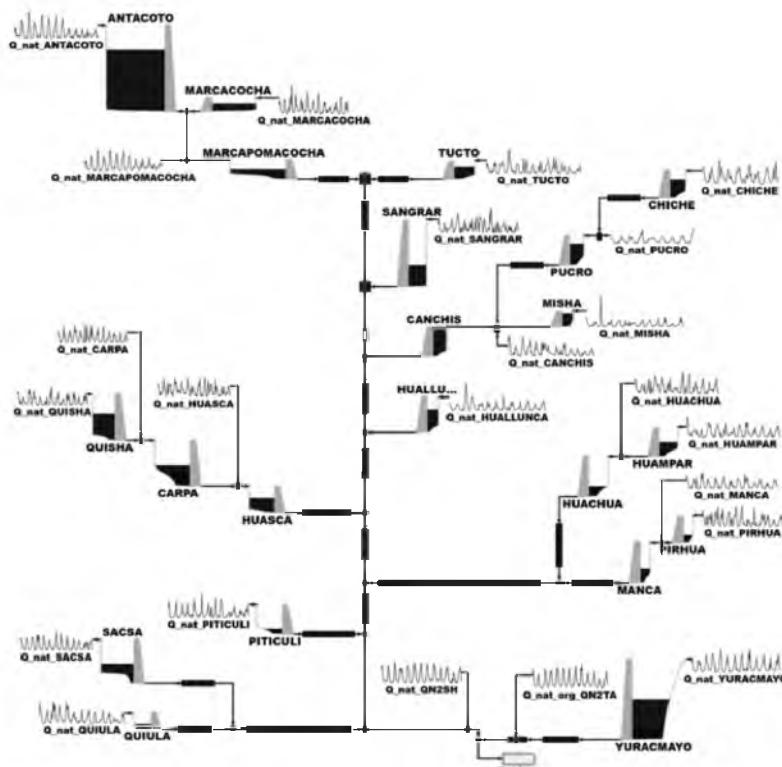


Bild 47: Detailliertes Modell des Talsperrensystems im Einzugsgebiet des Rimac (ohne Entnahmen für Energie, Landwirtschaft, Industrie und Haushalte)
 Quelle: [68]; $Q_{\text{nat}} \dots$: Natürlicher Zulauf

Die regulierten natürlichen Abflüsse ergänzen die Wasserabgabe aus den Talsperren für die Deckung der Wasserbedarfe. Bei der Regelung der Wasserabgaben werden

die von EDEGEL ermittelten Monatsmittelwerte der unbeeinflussten Abflüsse an den Pegeln „Sheque“ und „Tamboraque“ verwendet. Die Pegelanlagen liegen im oberen Einzugsgebiet des Rimac in einer Höhe von ca. 4.000 m.ü.d.M. Bild 48 zeigt ein gestapeltes Flächendiagramm der an den Pegeln gemessenen Abflüsse. Es ist anzumerken, dass das Einzugsgebiet des Rimac ein homogenes Abflussverhalten hat, in dem die Abflüsse von Dezember bis Februar steigen und von März bis November abnehmen. Aus der gesamten Zeitreihe kann man deutlich erkennen, dass August, September und Oktober die Monate mit den geringsten Niederschlägen darstellen.

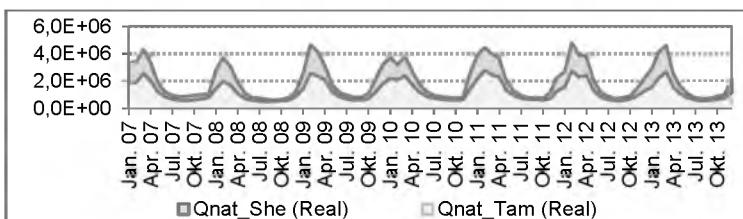


Bild 48: Monatsmittelwerte über den unbeeinflussten Abfluss an den Pegeln „Sheque“ und „Tamboraque“ in [m³/d]

Quelle: EDEGEL

Die Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac

Die fünf Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac wurden mittels einfacher Prinzipien der Modellierung von Quellen modelliert (Abschnitt 3.4). Hier wurden Informationen über die maximale Durchflusskapazität, die durchschnittliche Leistung und den Leistungsfaktor der Wasserkraftwerke (Tabelle 11) verwendet.

Zur Bewirtschaftung der Wasserkraftwerke wurde ein einfaches Steuerungskonzept implementiert. Es basiert auf dem Prinzip der gleichmäßigen Bewirtschaftung von Quellen (Abschnitt 3.7.3). Für die Steuerung wurden Informationen über den Strombedarf der privaten Haushalte und des urbanen Wassersystems sowie über die unregulierten natürlichen und regulierten Abflüsse aus dem Talsperrensystem verwendet. Diese Informationen wurden im Modell erfasst und an das Steuerungsmodul der Wasserkraftwerke weitergeleitet.

Der Fluss Rimac und die Wasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Huachipa“

Die modellierten Abflüsse des Rimac ergeben sich aus der Regelung der Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem, den unregulierten natürlichen Abflüssen und den Wasserbedarfen der verschiedenen Verbraucher. Die Anlagen wurden mittels einfacher Prinzipien der Bewirtschaftung gekoppelter Quellen modelliert (Abschnitt

3.4). Die maximalen Entnahmekapazitäten der Trinkwasseraufbereitungsanlagen wurden als technische Randbedingungen für die Modellierung der Wasserentnahmen aus dem Rimac berücksichtigt.

Der Fluss Chillón und die Wasseraufbereitungsanlage „Chillón“

Während der Regenzeit stellt das Wasserdargebot des Chillón eine weitere wichtige Wasserquelle für die Trinkwasserversorgung der Stadt, insbesondere der nördlichen Stadtteile, dar. Der Fluss Chillón und die Anlage „Chillón“ wurden ebenfalls mittels einfacher Modellansätze modelliert (siehe Abschnitt 3.4). Für die Modellierung des Wasserdargebotes des Flusses wurden Monatsmittelwerte über die gemessenen Abflüsse betrachtet und diese als maximales Wasserdargebot angenommen. Die Daten wurden vom Wasserunternehmen SEDAPAL bereitgestellt und sind in Tabelle A 38 (Abschnitt 6.1) zusammengestellt. Darüber hinaus wurden der Wasserbedarf von Lima-Nord und die maximale Kapazität der Anlage „Chillón“ (als technische Randbedingung) berücksichtigt. Die maximale Kapazität der Anlage beträgt 188.714 m³/d (2,2 m³/s) und entspricht dem maximalen real entnommenen Abfluss für den Zeitraum von 2007 bis 2013.

Modellierung der Grundwasserentnahmen

Grundwasserbrunnen und -infrastrukturen wurden auch mittels einfacher Prinzipien der Bewirtschaftung gekoppelter Quellen (Abschnitt 3.4) und auf der Grundlage von Daten über mittlere monatliche Wasserentnahmen aus den Grundwasserbrunnen für den Zeitraum von 2007 bis 2013 modelliert. Die Daten wurden vom Wasserunternehmen SEDAPAL bereitgestellt und sind in Tabelle A 29, Tabelle A 30, Tabelle A 31, Tabelle A 32 und Tabelle A 33 (Abschnitt 6.1) dargestellt. Um unbekannte betriebliche Randbedingungen bei der Modellierung der Wasserentnahmen berücksichtigen zu können, wurden die historischen Wasserentnahmen den maximalen Förderkapazitäten der Brunnen gleich gesetzt.

Modellierung einer der größten Kläranlagen Limas

Die Ziele der detaillierten Modellierung einer exemplarisch ausgewählten Kläranlage waren Untersuchung der zukünftigen Situation des Abwassermanagements und der Reinigungsleistung der Kläranlage „Carapongo“ (Lima-Ost) unter Szenarien des Klimawandels sowie der Entwicklung der Bevölkerung, des Trinkwasserverbrauchs und des Abwasseranfalls. Die Implementierung von Wassermanagementstrategien auf Verbraucherseite (z. B. Wassersparmaßnahmen) und des Angebotes (z. B. Erweiterung des Trinkwasserversorgungssystems) sowie externer Größen wie Wasserdargebot können den Trinkwasserverbrauch, und somit die Abwasserzusammensetzung und -reinigung, deutlich beeinflussen. In diesem Kontext spielen diese

Zusammenhänge eine wichtige Rolle bei der Untersuchung der zukünftigen Situation des Abwassermanagements der Stadt.

Die Kläranlage „Carapongo“ ist eine der fünf größten Kläranlagen der Stadt und hat einen Bemessungszulauf von 0,5 m³/s (43.200 m³/d) und eine BSB₅-Raumbelastung von 9500 kg BSB₅/d. Die Anlage besteht aus einem Rechen und Sandfang als mechanische Vorreinigung sowie aus einem anaeroben Abwasserteich mit einem Volumen von 78.750 m³, zwei voll belüfteten Abwasserteichen mit einem Volumen von jeweils 25.110 m³ und zwei partiell belüfteten Abwasserteichen mit einem Volumen von jeweils 23.490 m³. Vier Nachklärbecken mit einem Volumen von jeweils 5.880 m³ ergänzen die biologische Abwasserreinigung. Betriebliche Informationen über Zuläufe und Zulauffrachten zeigen jedoch, dass die Anlage teilweise hydraulisch überlastet war (Tabelle A 40, Abschnitt 6.1). Um die Belastung der Anlage zu reduzieren, wurden ab 2014 Teile des Zulaufstroms von „Carapongo“ zu der Kläranlage „Santa Clara“ abgeleitet. Seitdem werden entsprechend Angaben des Betriebspersonals zwischen 0,28 l/s und 0,35 l/s Abwasser in „Carapongo“ gereinigt.

Tabelle 24: Kenndaten der Kläranlage „Carapongo“

Reinigungsstufe	Bemessung (je Einheit)						Betriebsführung		
	n	H _T [m]	H _s [m]	B[m]	[ml/g]	[-]	BLA	Sauerstoff- zufuhr	Schlammabzug
							[mgO ₂ /l]	[m ³ /d]	SVI
Anaerober Abwasserteich	1	7,5 ^a	0,1 ^b	70,0	150,0	-	-	-	
Belüfteter Abwasserteich									
Voll gemischt	2	3,1	0,1	90,0	90,0	Jeweils 8 OFB	0,55		
Partiell gemischt	2	2,9	0,3	90,0	90,0	Jeweils 3 OFB	1,13		
Nachklärbecken	4	4,2 ^b	1,2	20	70	-	-	Durch Regelung*	5 ^b

Quelle: SEDAPAL; SUNASS; n: Anzahl; H_T: Tiefe; H_s: Schlammhöhe; B: Breite; L: Länge; BLA: Belüftungsaggregat; OFB: Oberflächenbelüftfer; SVI: Schlammvolumenindex; a: angenommene Werte nach [134]; b: eigene Annahme; *der Schlammanzug aus jedem Nachklärbecken wird in Zusammenhang mit dem Wasserstand der mittleren Schicht in jedem Nachklärbecken geregelt; der angenommene Sollwert des Wasserstands der mittleren Schicht beträgt 0,5 m und wird durch einen PI-Regler geregelt.

Zur Modellierung der Anlage wurden Monatsmittelwerte über die gemessenen Zuläufe von 2007 bis 2012 verwendet. Darüber hinaus wurden die Bemessungsparameter der verschiedenen Reinigungsstufen sowie betriebliche Informationen der Anlage (z. B. Sauerstoffkonzentration) berücksichtigt. Die Daten und Informationen wurden teilweise vom SEDAPAL bereitgestellt. Fehlende Informationen über die Anlage (z. B. Tiefe der Becken) wurden durch eigene Annahmen und Literaturquellen

ergänzt (Tabelle 24). Die Zulauffrachten resultieren aus der Parametrierung des Verbrauchermodells (Abschnitt 4.4.5 und Abschnitt 4.4.6). Wie bereits in Abschnitt 4.4.6 erwähnt, wurde eine CSB-Fracht von 100 g/p/d als Referenzwert verwendet (Tabelle 22, Abschnitt 4.4.6). Diese ergibt sich aus der Summe der einzelnen CBS-Frachten pro Einwohner und Tag in den einzelnen Grau- und Schwarzwasserströmen (z. B. beim Kochen, Duschen, Wäschewaschen). Die in die Kanalisation eingeleiteten Abwasserströme und Schmutzkonzentrationen weichen jedoch je nach Wasserversorgungsform und Ausstattung der Haushalte ab und reichen von 24,5 l/p/d bis hin zu 151 l/p/d.

Um die Anlage unter ähnlichen hydraulischen Randbedingungen wie in der Realität modellieren zu können, wurden die gemessenen Zuläufe von 2007 bis 2012 als maximale Zuläufe zur Anlage festgelegt. Der mittlere monatliche gemessene Zulauf lag zwischen $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$ ($34.733 \text{ m}^3/\text{d}$) und $0,52 \text{ m}^3/\text{s}$ ($44.582 \text{ m}^3/\text{d}$). Für die Plausibilitätskontrolle der Simulationsergebnisse wurden Monatsmittelwerte über CSB- und TSS- Konzentrationen im Zulauf und im Ablauf der Kläranlage von 2007 bis 2010 verwendet. Der Einfluss von Fremdwasser bei der Modellierung der Kläranlage wurde aufgrund fehlender Informationen nicht berücksichtigt.

Da in SIMBA# keine Module für anaerobe Abwasserteiche zur Verfügung stehen, wurde dieser Teil der realen Anlage mittels eines Drei-Schichten-Nachklärbecken-moduls abgebildet.

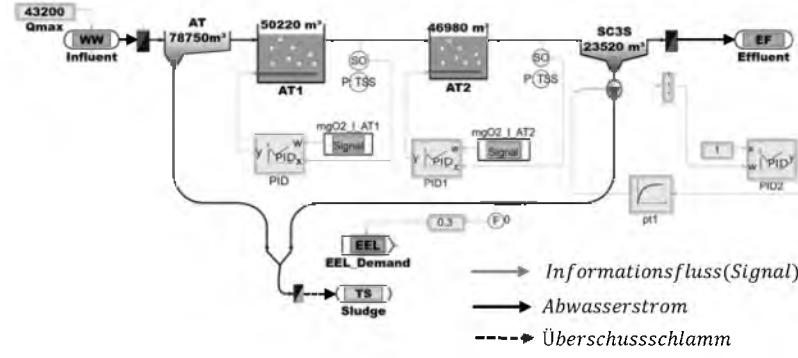


Bild 49: Modell der Kläranlage „Carapongo“ (Simba#)
AT: Anaerober Abwasserteich

Strombedarf des urbanen Wassersystems

Zur Modellierung des Strombedarfs der verschiedenen Komponenten des Trink- und Abwassersystems wurden Daten über den Stromverbrauch bei der Wasser-

gewinnung, der Trinkwasserproduktion, der Trinkwasserverteilung und der Abwasserentsorgung und -reinigung für die Jahre 2007 bis 2013 verwendet. Die Daten wurden vom Wasserunternehmen SEDAPAL bereitgestellt (vgl. [94], [100], [101]). Darauf aufbauend wurden verschiedene Verbrauchskoeffizienten berechnet, die die benötigte Strommenge pro Kubikmeter Wasser von jeder Komponente des Wassersystems wiederspiegeln. Die geschätzten Verbrauchskoeffizienten reichen von 0,0081 kWh/m³ bis zu 0,3934 kWh/m³ und sind in Tabelle A 23, Tabelle A 24, Tabelle A 25, Tabelle A 26 und Tabelle A 27 (Abschnitt 6.1) dargestellt.

4.4.10 Bewirtschaftung und Verteilung von Wasser- und Energiressourcen auf Stadtbezirksebene in Lima

Zur Bewirtschaftung von Quellen und Infrastrukturen und zur Verteilung von Wasser- und Energiressourcen zwischen Quellen und Senken wurden die in Abschnitt 3.7 dargestellten Konzepte zur Ressourcenbewirtschaftung und -verteilung eingesetzt. Wasserquellen wurden sowohl gleichmäßig als auch priorisiert bewirtschaftet. Energiequellen wurden priorisiert bewirtschaftet. Wasserressourcen wurden auf die verschiedenen Verbraucher (makroskopische Ebene) priorisiert verteilt (Bild 50). Demgegenüber wurden Wasser- und Energiressourcen auf die verschiedenen Aktivitäten der Privathaushalte (z. B. Wäschewaschen, Duschen, Beleuchtung) (Prozessebene) gleichmäßig verteilt. Darüber hinaus wurden die physikalischen Trinkwasserverluste in jedem Stadtbezirk von Lima auf der Grundlage der Daten des Wasserunternehmens (Tabelle A 39, Abschnitt 6.1) modelliert. Bild 50 stellt das abschließend resultierende transsektorale Modell für die Stadt Lima dar. Auf der linken Seite sind die Wasserquellen (Grundwasserbrunnen und Flüsse) und das Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Flusses Rimac sowie die Energiequellen dargestellt. In Mittelpunkt der Abbildung sind die verschiedenen Wasserversorgungsformen (z. B. Trinkwassernetz, Tankwagen) und Wasservolumenströme, wie zum Beispiel Flusswasserströme, Trinkwasserströme und Grundwasserströme sowie die Stromflüsse zu sehen. Die Abbildung zeigt die fünf Stadtbezirke von Lima (Callao (Provinz Callao), Lima-Nord, Lima-Ost, Lima-Mitte und Lima-Süd) und auf der rechten Seite die Abwasser-, Grauwasser- und Schwarzwasserströme. Mittels des transsektoralen Modells lassen sich die Wechselwirkungen und potenzielle Synergien zwischen Wasser- und Energiesystemen abbilden und quantifizieren bzw. identifizieren. Hier lassen sich zum einen die Energiebedarfe verschiedener Aktivitäten des Wasserver- und Abwasserentsorgungssystems bzw. die Wasserbedarfe des Energiesystems für die Stromproduktion durch Wasserkraft abschätzen. Zum anderen lassen sich die Wasser-, Abwasser-, und Energieströme in Lima sowohl auf Prozessebene (z. B. Endverbraucher, verfahrenstechnische Anlagen) als auch Makroebene (transsektorale Infrastrukturen) quantitativ und qualitativ bilanzieren.

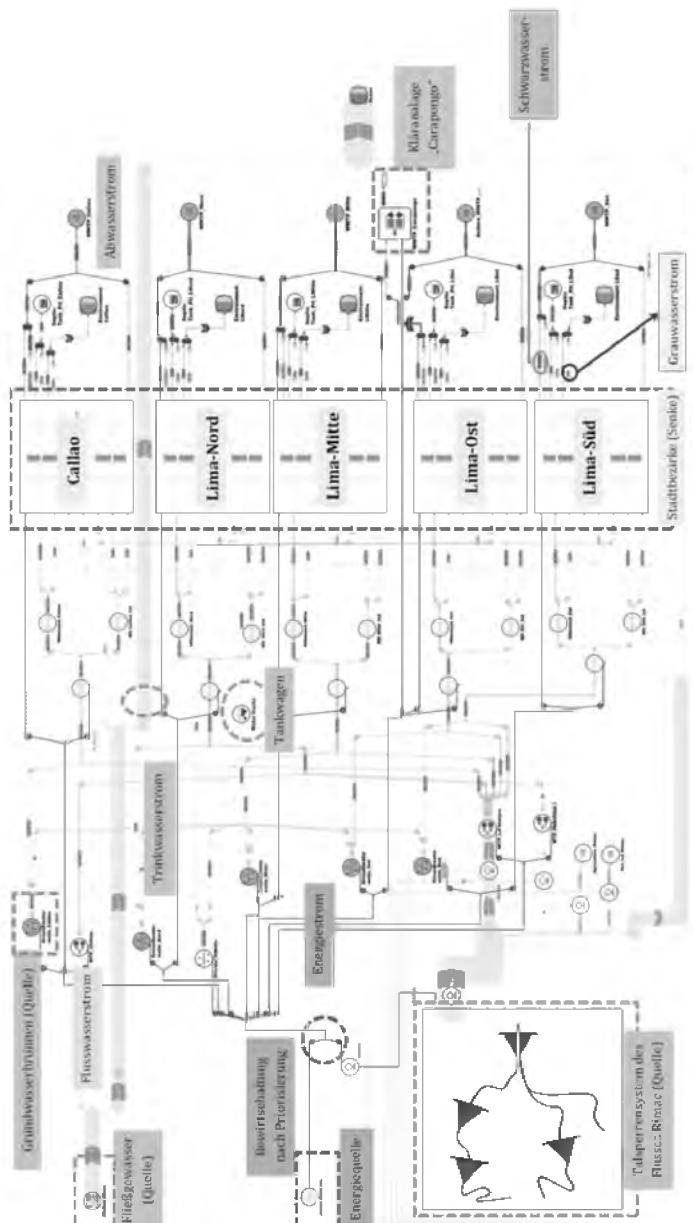


Bild 50: Transsektorales Modell des Wasser-, Abwasser-, und Stromversorgungssystems von Lima

4.5 Diskussion der Ergebnisse

4.5.1 Ist-Zustand (2007 – 2013)

Wasserbedarf und -verbrauch der Privathaushalte und Nicht-Haushalte

Mit Hilfe des transsektoralen Modells, einschließlich der detaillierten Verbrauchermodelle, wurden die Wasserbedarfe und -verbräuche sowie die Abwasseranfälle auf Stadtbezirksebene in Lima unter variierenden Randbedingungen und für unterschiedliche Szenarien geschätzt. Voraussetzung war, wie bei jeder Simulationsstudie, dass der Ist-Zustand des Systems hinreichend genau abgebildet werden kann. Im vorliegenden Fall betrifft dies einen Zeitraum von mehreren Jahren (2007 bis 2013) in Monatsschritten. Zur Validierung der Simulationsergebnisse bzgl. der Entwicklung der Trinkwasser- und Abwasserströme wurden die Schätzungen von [89] hinsichtlich der Bevölkerung, des Trinkwasserbedarfs und des Abwasseranfalls von Lima für den Zeitraum von 2007 bis 2013 sowie Messwerte über Trinkwasserproduktion und Abwasserströme des Wasserunternehmens SEDAPAL herangezogen.

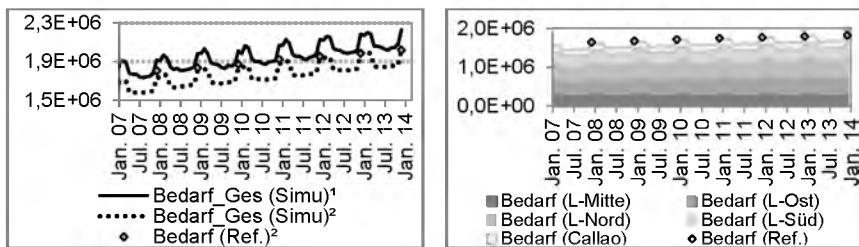


Bild 51: Gesamte (links) und häusliche Trinkwasserbedarfe (rechts) im Trinkwassernetz in [m³/d]

¹: Die Werte berücksichtigen den Wasserbedarf der Nicht-Haushalte; ²: die Werte betrachten nicht den Wasserbedarf der Nicht-Haushalte; Bedarf (Ref.): geschätzte Trinkwasserbedarfe von [89]; Lima-Mitte: Lima-Mitte; L-Nord: Lima-Nord; L-Ost: Lima-Ost; L-Süd: Lima-Süd

Bild 51 zeigt den Trinkwasserbedarf der Privathaushalte und Nicht-Haushalte. Die graue Marker und die schwarze Linien zeigen die von [89] geschätzten (Bedarf (Ref.)) bzw. simulierten (Bedarf_Ges (Simu)) Trinkwasserbedarfe. Hier ist zu beachten, dass die Referenzwerte aus [89] den Bedarf der Nicht-Haushalte nicht berücksichtigen. Die Schätzungen basieren auf den Daten der Volks- und Haushaltzählung des peruanischen Statistikamtes INEI aus dem Jahr 2007. Wird der Anteil der Nicht-Haushalte aus den simulierten Werten (schwarze durchgezogene Linie) heraus-

gerechnet, so ergeben sich die mittels der schwarz gestrichelten Linie dargestellten Bedarfe. Die Daten über den Anteil des Trinkwasserbedarfs der Großkunden wurden von SEDAPAL bereitgestellt. Bild 51 zeigt auch die Entwicklung des simulierten Trinkwasserbedarfs der Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz pro Stadtbezirk als gestapelte Flächen. Der Trinkwasserbedarf steigt aufgrund der Bevölkerungszunahme, insbesondere in den östlichen und nördlichen Stadtbezirken, von 1,6 Mio.m³/d im Januar 2007 auf 1,8 Mio.m³/d im Dezember 2013 an. Die Zunahmen von Dezember bis März basieren auf saisonale Schwankungen beim Wasserbedarf der Privathaushalte.

Für die übergeordnete Aufteilung von Wasserressourcen unter allen Nutzern der Stadt Lima wurde die Verteilung nach Priorisierung (Abschnitt 3.7.4) als Steuerungskonzept implementiert. Der Trinkwasserbedarf der Privathaushalte wurde mit der höchsten Priorität belegt. Bild 52 zeigt eine Gegenüberstellung der Nachfrage und des Angebots der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Zugang zum Trinkwassernetz. Der Bedarf der Privathaushalte kann während des Simulationszeitraums vollständig gedeckt werden. Da die Nicht-Haushalte die geringste Priorisierung bei der Trinkwasserverteilung haben, weisen sie ab 2011 deutliche Lücken zwischen Bedarf und Angebot auf. Die Ursache ist der zunehmende Bedarf der Privathaushalte. Die unbefriedigte Nachfrage lag zwischen 0,04 % (833 m³/d) und 6,6 % (146.389 m³/d).

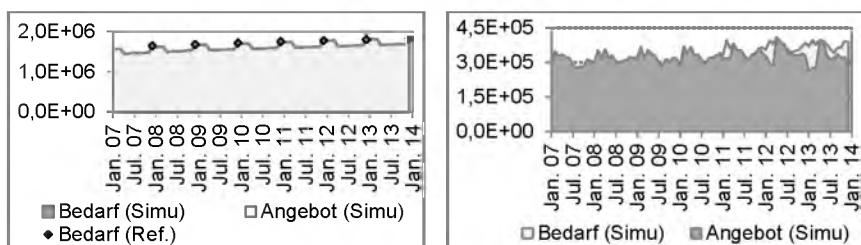


Bild 52: Simulierte Wasserbedarfe und -angebote der Haushalte (links) und Nicht-Haushalte (rechts) im Trinkwassernetz in [m³/d]
Bedarf (Ref.): Schätzungen von [89]

Wie bereits erläutert, gehen im Durchschnitt ca. 27,5 % (Jahr 2007) der gesamten Trinkwasserproduktion durch Leckagen in den Trinkwasserversorgungsstrukturen verloren. Dies ist in den bisher dargestellten Ergebnissen über Bedarfe und Angebote berücksichtigt worden. In Bild 53 sind die simulierten Trinkwasserbedarfe einschließlich und ausschließlich der physikalischen Verluste abgebildet. Die simulierten Trinkwasserbedarfe liegen ohne Wasserleckagen (Bedarf (Simu)²), deutlich unter dem Trinkwasserbedarf mit Leckagen (Bedarf (Simu)¹). Die simulierten Trinkwasser-Verluste lagen während des Simulationszeitraums zwischen 0,49 Mio. m³/d und 0,62

Mio. m³/d. Infolge des Bevölkerungswachstums stieg der gesamte Trinkwasserbedarf, ausschließlich der Leckagen, von 1,3 Mio. m³/d im Januar 2007 auf 1,6 Mio. m³/d im Dezember 2013 an. Der tatsächliche Trinkwasserverbrauch (Verbrauch (Simu)) lag, insbesondere während der Regenzeit in den Jahren 2011, 2012 und 2013, unter dem Trinkwasserbedarf der Verbraucher. Das Ungleichgewicht zwischen Bedarf und Verbrauch betrifft nur die Nicht-Haushalte, da sie die geringste Priorität bei der Trinkwasserverteilung haben.

Bild 53 zeigt auch den simulierten tatsächlichen Trinkwasserverbrauch der Privathaushalte. Hier stieg der Verbrauch aufgrund des Bevölkerungswachstums von 1,1 Mio. m³/d (Januar 2007) auf 1,3 Mio. m³/d (Dezember 2013) an.

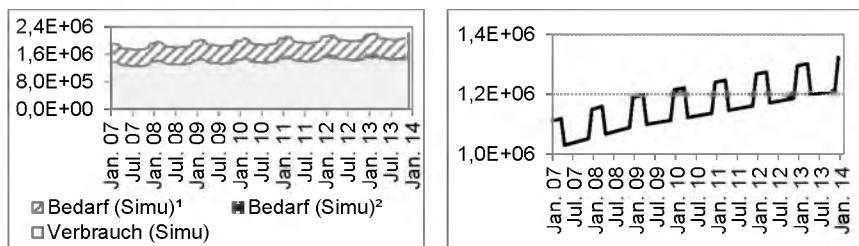


Bild 53: Simulierte Wasserbedarfe und -verbräuche der Privathaushalte und Nicht-Haushalte (links), Wasserverbräuche der Privathaushalte (rechts) im Trinkwassernetz in [m³/d]

Bedarf (Simu)¹: Trinkwasserbedarf einschließlich der physikalischen Wasserverluste; Bedarf (Simu)²: Trinkwasserbedarf ohne physikalische Wasserverluste

Bild 54 zeigt die Nutzungsanteile des Trinkwasserverbrauchs in den Privathaushalten von Lima mit Anschluss an das Trinkwassernetz für Dezember 2013. Im Durchschnitt wurden 32,8 % (416.078,5 m³/d) und 32,7 % (414.662 m³/d) des gesamten Verbrauchs im Jahre 2013 zum Duschen und zur Körperpflege bzw. zum Wäsche- waschen verwendet, gefolgt vom Trinkwasserverbrauch zur Toilettenspülung mit einem Anteil von ca. 29 % (370.090,6 m³/d). Der Trinkwasserverbrauch zum Kochen/Trinken lag mit einem durchschnittlichen Anteil von 5,3 % (67.313 m³/d) an letzter Stelle.

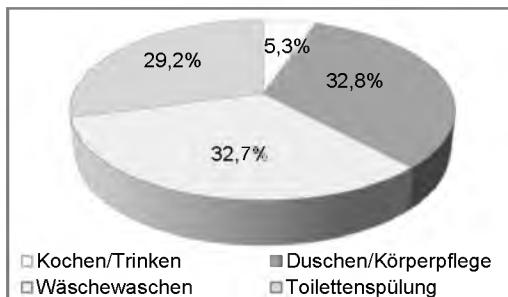


Bild 54: Aufteilung des simulierten Trinkwasserverbrauchs in den Privathaushalten mit Anschluss an das Trinkwassernetz (Dezember 2013)

Der Wasserbedarf von Gewerbegebieten und der Landwirtschaft außerhalb der Stadt wurde – im Vergleich zum Bedarf der Nicht-Haushalte der Stadt – mit der höchsten Priorität belegt. Der simulierte Wasserbedarf lag zwischen 412.109 m³/d (Januar 2007) und 358.302 m³/d (Dezember 2010) und konnte zumeist zu 100 % gedeckt werden.

Abwasseranfall der Privathaushalte und Nicht-Haushalte von Lima

Die anfallenden Ab-, Grau- und Schwarzwasserströme der Privathaushalte wurden auf der Basis der detaillierten Verbrauchermodelle (Bild 45) und der simulierten Trinkwasserverbräuche der Bevölkerung je nach Wasserversorgungsform bilanziert. Diese Informationen dienten als Eingangsgrößen für die abwassertechnischen Anlagen (Abschnitt 4.4.9). Laut der Simulationsergebnisse wurden im Durchschnitt 96% (1,1 Mio. m³/d) der Abwasserströme aus den Privathaushalten über das Kanalisationssystem abgeleitet. Die restlichen 4 % wurden über andere, nicht im Modell berücksichtigte Abwasserentsorgungsformen wie Klär- und Sickergruben gesammelt oder direkt in die Vorfluter entsorgt.

Bild 55 zeigt die simulierten (Abw. HH (Simu)) und die von [89] geschätzten (Abw. (Ref.)) Abwassermengen der Privathaushalte mit Anschluss an die Kanalisation. Der Vergleich zeigt, dass die Referenzwerte (graue Marker) über den simulierten Werten lagen. Hier ist zu beachten, dass die Referenzwerte sich aus dem Trinkwasserbedarf der Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz, inklusive der Wasserverluste, multipliziert mit dem Faktor 0,8 ergeben. Der Faktor stellt den Anteil des Trinkwasserverbrauchs dar, der in die Kanalisation eingeleitet wird. Laut [130] liegt der Faktor zwischen 0,80 und 0,85. Demgegenüber resultieren die simulierten Werte aus den Trinkwasserverbräuchen der Privathaushalte. Die saisonalen Schwankungen beim Trinkwasserverbrauch spiegeln sich ebenfalls in den Abwasseranfällen wider.

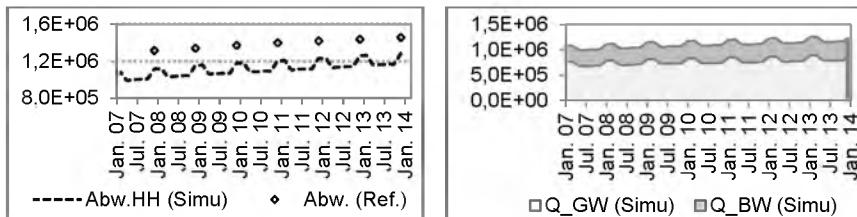


Bild 55: Ab- (links), Grau- und Schwarzwasserströme (rechts) in den Privathaushalten (Kanalisation) in $[\text{m}^3/\text{d}]$

Abw.HH (Simu): simulierter Abwasseranfall bei den Privathaushalten; Abw. (Ref.): geschätzter Abwasseranfall bei den Privathaushalten nach [89]; Q_GW (Simu) und Q_BW (Simu) : simulierter Grau- bzw. Schwarzwasseranfall bei den Privathaushalten

Bild 55 zeigt ebenfalls die Schwarz- und Grauwasserströme als gestapelte Flächen. Die Grauwasserströme (Q_GW (Simu)) trugen im Durchschnitt mit 69 % (0,77 Mio. m^3/d) zum gesamten Abwasseranfall der Privathaushalte bei, was auf ein großes Potenzial für Grauwasseraufbereitung und -wiederverwendung (z. B. bei Gartenbewässerung oder Toilettenspülung) hinweist. Durch die Wiederverwendung aufbereiteten Grauwassers könnte die Bewirtschaftung und Aufbereitung kostbarer Frischwasserressourcen (z. B. Grundwasservorkommen) reduziert werden.

Die simulierten Abwasserströme der Nicht-Haushalte (nicht dargestellt) lagen zwischen 164.066 m^3/d und 242.579 m^3/d und ergeben sich aus den tatsächlichen Trinkwasserverbräuchen multipliziert mit dem Faktor 0,80.

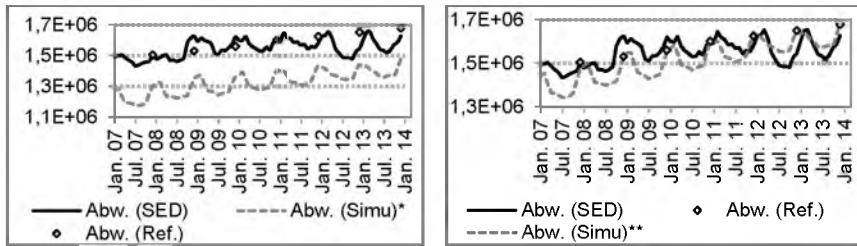


Bild 56: Gesamtabwasserströme in der Kanalisation ausschließlich (links) und einschließlich (rechts) des ermittelten Fremdwassers in $[\text{m}^3/\text{d}]$

Abw. (Simu)*: simulierter Abwasserstrom ausschließlich des geschätzten Fremdwassers; Abw. (Simu)**: simulierter Abwasserstrom einschließlich des geschätzten Fremdwassers; Abw. (SED): gemessener Abwasserstrom in die Kanalisation von SEDAPAL; Abw. (Ref.): geschätzter Abwasseranfall nach [89]

Bild 56 zeigt eine Gegenüberstellung der simulierten Gesamtabwassermengen (Abw. (Simu)), der Messwerte von SEDAPAL (Abw. (SED)) und der Schätzungen von [89]

(Abw. (Ref)). Die simulierten Abwasserströme ohne Fremdwasseranteile stiegen im Untersuchungszeitraum infolge des zunehmenden Trinkwasserverbrauchs von 1,3 Mio. m³/d auf 1,5 Mio. m³/d. Aus den Werten lässt sich schließen, dass ein bedeutender Anteil des gemessenen Abwasseranfalls aus Fremdwasser (z. B. durch Trinkwasserleckagen) und aus der illegalen Einleitung kommunaler und industrieller Abwässer besteht. Das Verhältnis von Fremdwasser zu illegal eingeleiteten Abwässern ist nicht bekannt. Laut [130] lässt sich die Fremdwassermenge im Kanalnetz auf der Grundlage von Länge und Material der Kanalisation, der Höhe des Grundwasserspiegels und der Niederschlagsmenge grob abschätzen. Werden die geschätzten Fremdwasserströme (Tabelle B 1, Abschnitt 6.2) in die simulierten Werten einbezogen, dann liegen die simulierten Abwasserströme nah an den Referenzwerten (Bild 56, rechte Seite).

Obwohl Überlegungen über die verschiedenen Anteile der realen gesammelten Abwasserströme durchgeführt wurden, wurden für die Modellierung von Kläranlagen nur die Abwasseranfälle der Privathaushalte mit Anschluss an die Kanalisation berücksichtigt. Gründe dafür sind die unzureichenden Informationen über Fremdwasserabflüsse sowie Quantität und Zusammensetzung des anfallenden Abwassers von Gewerbegebieten. Tabelle 25 zeigt die simulierte CSB-, N- und TSS-Konzentrationen der Abwässer der Privathaushalte mit Anschluss an das Kanalnetz. Der Jahresmittelwert der gesamten CSB-Konzentration lag bei 861 mg/l und 859 mg/l für die Jahre 2007 und 2013. Der Anstieg des Abwasseranfalls infolge des Bevölkerungswachstums wirkt sich kaum auf die CSB-Konzentration sowie auf die Konzentrationen der Abwasserinhaltsstoffe aus. Der ermittelte Jahresmittelwert des Gesamtstickstoffs blieb zwischen 2007 und 2013 fast gleich bei 62,5 mg/l. Die simulierten Werte stehen insgesamt im Einklang mit den von [134] angegebenen Werten über typische Stoffkonzentrationen in häuslichem Abwasser.

Tabelle 25: CSB-, TSS- und N-Konzentrationen im häuslichen Abwasser

Datum	Stoffkonzentration [mg/l]		TSS		N	
	CSB		Simu	Ref.*	Simu	Ref.*
2007	860,9	250-1000	200,2	100-350	62,5	20-85
Jan-März	823,1			191,4		59,8
April-Dez	873,4			203,1		63,4
2013	859,1			199,9		62,4
Jan-März	821,4			191,1		65,6
April-Dez	871,6			202,8		63,3

CSB: gesamter chemischer Sauerstoffbedarf; TSS: Trockensubstanz; N: Gesamtstickstoff; Ref.*: Referenzwerte nach [134]; Simu: simulierte Werte

Strombedarf und -verbrauch der Privathaushalte

Bild 57 zeigt die simulierten und realen monatlichen Stromverbräuche der Privathaushalte in Lima mit Anschluss an das Stromnetz. Da keine Kapazitätsbeschränkungen und Verluste (illegaler Anschlüsse) im Stromnetz berücksichtigt wurden, ist der simulierte Stromverbrauch gleich dem Strombedarf. Die Zunahmen des Stromverbrauchs von Dezember bis März basieren auf den saisonalen Schwankungen des Warmwasserverbrauchs (Duschen/Körperpflege). Deutliche Unterschiede bestehen zwischen simulierten und realen Stromverbräuchen ab 2010. Mögliche Gründe neben der Entwicklung der Bevölkerungszahlen könnten die Verbrauchsentwicklung pro Kopf, die in der Simulation konstant angesetzt wurde, als auch die Zunahme illegaler Anschlüsse sein. Aus diesem Grund unterliegen die realen Werte einer höheren Dynamik und lassen sich mittels des hier implementierten Modellierungsansatzes nur näherungsweise abbilden.

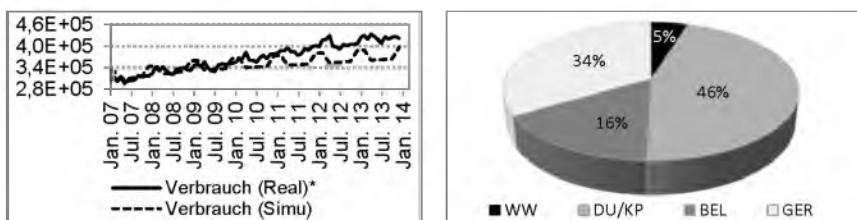


Bild 57: Stromverbrauch der Privathaushalte in [kWh/Monat] (links) und simulierte Anteile der einzelnen Stromverbräuche (Dezember 2013) in [%] (rechts)

Verbrauch (Real)*: realer Stromverbrauch, die Werte basieren auf Daten von [135]; [136]; [137]; [138]; [139]; [140] und [141] über den Stromverbrauch der Haushalts- und Nicht-Haushaltkunden des regulierten Markts; Verbrauch (Simu): simulierte Verbrauchsanteile; WW: Wäschewaschen; DU/KP: Duschen/Körperpflege; BEL: Beleuchtung; GER: Haushalts- und Elektrogeräte

Bild 57 zeigt ebenfalls die einzelnen Anteile am gesamten Stromverbrauch der Privathaushalte. Der Stromverbrauch für Duschen/Körperpflege (DU/KP) ist mit einem Anteil von 46 % (5.912.145 kWh/d) der intensivste Verbraucher. Die Nutzung von Haushalts- und Elektrogeräten (GER) – wie zum Beispiel Computer – lag mit einem Anteil von 34 % (4.351.430,8 kWh/d) an zweiter Stelle. Das Wäschewaschen machte 5 % (622.081 kWh/d) des Gesamtverbrauchs aus und lag an letzter Stelle.

Natürliche Ressourcen und technische Infrastrukturen des Wasser- und Energiesektors

Natürliche Ressourcen und technische Infrastrukturen des Wasser- und Energiesektors von Lima wurden auf der Basis der bereits dargestellten simulierten Wasser- und Energiebedarfe der Privathaushalte und Nicht-Haushalte und unter Berücksichti-

gung variierender Infrastrukturkapazitäten und natürlicher Ressourcenangebote bewirtschaftet. Darüber hinaus wurden kombinierte Steuerungskonzepte (Bewirtschaftung nach Priorisierung, gleichmäßige Bewirtschaftung, Abschnitt 3.7) angewendet. Systemweit wurde den Grundwasserbrunnen die höchste Priorität zugewiesen, gefolgt von den Wasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Chillón“ an zweiter und „Huachipa“ an dritter Stelle. Die folgenden Infrastrukturkomponenten wurden im Modell mit Kapazitätsbeschränkungen belegt:

- die maximale Speicherkapazität des Talsperrensystems im Einzugsgebiet des Flusses Rimac: 22 Talsperren und natürliche Seen
- die maximale Gesamtabgabekapazität des Talsperrensystems
- die maximalen Kapazitäten der Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac
- die maximalen Entnahmekapazitäten der Trinkwasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“, „Chillón“ und „Huachipa“ (Phase I)
- die Entnahmekapazitäten der von SEDAPAL 400 betriebenen Grundwasserbrunnen
- die maximale Behandlungskapazität der Kläranlage „Carapongo“ (Lima-Ost)

Das Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Flusses Rimac

Das Verbundspeichersystem im Einzugsgebiet des Rimac wurde mittels des in Abschnitt 3.9 dargestellten Regelungskonzeptes bewirtschaftet. Mit dieser Anwendung sollte untersucht werden, ob das Regelungskonzept – im Vergleich zum manuellen Ist-Betrieb durch erfahrenes Personal – zu einer besseren Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Talsperrensystem bei Gewährleistung der Bewirtschaftungsziele führt. Hier weicht das Modell von der Realität ab.

Bild 58 zeigt eine Gegenüberstellung der gesamten simulierten und realen Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem. Es zeigt sich, dass zwar die simulierten Wasserabgaben die realen Abgaben – insbesondere während der Trockenzeit – gut annähern, jedoch auch temporär deutliche Unterschiede zwischen realen und simulierten Werten bestehen. Die Ursache liegt an der teils deutlich besseren Ausnutzung der Speicher und dem höheren Restvolumen bei Ende der Entleerungsperiode. Um die Bauwerke der Speicher zu schützen, wurden die Wasserabgaben im Modell auch während der Regenzeit (von Dezember bis April) geregelt. Inwieweit in den realen Daten Überlaufereignisse erfasst sind, ist unbekannt. Die Ergebnisse weisen auch darauf hin, dass trotz der optimalen Bewirtschaftung die verfügbare Gesamtkapazität des Talsperrensystems unzureichend ist, um das natürliche Wasserdargebot während der Regenzeit sowohl in normalen als auch in feuchten Abflussjahren aufzufangen. Als eine Gegenmaßnahme wurde die Möglichkeit der Erweiterung des Speichersystems um drei neuen Talsperren untersucht (vgl. Szenario S2, Abschnitt 4.5.3). Diese Maßnahme steht im Einklang mit dem Masterplan von SEDAPAL.

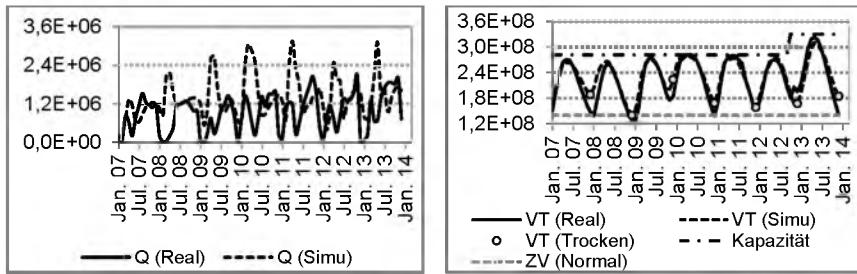


Bild 58: Simulierte und gemessene gesamte Wasserabgaben (links) in [m³/d] sowie reale und simulierte gespeicherte Wasservolumen (rechts) in [m³]

Q (Real) und Q (Simu): mittlere monatliche gemessene bzw. simulierte Wasserabgaben; VT (Real) und VT (Simu): gemessene bzw. simulierte Gesamtvolumen; VT (Trocken): zu erreichendem Gesamtvolumen am Ende der Trockenzeit; ZV (Normal): Zielvolumen am Ende der Trockenzeit in normalen und feuchten Abflussjahren; Kapazität: maximale Speicherkapazität; Quelle von Q(Real) und VT(Real): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von EDEGEL

Bild 58 zeigt auch die simulierten und gemessenen gespeicherten Wasservolumina im Talsperrensystem am Anfang jedes Monats. Die simulierten nähern sich den gemessenen Werten weitgehend an, zeigen aber am Ende der Entleerungsperioden (Ende November) um 2,3 % (3,9 Mio.m³) bis 20,4 % (33,5 Mio.m³) höhere Restvolumen. Damit kann das Modell auch für Prognosezwecke eingesetzt werden. Eine Ausnahme war das Jahr 2012, in dem das simulierte Gesamtvolumen ca. 18 % unten dem realen Wasservolumen lag. Die Ursache konnte nicht ermittelt werden. Mit der Inbetriebnahme des natürlichen Sees „Huascacocha“ erhöht sich ab März 2013 die Gesamtspeicherkapazität. Gemäß den Daten von EDEGEL umfasst der ausgewählte Zeitraum nur normale und feuchte Abflussjahre. Dabei gilt, am Ende der Entleerungsperiode (Trockenzeit, Ende November) für normale und feuchte Abflussjahre ein Restvolumen von 140 Mio. m³ zurückzuhalten. Aus dem Vergleich wird deutlich, dass das Zielvolumen von 140 Mio.m³ Ende November mittels des angewendeten Regelungsansatzes erreicht wurde.

Bild 59 zeigt exemplarisch die Auslastung anhand der Speicherfüllgrade des Subsystems „Marcapomacocha“ (194 Mio.m³ Speicherkapazität) und „Huasca“ (13,5 Mio.m³ Speicherkapazität). Mittels des Regelungsansatzes konnte eine gleichmäßige Bewirtschaftung der in Reihe und parallel geschalteten Speicher des Subsystems erreicht werden. Die Abbildung zeigt auch, dass aufgrund der begrenzten Abgabekapazität und des Geländeprofils des Stausees „Marcapomacocha“ die Wasserabgaben aus den oberen Speichern („Antacoto“, „Marcapomacocha“ und „Huascacocha“) des Subsystems auch begrenzt werden. Dies trägt zu einer begrenzten Ausschöpfung der gespeicherten Wasservolumen im Subsystem und systemweit zu einer ungleichmäßigen Bewirtschaftung der Speicher während der Trockenzeit bei.

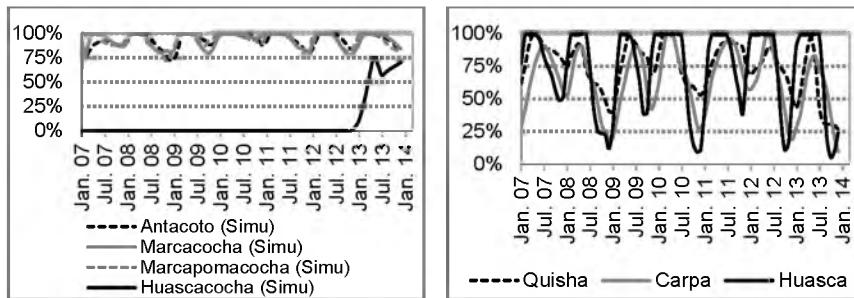


Bild 59: Ausnutzung der verfügbaren Kapazitäten der Speicher des Subsystems „Marcapomacocha“ (links) und Huasca (rechts) in [%]

Mittels der gleichmäßigen Ausnutzung und Regelung der Wasserabgaben aus den Speichern konnten die Überlaufvolumina aus dem System während des gesamten Simulationszeitraums auf null reduziert werden. Die simulierten Überlaufvolumen konnten aufgrund fehlender Messdaten nicht verglichen werden.

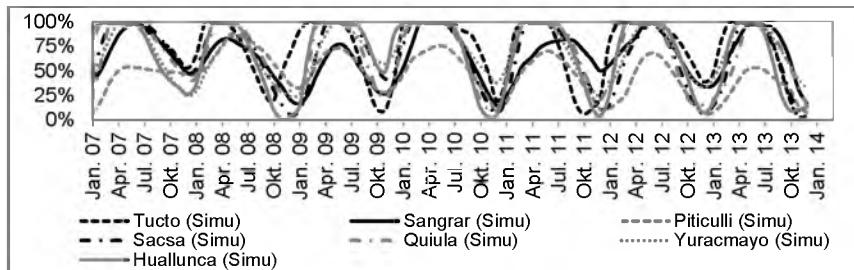


Bild 60: Auslastung der Kapazitäten der Einzelspeicher in [%]

Die fünf Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Rimac

Da der erzeugte Strom sowohl regional und überregional verkauft wird, spielt der Strombedarf der Stadt Lima keine Rolle. Der Betrieb der Wasserkraftwerke richtet sich in der Regenzeit nach dem maximal verfügbaren Wasserdargebot und der maximalen Durchflussmenge, und während der Entleerungsperiode nach dem Wasserbedarf der Stadt. Als Wasserbedarf jedes Wasserkraftwerks wurde die maximale Durchflussmenge (siehe Tabelle 11) angenommen.

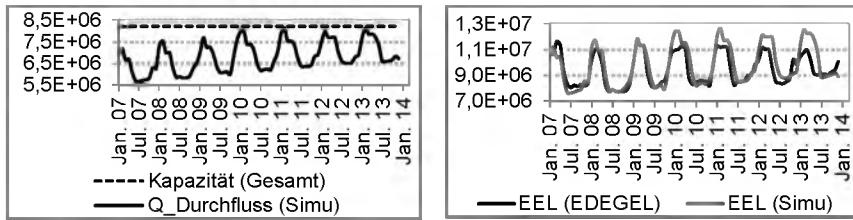


Bild 61: Simulierte Durchflussmengen (links) in [m^3/d] und Stromproduktion in den fünf Wasserkraftwerken (rechts) in [kWh/d]

Quelle von EEL(EDEGEL): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von EDEGEL

In Bild 61 sind die maximale Durchflusskapazität der Wasserkraftwerke und die simulierten Durchflussmengen der fünf Wasserkraftwerke gegenübergestellt. Während des Simulationszeitraums stiegen die Durchflüsse von 6,98 Mio. m^3/d (Januar 2007) auf 7,70 Mio. m^3/d (Januar 2013). Die simulierten Wasserabgaben aus dem 2013 im Betrieb genommenen Stausee „Huascacocha“ trugen während der Trockenzeit zur Erhöhung des Wasserangebotes des Speichersystems zwischen 0,01 % (208 m^3/d) und 28 % (409.341 m^3/d) bei. Bild 61 zeigt auch die mittlere monatliche reale und simulierte Stromproduktion der Wasserkraftwerke. Die simulierte Stromproduktion stellt eine gute Annäherung an die realen Verhältnisse dar – insbesondere zwischen 2007 und 2012. Während der Regenzeit der Jahre 2010, 2011, 2012 und 2013 lagen die simulierten Werte über den realen. Der Grund dafür ist die bessere Auslastung des Talsperrensystems.

Die jährliche simulierte Stromproduktion von 2008 bis 2013 lag zwischen 1,9 % (65974 MWh) und 7,5 % (264488 MWh) über der realen Produktion. Die reale Stromproduktion stieg von 3.388.206 MWh in 2007 auf 3.545.344 MWh in 2013, ein Anstieg um 0,65 %. Die Stromproduktion von 2013 stellt die höchste Produktion dar. Daraus lässt sich ableiten, dass während der Entleerungsperiode die Wasserabgaben aus dem 2013 in Betrieb genommenen Stausee „Huascacocha“ zur Erhöhung der Stromproduktion beitrugen.

Die Trinkwasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Huachipa“

In Bild 62 sind die simulierten und realen Wasserentnahmen der Anlage „La Atarjea“ und die simulierten Wasserentnahmen der Anlage „Huachipa“ dargestellt. Die simulierten Wasserentnahmen von „La Atarjea“ wurden auf eine maximale Entnahmekapazität von 18,70 m^3/s begrenzt. Die Abbildung zeigt auch, dass die simulierten und realen Werte gleiche Tendenzen aufweisen. Es stellen sich jedoch ab 2010 deutliche quantitative Unterschiede ein. Einige Gründe für diese Unterschiede – wie zum Beispiel die reale Entwicklung der Bevölkerung und des Wasserbedarfs oder betriebliche Randbedingungen – wurden bereits diskutiert.

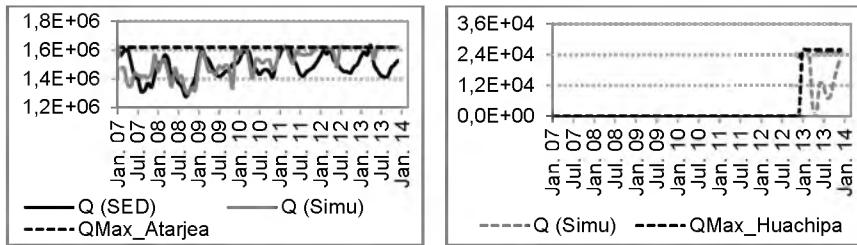


Bild 62: Simulierte und reale Wasserentnahmen in den Wasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Huachipa“ in [m³/d]

Q (SED): reale Wasserentnahmen durch SEDAPAL; Q (Simu): simulierte Wasserentnahmen; QMax_Atarjea und QMax_Huachipa: maximale Entnahmekapazität der Anlage „La Atarjea“ bzw. der Anlage „Huachipa“; Quelle von Q(SED): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Bild 62 zeigt auch, dass die für „Huachipa“ simulierten Entnahmen deren maximale Kapazität nicht ausgeschöpften. Die Ursache ist das im Modell angewendete Steuerungskonzept zur Bewirtschaftung der Wasserressourcen (siehe Abschnitt 3.7). In der Praxis wird die Bewirtschaftung der Wasserressourcen manuell und situationsbedingt koordiniert. So kann beispielsweise die Bewirtschaftung der Grundwasserbrunnen aufgrund betrieblicher Sonderfälle (z. B. technische Ausfälle und Wartungsarbeiten in Wasserwerken) priorisiert werden. Diese und weitere betriebliche Randbedingungen wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

Die Trinkwasseraufbereitungsanlage „Chillón“

Bild 63 zeigt eine Gegenüberstellung der simulierten und der realen Wasserentnahmen in der Anlage „Chillón“ (Lima-Nord). Es zeigt sich, dass die simulierten Wasserentnahmen aus dem Fluss Chillón (Angebot (Simu)) durch die maximale Entnahmekapazität von 2,50 m³/s und den ausgeprägten saisonalen Charakter des Flusses (Trockenfallen in der Trockenzeit) begrenzt werden.

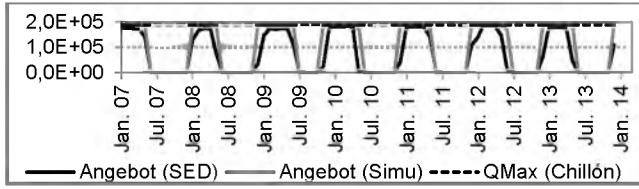


Bild 63: Reale und simulierte Wasserentnahmen in der Wasseraufbereitungsanlage „Chillón“ in [m³/d]

Angebot (SED): reale Wasserentnahmen durch SEDAPAL; Angebot (Simu): simulierte Wasserentnahmen; QMax_Chillón: maximale Entnahmekapazität der Anlage „Chillón“; Quelle von Angebot (SED): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Modellierung der Grundwasserentnahmen

In Bild 64 sind die realen und simulierten Grundwasserentnahmen dargestellt. Die Grundwasserressourcen tragen durchschnittlich 18 % zur Trinkwasserversorgung bei. Da das Talsperrensystem eine viel größere Bedeutung für die Wasserversorgung hat und auch deutlich größere Ausbau- und Optimierungspotenziale aufweist, wurden im Modell zur Abbildung des Ist-Zustandes die realen Grundwasserentnahmen angesetzt. Die Abbildung zeigt auch, dass die Grundwasservorkommen nicht nachhaltig bewirtschaftet wurden. Im Rahmen des Szenarios S2 (Abschnitt 4.5.3) wurde jedoch untersucht, inwieweit sich eine Änderung hin zu einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung auf die Trinkwasserversorgung und die anderen Wasserressourcen auswirkt.

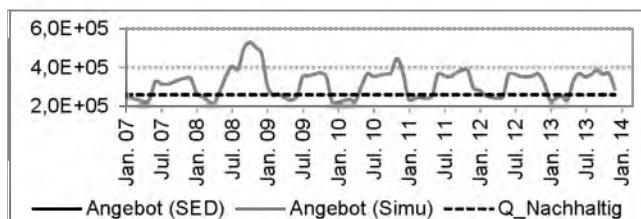


Bild 64: Simulierte und reale Grundwasserangebote in [m³/d]

Angebot (SED): reale Entnahmen durch SEDAPAL; Angebot (Simu): simulierte Entnahmen; Q_Nachhaltig: als nachhaltig definierte gesamte Grundwasserentnahmen (SEDAPAL); Quelle von Angebot (SED): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Gesamtes Trinkwasserangebot

In Bild 65 sind die realen und simulierten gesamten Trinkwasserangebote dem simulierten Trinkwasserbedarf der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz, einschließlich der physikalischen Wasserverluste, gegenübergestellt. Die gesamten Trinkwasserangebote ergeben sich aus der Summe der Trinkwasserproduktion in den Anlagen „La Atarjea“, „Huachipa“ und „Chillón“ und den Grundwasserentnahmen (Bild 62, Bild 63 und Bild 64).

Es zeigt sich auch, dass zwar die simulierten Trinkwasserangebote die gleichen Tendenzen wie die realen aufweisen, sich jedoch ab 2010 quantitative Unterschiede entwickeln. Während der Trockenzeit nahmen die realen Werte deutlicher ab. Da in den gleichen Zeiträumen die simulierten Trinkwasserangebote über den realen Werten lagen, lässt sich vermuten, dass der im Modell angenommene Trinkwasserverbrauch (153 l/p/d) über dem tatsächlichen Verbrauch lag. Diese Vermutung steht im Einklang mit der tatsächlich unregelmäßigen Wasserversorgung infolge unzureichender Infrastrukturkapazitäten und natürlicher Wasserangebote während der

Trockenzeit. Wie in Abschnitt 4.2.1 bereits erläutert, haben nicht alle der an das Trinkwassernetz angeschlossenen Privathaushalte 24 Stunden am Tag Zugang zum Trinkwasser. Diese variierenden betrieblichen Bedingungen wirken sich auf die realen Trinkwasserangebote und -verbräuche aus und wurden in der Simulation nicht berücksichtigt. Eine weitere Ursache sind betriebliche Probleme der im Oktober 2012 in Betrieb genommenen Wasseraufbereitungsanlage „Huachipa“ ([142]), die jedoch im Gegensatz dazu im Modell 2013 ohne Beschränkungen zum Gesamtwasserangebot beigetragen hat. Bild 65 zeigt auch, dass obwohl bis 2013 kein trockenes Abflussjahr auftrat, in den Sommermonaten der Jahre 2012 und 2013 die Nachfrage das Angebot übertraf. Die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage lag zwischen 0,04 % ($833 \text{ m}^3/\text{d}$) und 6,6 % ($146.389 \text{ m}^3/\text{d}$). Die Versorgungslücke betraf die Nicht-Haushalte, da diese die geringste Priorität bei der Wasserversorgung haben.

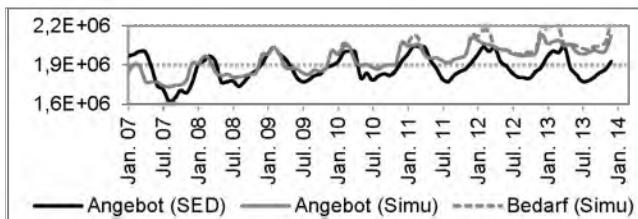


Bild 65: Reale und simulierte Trinkwasserbedarfe und –angebote im Trinkwassernetz in [m³/d]

Angebot (SED): reale Trinkwasserangebote durch SEDAPAL; Angebot (Simu): simulierte Trinkwasserangebote; Bedarf (Simu): simulierte Trinkwasserbedarfe; Quelle von Angebot (SED): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Bild 66 zeigt die Anteile der verschiedenen Wasserquellen am gesamten simulierten Trinkwasserangebot als gestapeltes Flächendiagramm. Die Wasseraufbereitungsanlage „La Atarjea“ lag mit einem durchschnittlichen Anteil von 78,5 % an erster Stelle, gefolgt von den Grundwasservorkommen mit einem durchschnittlichen Anteil von 16,5 % und der Anlage „Chillón“ mit einem durchschnittlichen Anteil von 5 %.

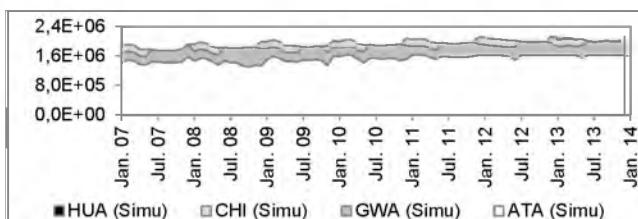


Bild 66: Simulierte Wasserangebote der verschiedenen Wasserquellen und -infrastrukturen in [m³/d]

HUA: Anlage „Huachipa“, CHI: Anlage „Chillón“, GWA: Grundwasser; ATA: „La Atarjea“

Exemplarisch gewählte Kläranlage „Carapongo“

In Bild 67 sind die gemessenen und simulierten Zuflüsse im Zulauf der Kläranlage „Carapongo“ sowie die simulierten häuslichen Abwasserströme von Lima-Ost dargestellt.

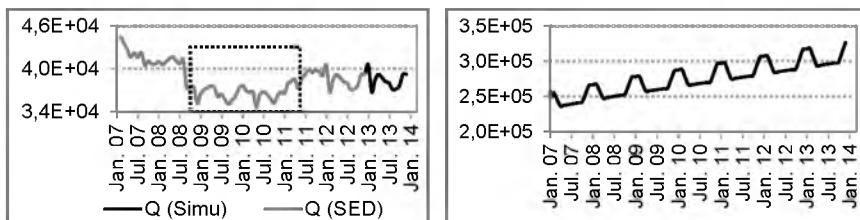


Bild 67: Simulierte und gemessene Zuläufe im Zulauf der Kläranlage „Carapongo“ (links) und simulierter Abwasseranfall von Lima-Ost (rechts) in [m³/d]
Q (SED): gemessene Werte von SEDAPAL; Q (Simu): simulierte Werte; Quelle von Q (SED): selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Im Sinne der Darstellung des Ist-Zustandes wurde im Modell der gemessene Abwasserzulaufstrom angesetzt. Der Zulauf zur Kläranlage macht im Durchschnitt 14 % des häuslichen Abwasseranfalls in der Kanalisation von Lima-Ost aus. Die Abwassermengen lagen zwischen 34.733 m³/d und 44.582 m³/d. Die Abbildung zeigt, dass der gemessene Zulaufvolumenstrom aus unbekannten Gründen von September 2008 bis Juni 2011 deutlich zurückging. Im Gegensatz dazu sind die gemessenen CSB-Konzentrationen und -Frachten in diesem Zeitraum deutlich angestiegen (vgl. Bild 68). Da die CSB-Konzentration über dem Grenzwert (1000 mg/l) der peruanischen Abwasserverordnung lag und es laut SEDAPAL keinen Zulauf gewerblicher Abwässer gab, lässt sich hier nur vermuten, dass die Wasserversorgung aufgrund von Bau- oder Sanierungsarbeiten Einschränkungen unterlag. Aus diesem Grund nahm der Wasserverbrauch und Abwasseranfall pro Kopf ab, während die Schmutzfracht pro Einwohner konstant blieb. Da außer den saisonalen Schwankungen keine weiteren Einschränkungen modelliert wurden, blieben die simulierten CSB-Konzentrationen und -Frachten nahezu konstant und innerhalb des Grenzwertes der peruanischen Abwasserverordnung. Die gesamte simulierte CSB-Konzentration lag im Durchschnitt bei 863 mg/l und nähert sich den gemessenen Werten im ersten Jahr gut an.

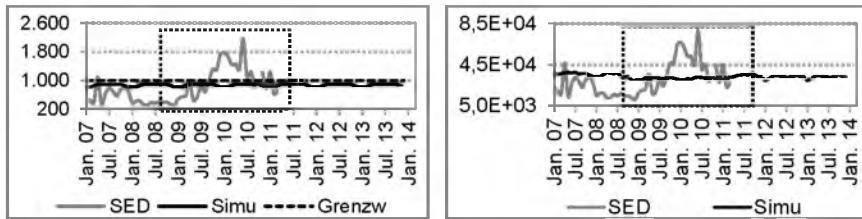


Bild 68: Simulierte und gemessene CSB-Konzentrationen (links) in [mg/l] und CSB- Frachten (rechts) in [kg/d] im Zulauf der Kläranlage „Carapongo“

SED: gemessene Werte von SEDAPAL; Simu: simulierte Werte; Grenzw.: Grenzwert der peruanischen Abwasserverordnung; Quelle von SED: selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

In Bild 69 sind die simulierten Konzentrationen und Frachten des Gesamtstickstoffs im Zulauf der Anlage dargestellt. In den Simulationsrechnungen hat sich gezeigt, dass die Konzentrationen zwischen 59 mg/l und 65 mg/l und im Bereich typischer Konzentrationen von häuslichen Abwässern (zwischen 20 mg/l und 85 mg/l) liegen. Die Schwankungen sind vom saisonalen Wasserverbrauch abhängig.

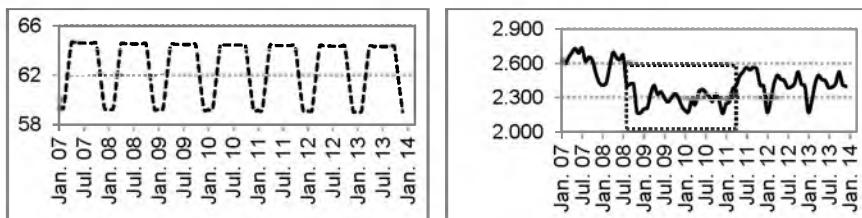


Bild 69: Simulierte Gesamtstickstoffkonzentration (links) in [mg N/l] und -fracht (rechts) in [kg N/d] im Zulauf der Kläranlage „Carapongo“

Bild 70 stellt die simulierten und gemessenen CSB- Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage gegenüber. Für den Zeitraum von Januar 2007 bis Januar 2009 stellen die Simulationsergebnisse eine gute Näherung der gemessenen Werte dar. Die simulierte CSB-Eliminationsrate lag im Durchschnitt bei 90 %. Die gesamte simulierte Stickstoffkonzentration im Ablauf lag im Durchschnitt bei 18 mg/l.

Es ist festzustellen, dass die temporäre Abnahme des Zulaufvolumenstroms (Bild 67) und der damit verbundene Anstieg der Zulauffrachten in der realen Anlage deutlichen Einfluss auf die gesamte gemessene CSB-Konzentration im Ablauf haben. Der CSB-Grenzwert von 200 mg/l der peruanischen Abwasserverordnung für die Einleitung von Abwässern in den Vorfluter wurde in diesem Zeitraum nicht eingehalten.

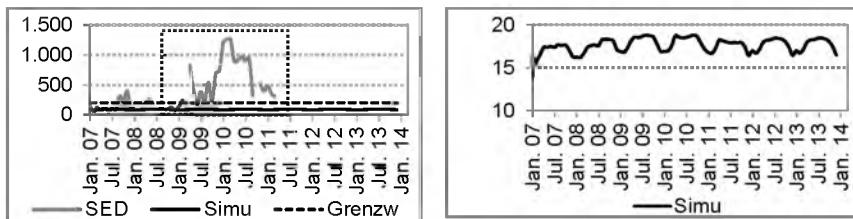


Bild 70: Gemessene und simulierte CSB-Konzentrationen (links) in [mg/l] und Gesamtstickstoffkonzentrationen (rechts) in [mg N/l] im Ablauf der Kläranlage „Carapongo“

SED: gesamte gemessene CSB-Konzentration nach SEDAPAL; Simu: gesamte simulierte CSB-Konzentration bzw. gesamte simulierte Gesamtstickstoffkonzentration; Grenzw.: Grenzwert der peruanischen Abwasserverordnung; Quelle von SED: selbst erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Stromverbrauch des Wasserver- und Abwasserentsorgungs- systems

Bild 71 zeigt den simulierten und realen Stromverbrauch der Infrastrukturen des Trinkwasserversorgungssystems. Der Vergleich zeigt, dass die simulierten Stromverbräuche des Trinkwassersystems sich den realen Werten zwischen Januar 2007 und Mai 2011 sehr gut annähern. Ab Juni 2011 lagen die simulierten leicht über den gemessenen Werten. Gründe dafür sind, dass der gemessene Stromverbrauch den Stromverbrauch der Anlagen „Chillón“ und „Huachipa“ nicht umfasst.

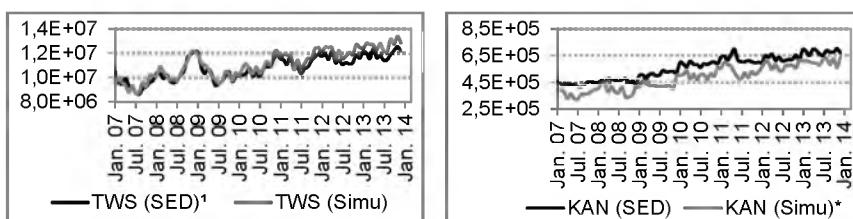


Bild 71: Monatlicher Stromverbrauch des Trinkwassersystems (links) und Abwassersystems (rechts) in [kWh/Monat]

TWS (SED)¹: gemessener Stromverbrauch des Trinkwassersystems, die Werte enthalten nicht den Stromverbrauch der Trinkwasseraufbereitungsanlagen „Chillón“ und „Huachipa“ und der Grundwasserentnahme aus den Brunnen von „Proyecto Chillón“; TWS (Simu): simulierter Stromverbrauch des Trinkwassersystems; KAN (SED): gemessener Stromverbrauch des Kanalnetzes; KAN (Simu): dimulierter Stromverbrauch des Kanalnetzes. *Die Werte enthalten nicht den Transport vom Fremdwasser; Quelle von TWS(SED) und KANN(SED): erstellt auf Grundlage der Daten von SEDAPAL

Die Abbildung stellt auch den monatlichen simulierten und den realen Stromverbrauch des Kanalnetzes gegenüber. Da die simulierten Werte das geschätzte

Fremdwasser und den anteiligen Stromverbrauch für Transport nicht berücksichtigen, lag der simulierte Stromverbrauch unter den realen Werten. Weil sich Stromverbräuche messtechnisch sehr viel besser erfassen lassen als Wasser- und Abwasser-volumenströme, stellt Bild 71 ein sehr gutes Maß für die erreichte Modellgüte dar.

4.5.2 Ergebnisse S1 ohne Maßnahmen (2014 – 2030)

Entwicklung des Wasserbedarfs und -verbrauchs der Privathaushalte und Nicht-Haushalte von Lima

Bild 72 zeigt eine Gegenüberstellung des simulierten Wasserbedarfs und -angebotes der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz. Im Rahmen dieses Szenarios wird der gesamte Wasserbedarf, einschließlich der physikalischen Verluste, von 2,2 Mio.m³/d (Januar 2014) auf 2,9 Mio.m³/d (Dezember 2030) steigen. Die angenommenen trockenen Abflussjahre 2017/2018 und 2019/2020 werden sich wenig auf das Wasserangebot auswirken, da die Wasseraufbereitungskapazitäten als unverändert angenommen wurden. Während des angenommenen trockenen Abflussjahrs 2019/2020 würde die Versorgungslücke zwischen 5,3 % (122.057 m³/d) und 12,3 % (307.756 m³/d) liegen. Demgegenüber wirken sich die zwei angenommenen trockenen Abflussjahre 2027/2028 und 2029/2030 deutlich auf das Wasserangebot und die Wasserversorgung der Stadt aus. Während des angenommenen trockenen Abflussjahres 2029/2030 würde die Versorgungslücke zwischen 18 % (516.846 m³/d) und 22 % (677.568 m³/d) schwanken. Da die Nicht-Haushalte die geringste Versorgungspriorität haben, weisen sie die größte Versorgungslücke auf. Während der angenommenen trockenen Abflussjahre 2027/2028 und 2029/2030 würde ohne Maßnahmen die Versorgungslücke der Nicht-Haushalte zwischen 67 % (245.794 m³/d) und 79 % (305.213 m³/d) bzw. zwischen 72 % (264.240 m³/d) und 85 % (325.867 m³/d) liegen.

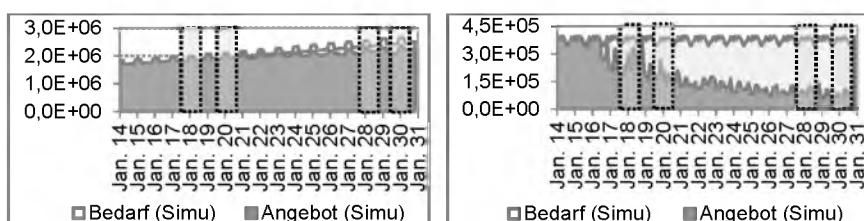


Bild 72: Simulierte Wasserbedarfe und -angebote der Privathaushalte (links) und der Nicht-Haushalte (rechts) im Trinkwassernetz in [m³/d]

Bedarf (Simu): simulierte Trinkwasserbedarf; Angebot (Simu): simulierte Trinkwasserangebot

Die bisher dargestellten Wasserbedarfe und -angebote berücksichtigen die physikalischen Trinkwasserverluste. Bild 73 zeigt den simulierten Wasserbedarf einschließlich und ausschließlich der physikalischen Verluste und den Wasserverbrauch der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Trinkwasserversorgungsnetz. Im Durchschnitt gehen $692.652 \text{ m}^3/\text{d}$ ($8 \text{ m}^3/\text{s}$) aus dem System verloren. Der tatsächliche Wasserverbrauch der Privathaushalte und Nicht-Haushalte, welcher im Modell durch die Kapazitäten von Wasserressourcen und Infrastrukturen und die Wasserverluste begrenzt wurde, wird von $1,61 \text{ Mio. m}^3/\text{d}$ (Januar 2014) auf $1,70 \text{ Mio. m}^3/\text{d}$ (Dezember 2030) steigen.

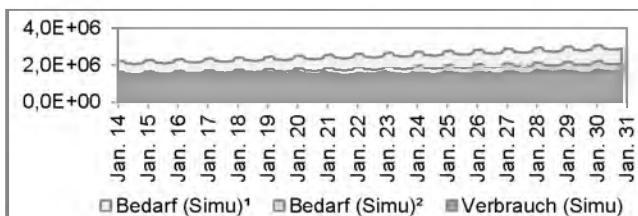


Bild 73: Gesamter simulierter Wasserbedarf und -verbrauch der Privathaushalte und Nicht-Haushalte im Szenario ohne Maßnahmen in $[\text{m}^3/\text{d}]$

*Bedarf (Simu)¹: simulierter Trinkwasserbedarf einschließlich der physikalischen Trinkwasserverluste;
 Bedarf (Simu)²: simulierter Trinkwasserbedarf ausschließlich der physikalischen Trinkwasserverluste;
 Verbrauch (Simu): tatsächlicher simulierter Trinkwasserverbrauch*

Entwicklung des Abwasseranfalls der Privathaushalte und Nicht-Haushalte von Lima

Bild 74 stellt beispielhaft die Ergebnisse bzgl. des gesamten simulierten Abwasseranfalls und den Abwasseranfall der Privathaushalte und Nicht-Haushalte für die Jahre 2014 bis 2030 dar. Der Abwasseranfall der Privathaushalte macht im Durchschnitt 98 % des gesamten Abwasseranfalls aus und steigt von $1,29 \text{ Mio. m}^3/\text{d}$ auf $1,74 \text{ Mio. m}^3/\text{d}$ infolge des Bevölkerungswachstums und des Trinkwasserverbrauchs im Rahmen dieses Szenarios. Der Anteil der Abwasseranfälle der Nicht-Haushalte zum gesamten Abwasseranfall wird ohne Maßnahmen auf der Versorgungsseite von 15 % auf 3,7 % zwischen Januar 2014 und Dezember 2030 sinken.

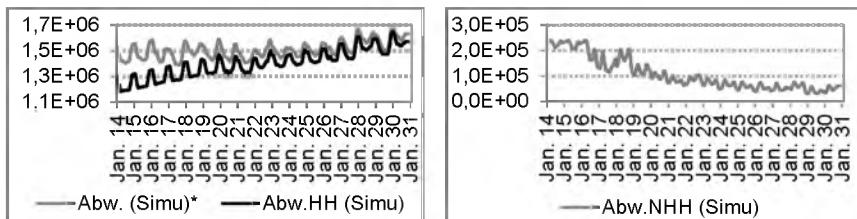


Bild 74: Simulierte Abwasserströme der Privathaushalte (links) und Nicht-Haushalte (rechts) ohne Maßnahmen in [m³/d]

Abw. (Simu)*: gesamter simulierter Abwasserstrom ausschließlich der physikalischen Trinkwasserverluste; Abw.HH (Simu) und Abw.NHH (Simu): simulierter Abwasserstrom der Privathaushalte bzw. Nicht-Haushalte

Bild 75 zeigt exemplarisch die Entwicklung des CSB und des Gesamtstickstoffs. Die CSB- und Gesamtstickstoffkonzentrationen werden infolge des sinkenden Pro-Kopf-Verbrauchs an Trinkwasser bei zunehmenden Gesamtfrachten ab 2018 deutlich steigen. Die CSB-Konzentrationen steigen in den Trockenzeiten von 900 mg/l auf über 1.000 mg/l.

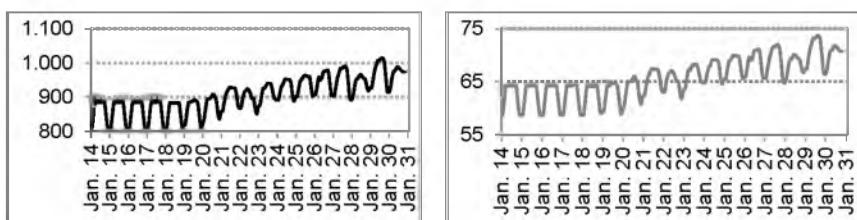


Bild 75: Simulierte CSB- und Gesamtstickstoffkonzentration im häuslichen Abwasser in [mg/l]

Entwicklung der Regelung der Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Rimac

Bild 76 zeigt die simulierten Gesamtabgaben aus dem Talsperrensystem. Hier liegt die simulierte Wasserabgabe während der angenommenen trockenen Jahre 2017/2018 und 2019/2020 bei 1,23 Mio.m³/d bzw. bei 1,18 Mio.m³/d. Die Werte entsprechen 113,7 % bzw. 109 % der mittleren monatlichen realen Wasserabgabe von 1,08 Mio.m³/d für das Abflussjahr 2012/2013. Bild 76 stellt auch die Ergebnisse bzgl. der gespeicherten Wasservolumen im gesamten Talsperrensystem für die Jahre 2014 bis 2030 dar. Es zeigt sich, dass in den exemplarisch angenommenen trockenen Abflussjahren die Speicherkapazitäten mittels des Regelungskonzepts effizient genutzt und das Reservevolumen eingehalten werden können.

Zum anderen besteht selbst in den angenommenen trockenen Abflussjahren noch Spielraum für die Wasserversorgung.

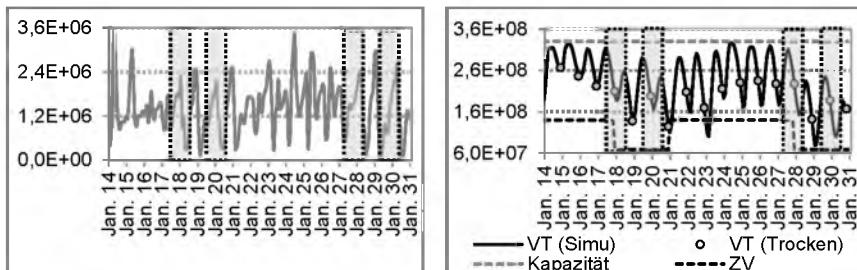


Bild 76: Simulierte Wasserabgabe aus dem Talsperrensystem [m^3/d] und gespeicherte Wasservolumen in [m^3]

VT (Simu): gesamtes simulierte Wasservolumen; VT (Trocken): gesamtes zu erreichendes Wasservolumen am Ende der Trockenzeit; Kapazität: gesamte Speicherkapazität; ZV: Zielvolumen

Entwicklung der Stromproduktion der fünf Wasserkraftwerke

Die Abnahme der Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem (Bild 76) infolge der angenommenen trockenen Abflussjahre haben großen Einfluss auf den Durchfluss in den Wasserkraftwerken. Der mittlere monatliche Durchfluss liegt für die angenommenen Trockenabflussjahre 2019/2020 und 2029/2030 mit 3,6 % (257120 m^3/d) bzw. 2,6 % (185696 m^3/d) unter den mittleren monatlichen simulierten Durchflussmengen von 7,2 Mio. m^3/d des Abflussjahres 2012/2013.

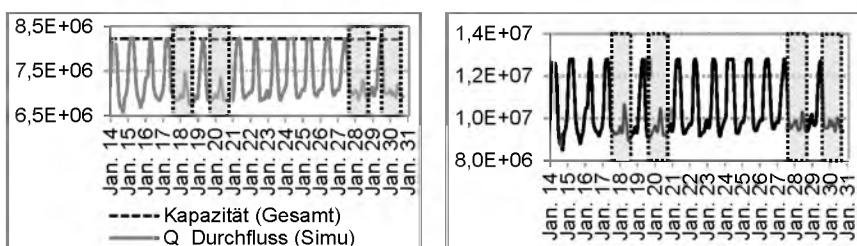


Bild 77: Simulierte Durchflüsse in [m^3/d] (links) und mittlere monatliche simulierte Stromerzeugung in [kWh/d] (rechts) in den fünf Wasserkraftwerken

Kapazität (Gesamt): Summe der einzelnen maximalen Kapazitäten; Q_Durchfluss (Simu): simulierte Durchflüsse in den fünf Wasserkraftwerken

Es zeigt sich auch, dass sich die Durchflussmengen in den Wasserkraftwerken ab Mai 2019 bzw. Mai 2029 aufgrund des Anstiegs der Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem erholt haben. Bild 77 zeigt auch die Effekte der angenommenen Dürre-

periode auf die Stromerzeugung – im Vergleich zu normalen und feuchten Abflussjahren – im Rahmen dieses Szenarios. Während des angenommenen trockenen Abflussjahres 2019/2020 liegt die simulierte Stromproduktion mit 3.481.901 MWh 1,3% unter der realen Stromproduktion des normalen Abflussjahres 2012/2013 (3.527.540 MWh). Im Vergleich zum angenommenen normalen Abflussjahr 2018/2019 wirkt sich das angenommene trockene Abflussjahr 2019/2020 deutlich auf die Stromproduktion aus und liegt 8,5 % (324.691 MWh) unter der simulierten Stromproduktion während des angenommenen normalen Abflussjahres 2018/2019 (3.806.592 MWh).

Die Trinkwasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Huachipa“

Bild 78 stellt die simulierten Entnahmen in den Wasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ und „Huachipa“ für die Jahre 2014 bis 2030 dar. Ab 2017 wird die maximale Kapazität von „La Atarjea“ vollständig ausgeschöpft. Demgegenüber wird die Wasseraufbereitungsanlage „Huachipa“ ab 2016 genügend Kapazität für die Sicherstellung der mittel- und langfristigen Wasserversorgung der Stadt, insbesondere der nördlichen Stadtteile, zur Verfügung stellen können.

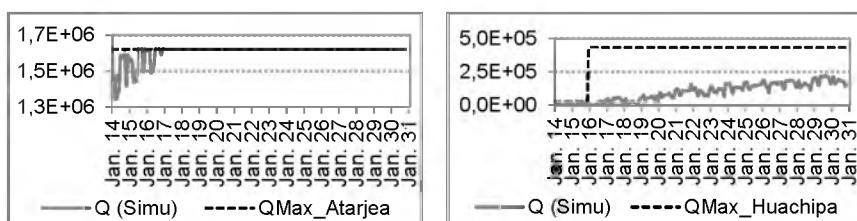


Bild 78: Simulierte Wasserentnahmen der Wasseraufbereitungsanlagen „La Atarjea“ (links) und „Huachipa“ (rechts) in $[m^3/d]$

Q (Simu): simulierte Wasserentnahmen; QMax_Atarjea: maximale Entnahmekapazität der Wasseraufbereitungsanlage „La Atarjea“; Qmax_Huachipa: maximale Entnahmekapazität der Wasseraufbereitungsanlage „Huachipa“

Daraus lässt sich schließen, dass mit der vollständigen Ausschöpfung von „Huachipa“ und der Erhöhung der Entnahmekapazität von „La Atarjea“ die Grundwasserressourcen der Stadt nachhaltiger bewirtschaftet werden könnten. Die Untersuchung derartiger Maßnahmen verlangt jedoch zum einem eine detaillierte Modellierung der Grundwasserressourcen (z. B. mittels dynamischen Prozessmodelle) und zum anderen eine detaillierte Abbildung und Untersuchung der Bewirtschaftung von Oberflächengewässern und Grundwasser und deren Verteilung auf kleinerer räumlicher Skala (z. B. Stadtteilebene). Darauf aufbauend lassen sich die im Modell implementierten Steuerungsstrategien zur Ressourcenbewirtschaftung von Grundwasser (Bewirtschaftung nach Priorisierung) verfeinern und die Verteilung von

Ressourcen genauer abbilden. Im Rahmen des Szenarios S2 (vgl. Abschnitt 4.5.3) wird die Wirkung der Änderung der Bewirtschaftung nach Priorisierung hin zu gleichmäßiger Bewirtschaftung in Zusammenhang mit weiteren Maßnahmen (z. B. Implementierung von Wassersparmaßnahmen in den Haushalten) auf die regionale Grundwasserbewirtschaftung grob untersucht und abgeschätzt. Eine detaillierte Untersuchung der regionalen und lokalen Grundwasserressourcen mittels Prozessmodellen wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Entwicklung der Trinkwasserbedarfe und -angebote

Das gesamte Trinkwasserangebot ergibt sich aus der Summe der Trinkwasserproduktion in den Anlagen „La Atarjea“, „Chillon“ und „Huachipa“ und den Grundwasserentnahmen. In Bild 79 sind das gesamte Trinkwasserangebot zusammen mit dem Trinkwasserbedarf einschließlich der physikalischen Verluste abgebildet. Ab 2016 wird der Trinkwasserbedarf aufgrund der maximalen Wasseraufbereitungskapazitäten und Verfügbarkeit von Wasserressourcen nicht vollständig gedeckt. Eine deutliche Versorgungslücke ist ab dem angenommenen trockenen Abflussjahr 2017/2018 zu bemerken und verschärft sich weiter im Laufe dieses Szenarios. Die Versorgungslücke wird bis zu 22 % (626.703 m³/d) betragen.

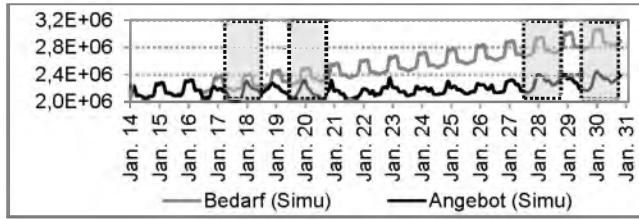


Bild 79: Simulierte Trinkwasserbedarfe und -angebote in [m³/d]

Bedarf (Simu): simulierter Trinkwasserbedarf; Angebot (Simu): simuliertes Trinkwasserangebot

Entwicklung der Kläranlage „Carapongo“

In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung des häuslichen Abwasserstroms von Lima-Ost und des Zulaufs zur Kläranlage „Carapongo“ dargestellt.

In Vergleich zum Ist-Zustand wurde für dieses Szenario die Abwasserproduktion von Lima-Ost und die Reinigungsleistung der Anlage für die angenommenen trockenen Abflussjahre 2017/2018, 2019/2020 und 2027/2028, 2029/2030 untersucht. Es ist anzumerken, dass die angenommenen trockenen Abflussjahre sich auf die Qualität des anfallenden Abwassers von Lima-Ost deutlich auswirken. Die Abbildung zeigt auch, dass aufgrund der begrenzten Entnahmekapazität der Anlage „La Atarjea“ und

der Grundwasserressourcen von Lima-Ost der Abwasseranfall von Lima-Ost von 2021 bis 2030 auch deutlich weniger ansteigen wird.

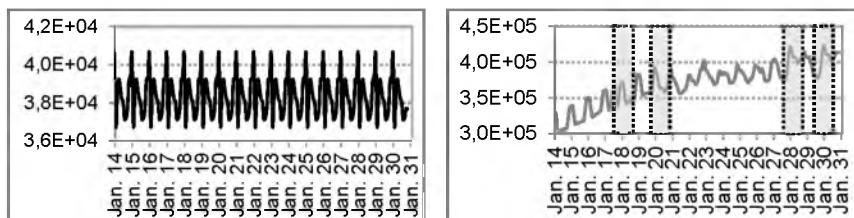


Bild 80: Simulierte Zuläufe im Zulauf der Kläranlage „Carapongo“ (links) und simulierte Abwasserströme von Lima-Ost (rechts) [m^3/d]

Infolge der Bevölkerungszunahme und der Verringerung des Trinkwasserverbrauchs und des Abwasseranfalls in den Privathaushalten steigen die Konzentrationen und Frachten von Schmutzstoffen im Zulauf der Kläranlage deutlich an. Bild 81 stellt exemplarisch die Entwicklung der CSB-Konzentrationen und -Frachten im Zulauf der Anlage dar. Wie Bild 81 zeigt, steigt die CSB-Konzentration im Zulauf der Kläranlage von 810 mg/l auf 1.087 mg/l. Ab 2026 wird die CSB-Konzentration während der Trockenzeit über dem Grenzwert von 1.000 mg/l liegen. Die daraus resultierende CSB-Fracht steigt von 29.812 kg/d auf 42.045 kg/d.

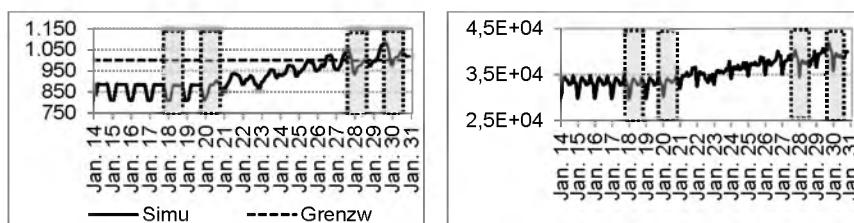


Bild 81: Simulierte CSB-Konzentrationen (links) [mg/l] und -Frachten (rechts) [kg/d] im Zulauf der Kläranlage „Carapongo“

Die CSB- und Gesamtstickstoffkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage sind in Bild 82 dargestellt. Der Anstieg der Zulaufkonzentration infolge des Bevölkerungswachstums und der Abnahme des Pro-Kopf-Trinkwasserverbrauchs in den Privathaushalten wird die Abwasserqualität im Ablauf der Kläranlage deutlich beeinflussen. Die CSB-Konzentrationen bleiben jedoch unter dem Grenzwert der peruanischen Abwasserverordnung von 200 mg/l.

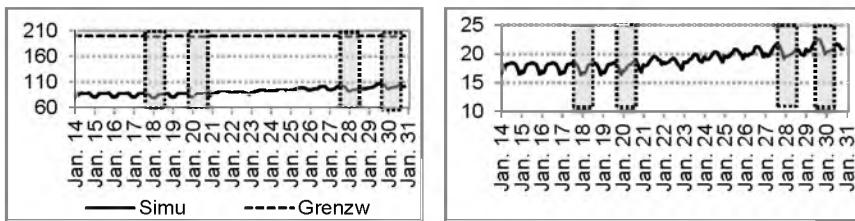


Bild 82: Simulierte CSB- und N-Konzentration [mg/l] im Ablauf von

„Carapongo“

Simu: gesamte simulierte CSB-Konzentration bzw. gesamte simulierte N-Konzentration; Grenzw.: Grenzwerte der peruanischen Abwasserverordnung

Entwicklung des Stromverbrauchs des Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssystems

Der Anstieg der simulierten Grundwasserentnahmen für die Jahre 2014 bis 2016 trägt – im Vergleich zum Jahr 2013 (152.325 MWh) – zu einer deutlichen Erhöhung des Stromverbrauchs des Trinkwassersystems bei. Der simulierte Stromverbrauch des Trinkwassersystems liegt 2014 und 2015 bei 186.704 MWh bzw. 185.000 MWh (Bild 83). In den angenommenen trockenen Abflussjahren 2017/2018 und 2019/2020 sowie 2027/2028 und 2029/2030 wird der Stromverbrauch infolge der Verringerung des Wasserangebotes aus Oberflächengewässern und der Zunahme der Grundwasserbewirtschaftung steigen.

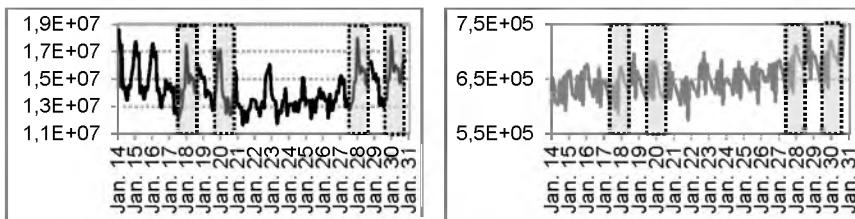


Bild 83: Simulierter Stromverbrauch des Trinkwassersystems (links) und des Kanalnetzes (rechts) in [kWh/Monat]

Die Werte enthalten nicht den Transport vom Fremdwasser.

Der Stromverbrauch des Kanalnetzes variiert infolge der Bevölkerungszunahme und des Abwasseranfalls zwischen 574.697 kWh/Monat und 747.412 kWh/Monat während des gesamten Simulationszeitraums (siehe Bild 83). Da ein großer Anteil des Abwassers im Freigefälle transportiert wird, stellt das Kanalnetz eines der am wenigsten intensiven Stromverbraucher (im Durchschnitt 0,01 kWh/m³) dar.

4.5.3 Ergebnisse S2 mit Maßnahmen (2014 – 2030)

Dieses Szenario berücksichtigt die Implementierung verschiedener technischer und nicht-technischer Maßnahmen (Tabelle 14 und Tabelle A 41, Anhang A). Um die Auswirkungen der Maßnahmen zu zeigen, werden die Ergebnisse von Szenario S2 mit denen von Szenario S1 verglichen.

Entwicklung des Wasserbedarfs und -verbrauchs

Bild 84 stellt den Wasserbedarf einschließlich und ausschließlich der physikalischen Wasserverluste gegenüber. Durch die Implementierung der Maßnahmen wird der Wasserbedarf, einschließlich der Wasserverluste, um zwischen 4,4 % ($90.052 \text{ m}^3/\text{d}$) und 7,4 % ($227.486 \text{ m}^3/\text{d}$) – im Vergleich zum Szenario ohne Maßnahmen – reduziert. Der Wasserbedarf der Privathaushalte und Nicht-Haushalte, ausschließlich der Wasserverluste, liegt beim Szenario mit allen Maßnahmen im Durchschnitt um 4,2 % ($76.418 \text{ m}^3/\text{d}$) unter dem Bedarf des Szenarios ohne Maßnahmen.

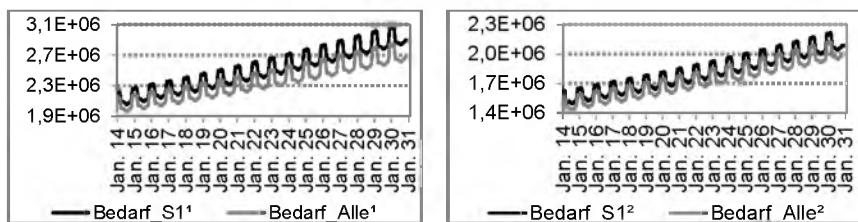


Bild 84: Wasserbedarf der Privathaushalte und Nicht-Haushalte in [m^3/d]

Bedarf_S1¹ und Bedarf_S1²: simulierter Wasserbedarf einschließlich der physikalischen Verluste bzw. ausschließlich der physikalischen Wasserverluste; Bedarf_Alle¹ und Bedarf_Alle²: simulierter Wasserbedarf mit allen Maßnahmen einschließlich der physikalischen Verluste bzw. ausschließlich der physikalischen Wasserverluste

Bild 85 zeigt die Entwicklung des Trinkwasserbedarfs und -verbrauchs der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz für das Szenario mit allen Maßnahmen. Die Implementierung aller Maßnahmen führt zu positiven Effekten sowohl auf der Seite der Nachfrage als auch des Angebotes. Hier werden die angenommen trockenen Abflussjahre 2017/2018 und 2019/2020 keinen Einfluss auf die Wasserversorgung und den Wasserverbrauch der Stadt haben. Und es besteht die Aussicht, dass der Wasserbedarf der Stadt zu 100 % gedeckt werden kann. Jedoch werden sich die angenommenen trockenen Abflussjahre 2027/2028 und 2029/2030 temporär auf die Wasserversorgung und den Wasserverbrauch der Stadt auswirken.

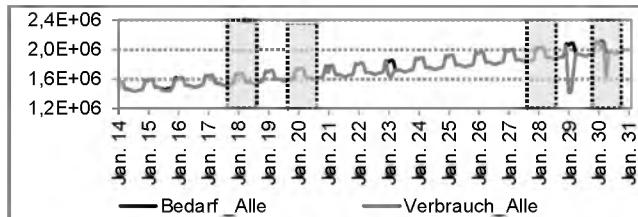


Bild 85: Simulierter Trinkwasserbedarf und -verbrauch der Privathaushalte und Nicht-Haushalte im Trinkwassernetz in [m³/d]

Bedarf_Alle und Verbrauch_Alle: simulierter Wasserbedarf bzw. -verbrauch mit allen Maßnahmen

Bild 86 fasst die simulierten Wasserbedarfe und -verbräuche der Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz zusammen. Es zeigt sich, dass die Maßnahmen zum Schließen der Versorgungslücke in den Privathaushalten – im Vergleich zum Szenario ohne Maßnahmen – führen werden.

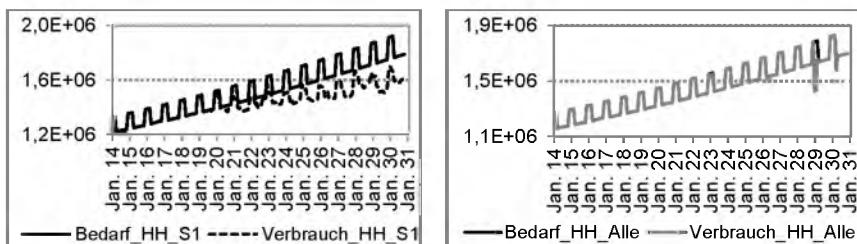


Bild 86: Simulierter Trinkwasserbedarf und -verbrauch der Privathaushalte für die Szenarien ohne (links) und mit allen Maßnahmen (rechts) in [m³/d]

Bedarf_HH_S1 und Verbrauch_HH_S1: simulierter Wasserbedarf bzw. -verbrauch der Privathaushalte ohne Maßnahmen; Bedarf_HH_Alle und Verbrauch_HH_Alle: simulierter Wasserbedarf bzw. -verbrauch der Privathaushalte mit allen Maßnahmen

Bild 87 stellt die Entwicklung des gesamten Abwasseranfalls im Kanalnetz sowie den Anteil der Privathaushalte mit Anschluss an das Kanalnetz dar. Es zeigt sich, dass durch den Anstieg des Trinkwasserangebots und -verbrauchs durch die Implementierung aller Maßnahmen mehr Abwasser in den Privathaushalten und Nicht-Haushalten – im Vergleich zum Szenario ohne Maßnahmen – generiert wird. Unter Berücksichtigung aller Maßnahmen liegt der gesamte Abwasserstrom im Durchschnitt bei 1,63 Mio.m³/d.

Die Nutzung von Wasserspartoiletten in den Privathaushalten (Maßnahmen MB1, vgl. Tabelle A 41, Abschnitt 6.1) führt zu einer Verringerung des Abwasseranfalls um 2,3 % (35.218 m³/d). Die angenommenen trockenen Abflussjahre wirken sich auf den häuslichen Abwasseranfall kaum aus.

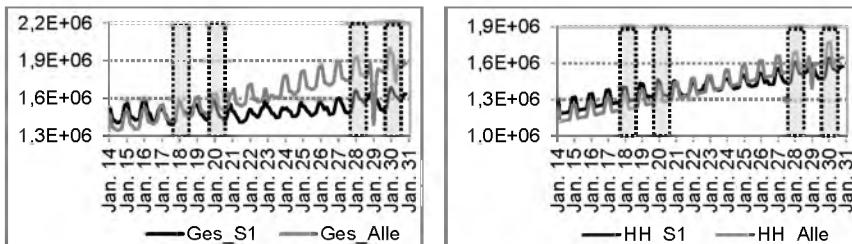


Bild 87: Gesamter und häuslicher Abwasserstrom in [m³/d]

*Ges_S1 und HH_S1: gesamter bzw. häuslicher simulierter Abwasseranfall ohne Maßnahmen;
Ges_Alle und HH_Alle: gesamter bzw. häuslicher simulierter Abwasseranfall mit allen Maßnahmen*

Bild 88 zeigt die Entwicklung des CSB und des Gesamtstickstoffs im häuslichen Abwasser. Wie bereits erwähnt kann der Wasserbedarf der Privathaushalte mit der Implementierung aller Maßnahmen – im Vergleich zum Szenario ohne Maßnahmen – zumeist gedeckt werden (vgl. Bild 86). Dies führt dazu, dass die Schmutzstoffkonzentrationen im häuslichen Abwasser während der Sommer- und Wintermonate nahezu konstant bleiben werden. Die Einführung wassersparender Toiletten führt durch Verringerung des Pro-Kopf-Wasserverbrauchs in den Privathaushalten zu einer leichten Erhöhung der Schmutzstoffkonzentrationen.

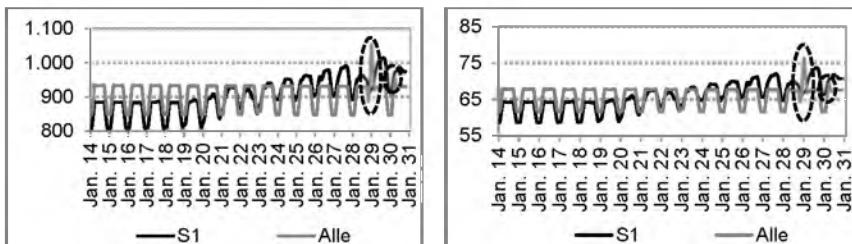


Bild 88: Simulierte CSB- und Gesamtstickstoffkonzentration im häuslichen Abwasser in [mg/l]

S1: ohne Maßnahmen; Alle: mit allen Maßnahmen

Entwicklung der Regelung der Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Rimac

Bild 89 zeigt die gesamte Wasserabgabe aus dem Speichersystem. Beim Vergleich der Szenarien mit und ohne Maßnahmen wird deutlich, dass ab 2020 und während der Trockenzeit (Mai bis November) die Wasserabgaben im Szenario ohne Maßnahmen in der Regel unter den Abgaben im Szenario mit allen Maßnahmen liegen werden. Bei Nutzung aller Maßnahmen wird die gesamte Wasserabgabe aus

dem Talsperrensystem im Durchschnitt um 8,6 % (123.027 m³/d) steigen. Gründe dafür sind die Erweiterung der Entnahmekapazität und der Bau von Wasser- aufbereitungsanlagen sowie die gewählte niedrigere Priorisierung der Bewirtschaftung der Grundwasserbrunnen.

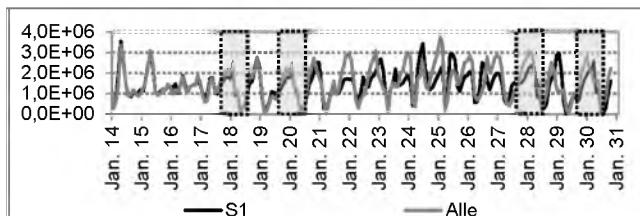


Bild 89: Simulierte Wasserabgaben aus dem Talsperrensystem in [m³/d]

S1: ohne Maßnahmen; Alle: mit allen Maßnahmen

Bild 90 zeigt die gesamten gespeicherten Wasservolumen. Während der angenommenen trockenen Abflussjahre 2017/2018 und 2019/2020 führen die angesetzten Maßnahmen, insbesondere der Ausbau der Entnahmekapazität von Wasser- aufbereitungsanlagen, zu einer deutlich stärkeren Belastung des Talsperrensystems.

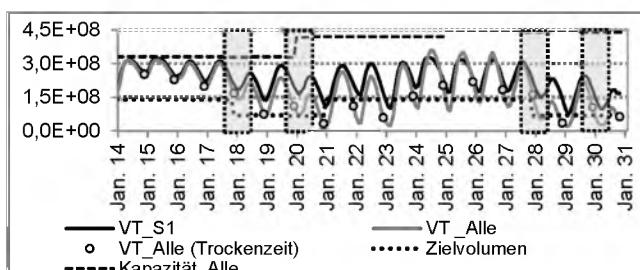


Bild 90: Entwicklung der gespeicherten Wasservolumen in [m³]

VT_S1 und VT_Alle: gesamte gespeicherte Wasservolumen ohne Maßnahmen bzw. mit allen Maßnahmen; VT_Alle (Trockenzeit): gesamte gespeicherte Volumen am Ende der Trockenzeit mit allen Maßnahmen; Zielvolumen: zu erreichendes Zielvolumen am Ende der Trockenzeit (Ende November); Kapazität_Alle: maximale Speicherkapazität des Talsperrensystems mit allen Maßnahmen

Das Bild zeigt auch, dass mit der Implementierung aller Maßnahmen und bei der angesetzten hydrologischen Entwicklung die vorhandenen Speicherkapazitäten im Talsperrensystem nicht vollständig ausgeschöpft werden können. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die natürlichen Wasserangebote zukünftig nicht ausreichen werden. Die Zunahme der Bevölkerung erfordert eine Erhöhung der Reserven für die jeweiligen Folgejahre, was letztendlich aber zu einer Verschärfung der oben dar-

gestellten Situation bezüglich Wasserversorgung und Stromproduktion führen würde. Damit ergibt sich ein Zielkonflikt, der hier jedoch nicht weiter untersucht wurde.

Entwicklung der Durchflüsse und der Stromproduktion in den fünf Wasserkraftwerken

Bild 91 zeigt eine Gegenüberstellung der Durchflussmengen in den fünf Wasserkraftwerken. Es zeigt sich, dass unter Berücksichtigung der Maßnahmen mehr Wasser zur Stromproduktion während der Trockenzeit genutzt werden könnte. Hier steigen die simulierten Durchflüsse im Durchschnitt um 1,15 % (83.821 m³/d).

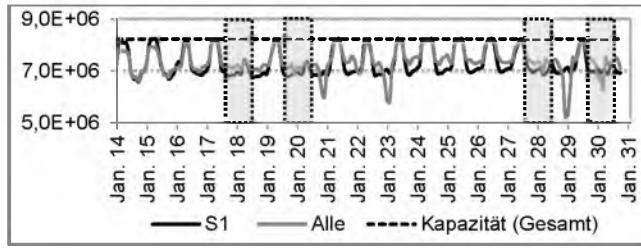


Bild 91: Entwicklung der Durchflüsse in den fünf Wasserkraftwerken in [m³/d]
S1 und Alle: gesamte simulierte Durchflüsse ohne Maßnahmen bzw. mit allen Maßnahmen; Kapazität (Gesamt): maximale Kapazität

Wie oben dargelegt, wird infolge der angenommenen trockenen Abflussjahre und später (vgl. Januar 2023) weniger Wasser im Talsperrensystem gespeichert werden. Dies wirkt sich wiederum nicht nur auf die Wasserabgaben und die Wasserversorgung der Stadt, sondern auch auf die Durchflüsse und die Stromproduktion in den Wasserkraftwerken aus (Bild 92). Die Implementierung aller Maßnahmen führt zum Anstieg der Stromproduktion um durchschnittlich 6 % (590.948 kWh/d).

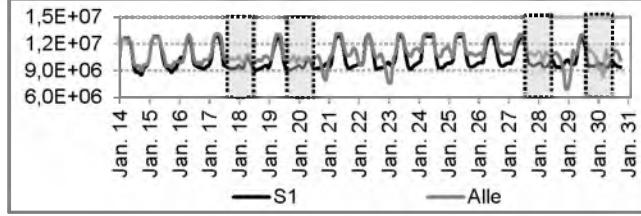


Bild 92: Stromerzeugung in den Wasserkraftwerken in [kWh/d]
S1 und Alle: gesamte simulierte Stromproduktion ohne Maßnahmen bzw. mit allen Maßnahmen

Entwicklung der Grundwasserentnahmen

Die Änderung der Steuerungsstrategien zur Bewirtschaftung der Grundwasserbrunnen von Lima-Nord trägt zu einer besseren und nachhaltigeren Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen der Stadt bei (Bild 93). Die Wasserentnahmen liegen unter Berücksichtigung aller Maßnahmen im Durchschnitt bei $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$, und damit deutlich unter den durchschnittlichen Wasserentnahmen von $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ für das Szenario ohne Maßnahmen. Beim Auftreten der angenommenen trockenen hydrologischen Jahren würden die Grundwasserentnahmen jedoch über dem empfohlenen Wert von $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ($259.200 \text{ m}^3/\text{d}$) liegen.

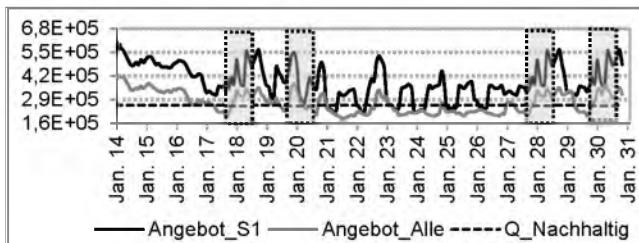


Bild 93: Simulierte Grundwasserentnahmen in [m^3/d]

Angebot_S1 und Angebot_Alle: simulierte Trinkwasserangebot (Grundwasser) ohne Maßnahmen bzw. mit allen Maßnahmen; Q_Nachhaltig: nachhaltige Grundwasserentnahme nach SEDAPAL

Entwicklung des Trinkwasserangebots

Bild 94 zeigt eine Gegenüberstellung des Wasserbedarfs der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz und des gesamten Trinkwasserangebots unter Berücksichtigung aller Maßnahmen. Die Erweiterung und der Bau von Wasseraufbereitungsanlagen führen zu positiven Effekten für die Wasserversorgung der Stadt. Die Abbildung zeigt auch, dass durch die Implementierung aller Maßnahmen die angenommenen trockenen Abflussjahre 2017/2018 und 2019/2020 wenig Einfluss auf die Wasserversorgung haben werden und dass die Wasserbedarfe zumeist vollständig gedeckt werden könnten. Die Aufbereitungskapazitäten geplanter Trinkwasseraufbereitungsanlagen werden nicht vollständig ausgeschöpft.

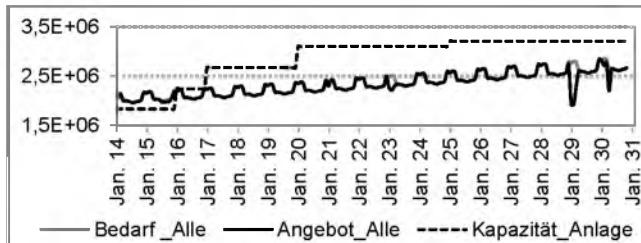


Bild 94: Wasserbedarf und -angebot der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Verteilungsnetz in [m³/d]

Bedarf_Alle und Angebot_Alle: simulierter Trinkwasserbedarf bzw. simuliertes Trinkwasserangebot mit allen Maßnahmen; Kapazität_Anlage: gesamte maximale Entnahmekapazität der Trinkwasser-aufbereitungsanlagen mit allen Maßnahmen

In der Bild 95 sind die Wasserbedarfe und -angebote der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz für das Szenario mit Maßnahmengruppe MA und MB (siehe Tabelle 14) dargestellt. Allein der Bau neuer Wasserversorgungsinfrastrukturen wie Mehrwasserentsalzungsanlagen und weiterer Talsperren sowie die Erhöhung der Entnahme- und Aufbereitungskapazität von Wasseraufbereitungsanlagen (MA) ohne die Verringerung der Trinkwasserverluste und des Trinkwasserbedarfs in den Privathaushalten (z. B. wassersparende Toiletten, MB) wird nicht ausreichend sein, um den Wasserbedarf der Stadt vollständig zu decken.

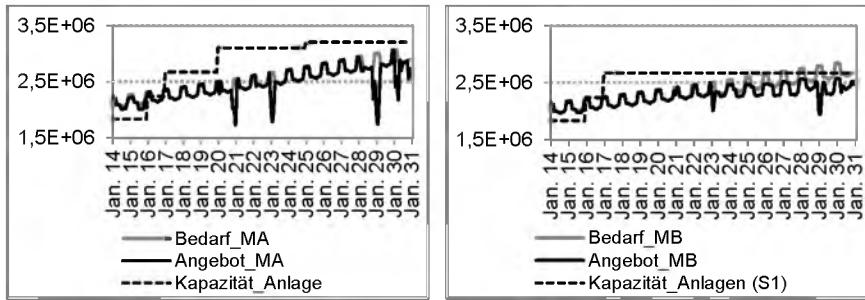


Bild 95: Wasserbedarf und -angebot der Privathaushalte und Nicht-Haushalte mit Maßnahmen der Gruppen MA und MB in [m³/d]

Bedarf_MA und Angebot_MA: simulierter Trinkwasserbedarf bzw. simuliertes Trinkwasserangebot mit Maßnahmen MA; Bedarf_MB und Angebot_MB: simulierter Trinkwasserbedarf bzw. simuliertes Trinkwasserangebot mit Maßnahmen MB; Kap_Anlage: gesamte maximale Entnahmekapazität der Trinkwasseraufbereitungsanlagen mit Maßnahmen MA bzw. MB

Entwicklung der Kläranlage „Carapongo“

Die Zulaufmengen zur Kläranlage werden sich nicht gravierend ändern. Bild 96 zeigt die simulierten Abwasserströme der Privathaushalte von Lima-Ost. Es zeigt sich, dass durch den Anstieg des Trinkwasserangebots und -verbrauchs durch die Implementierung aller Maßnahmen die Abwassermengen steigen werden. Aufgrund der Verringerung des Trinkwasserverbrauchs in den Privathaushalten liegt der Abwasseranfall von Lima-Ost jedoch im Durchschnitt bei $370.744 \text{ m}^3/\text{d}$ und damit nur marginal um 0,16 % ($594 \text{ m}^3/\text{d}$) unter dem durchschnittlichen Abwasseranfall für das Szenario ohne Maßnahmen. Daraus lässt sich schließen, dass die Implementierung weiterer Wassersparmaßnahmen zu weiterer Reduktion des Trinkwasserverbrauchs und des Abwasseranfalls beitragen könnte.

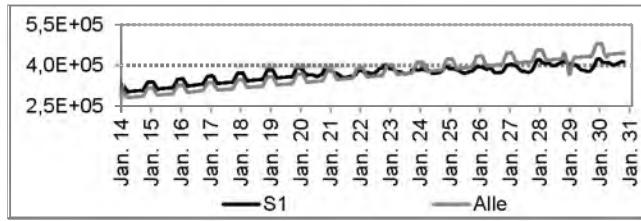


Bild 96: Simulierte Abwasserströme der Privathaushalte von Lima-Ost in [m^3/d]
S1 und Alle: simulierte Abwasserströme von Lima-Ost ohne bzw. mit allen Maßnahmen

Bild 97 stellt die CSB-Konzentration und -Frachten im Zulauf der Kläranlage dar. Mittels des transsektoralen Modells lassen sich die Auswirkungen von Wasser-Managementstrategien aber auch von externen Einflussgrößen (z. B. Wasserknappheit) auf die Zusammensetzung des Abwassers und auf die Belastung und Reinigungsleistung der Kläranlage abbilden und quantifizieren. Die angenommenen trockenen Abflussjahre 2017/2018 und 2019/2020 haben wenig Einfluss auf die Abwasserqualität während und nach diesem Zeitraum. Es zeigt sich auch, dass mit Ausnahme des angenommenen trockenen Abflussjahres 2029/2030 die CSB-Konzentration unter dem Grenzwert von 1000 mg/l der peruanischen Abwasserverordnung für die Einleitung von Abwässern in die Kanalisation liegen würde.

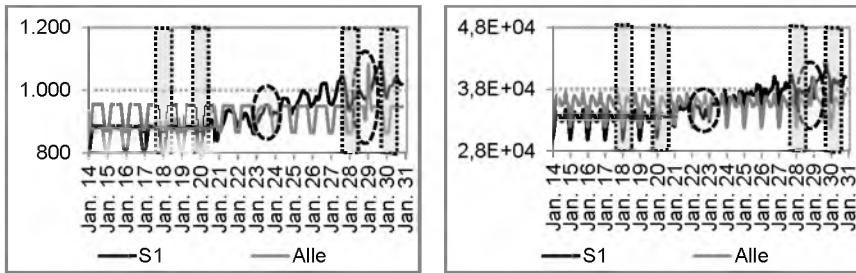


Bild 97: Simulierte CSB- Konzentrationen in [mg/l] und CSB-Frachten in [kg/d] im Zulauf von „Carapongo“

S1 und Alle: simulierte CSB-Konzentrationen und CSB-Frachten im Zulauf der Kläranlage ohne bzw. mit allen Maßnahmen

Bild 98 stellt die CSB-Konzentration und -Frachten im Ablauf der Kläranlage dar. Die simulierten CSB-Konzentrationen liegen für den gesamten Zeitraum durchgängig unter dem Grenzwert von 200 mg/l der peruanischen Abwasserverordnung für die Einleitung von Abwässern in Vorfluter.

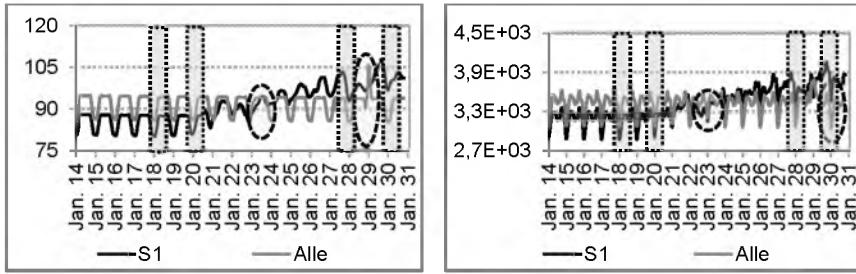


Bild 98: Simulierte CSB-Konzentration in [mg/l] und CSB-Fracht in [kg/d] im Ablauf von „Carapongo“

S1 und Alle: mittlere monatische CSB-Konzentration und CSB-Fracht im Ablauf der Kläranlage ohne bzw. mit allen Maßnahmen

Entwicklung des Stromverbrauchs des Wasserver- und Abwasser-entsorgungssystems

Im Vergleich zum Szenario ohne Maßnahmen wurden die Grundwasserressourcen von Lima-Nord mit der niedrigsten Priorität bewirtschaftet. Diese Steuerungsstrategie führt zu einer deutlichen Verringerung des Stromverbrauchs des Trinkwassersystems für den Zeitraum von Januar 2014 bis Dezember 2016 (siehe Bild 99). Der Stromverbrauch sinkt um 12,5 % (1.904.900 kWh/Monat). Diese Situation ändert sich später bei den angenommenen trockenen Abflussjahren (2027/2028 und 2029/2030) sowie bei der Inbetriebnahme energieintensiver Entsalzungsanlagen.

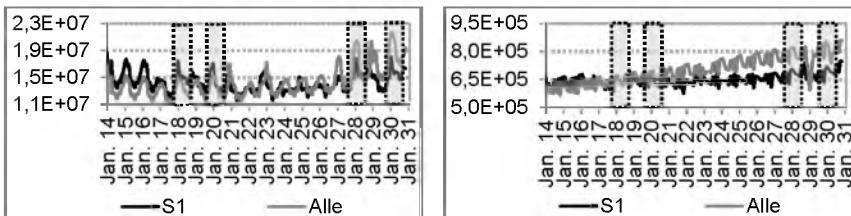


Bild 99: Simulierter Stromverbrauch des Trinkwassersystems (links) und des Kanalnetzes (rechts) in [kWh/Monat]

S1: Stromverbrauch des Trinkwassersystems bzw. des Kanalnetzes ohne Maßnahmen; Alle: Stromverbrauch des Trinkwassersystems bzw. des Kanalnetzes mit allen Maßnahmen

Es zeigt sich auch, dass der Stromverbrauch beim Auftreten der trockenen Abflussjahre 2017/2018 und 2019/2020 von 11.644.910 kWh/Monat auf 14.719.529 kWh/Monat und die damit verbundene Zunahme der Grundwasserentnahmen von 11.789.840 kWh/Monat auf 15.042.469 kWh/Monat steigen werden. Unter Berücksichtigung aller Maßnahmen wird der Stromverbrauch des Trinkwassersystems für die angenommenen trockenen hydrologischen Jahre 2027/2028 und 2029/2030 von 13.703.096 kWh/Monat auf 20.600.438 kWh/Monat bzw. von 15.761.627 kWh/Monat auf 21.731.192 kWh/Monat weiter zunehmen. Der Stromverbrauch des Kanalnetzes wird ebenfalls steigen und liegt im Durchschnitt über den gesamten Simulationszeitraum bei 702.483 kWh/Monat.

4.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel befasste sich mit der Anwendbarkeit und Erprobung des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes, der auf die Wasser- und Stromversorgung sowie auf die Abwasserentsorgung und Abwasserreinigung der Stadt auf Stadtbezirksebene angewendet wurde.

Mittels der Prozessmodelle für Endverbraucher (siehe Abschnitt 4.4.5) konnten verschiedene Wasserver- und Abwasserentsorgungsformen und die Ausstattung der Privathaushalte je nach sozioökonomischer Bevölkerungsschicht berücksichtigt werden. Darauf aufbauend wurden einzelne Wasser- und Strombedarfe sowie einzelne Grau-, Schwarz- und Abwasseranfälle in Lima für einen Zeitraum von 23 Jahren (2007–2030) in Monatsschritten quantitativ und qualitativ bilanziert. Voraussetzung war die hinreichend genaue Abbildung des Ist-Zustands des Systems. Im vorliegenden Fall betrifft das einen Zeitraum von mehreren Jahren (2007–2013). Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden die Schätzungen von [89] bzgl. Bevölkerung, Trinkwasserbedarf und Abwasseranfall in Lima sowie Messwerte über die Trinkwas-

serproduktion und Abwasserströme des Wasser-unternehmens SEDAPAL herangezogen. Damit konnten neue Daten, wie zum Beispiel die Zusammenhänge zwischen Wasserversorgung und -bedarf und Abwasserentsorgung und -reinigung sowie saisonale Schwankungen des Wasser- und Strombedarfs, generiert werden. Darüber hinaus konnten die Nutzungsanteile des Trinkwasserverbrauchs in den Privathaushalten von Lima mit Anschluss an das Trinkwassernetz geschätzt werden. Im Jahre 2013 wurden Durchschnitt 32,8 % (416.078,5 m³/d) und 32,7 % (414.662 m³/d) des gesamten Verbrauchs für Duschen/Körperpflege bzw. für Wäschewaschen verwendet. Der Trinkwasserverbrauch zur Toilettenspülung lag mit einem Anteil von ca. 29 % (370.090,6 m³/d) an dritter Stelle, gefolgt vom Trinkwasserverbrauch zum Kochen/Trinken mit einem Anteil von 5,3 % (67.313 m³/d). Damit konnten weitere Informationen zur Planung von Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen bereitgestellt werden.

Neben den Stadtbezirken wurden das Talsperrensystem und die Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet des Flusses Rimac sowie das Aquifersystem im Stadtgebiet von Lima berücksichtigt. Für die Regelung der Wasserabgabe aus dem Talsperrensystem wurde der im Abschnitt 3.9 diskutierte Regelungsansatz angewendet. Mit der Anwendung wurde untersucht, ob das Regelungskonzept – im Vergleich zum manuellen Ist-Betrieb – zu einer besseren Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Talsperrensystem bei Gewährleistung der Bewirtschaftungsziele führt. Es zeigte sich, dass mittels des Regelungsansatzes zwischen 2,3 % (3,9 Mio.m³) und 20,4 % (33,5 Mio.m³) mehr Wasser am Ende der Entleerungsperioden zurückgehalten werden konnte.

Das Modell des Talsperrensystems wurde mit einem Modell des urbanen Wasser- und Stromversorgungssystems der Stadt gekoppelt. Damit konnten die gespeicherten Wasservolumina in den Talsperren in Zusammenhang mit der variierenden Nachfrage nach Wasser und Strom der Stadt und dem variierenden natürlichen Wasserdargebot untersucht werden.

Im Rahmen zweier Szenarien wurden mögliche Auswirkungen zukünftiger Bevölkerungsentwicklungen und klimatischer Änderungen sowie die Wirksamkeit technischer und nicht-technischer Maßnahmen (siehe Abschnitt 4.4.4) auf die zukünftige Wasser- und Stromversorgung und auf die Abwasserentsorgung und -reinigung der Stadt untersucht. Nach dem Szenario ohne Maßnahmen wird der Trinkwasserbedarf der Stadt von 2,2 Mio. m³/d (Januar 2014) auf 2,9 Mio. m³/d (Dezember 2030) steigen. Hier wirken sich die zwei angenommenen trockenen Abflussjahre 2027/2028 und 2029/2030 deutlich auf das Wasserangebot und die Wasserversorgung der Stadt aus. Während des angenommenen trockenen Abflussjahres 2029/2030 würde die Versorgungslücke zwischen 18 % (516.846 m³/d) und 22 % (677.568 m³/d) schwanken. Im Vergleich zum angenommenen normalen Abflussjahr 2018/2019 wirkt sich das angenommene trockene Abflussjahr 2019/2020 deutlich auf die Stromproduktion

aus, die dann um 8,5% (324.691 MWh) geringer als die simulierte Stromproduktion während des angenommen normalen Abflussjahres 2018/2019 (3.806.592 MWh) ausfällt. Es hat sich auch gezeigt, dass die Implementierung aller Maßnahmen zu positiven Effekten sowohl auf der Seite der Nachfrage als auch des Angebotes führt. Die angenommenen trockenen Abflussjahre 2027/2028 und 2029/2030 werden sich nur temporär auf die Wasserversorgung und den Wasserverbrauch sowie auf die Abwasserentsorgung und -reinigung der Stadt auswirken. Unter Berücksichtigung der Maßnahmen kann mehr Wasser zur Stromproduktion während der Trockenzeit genutzt werden. Hier steigen die simulierten Durchflüsse im Durchschnitt um 1,15 % (83.821 m³/d).

Aus dem Anwendungsbeispiel lässt sich schlussfolgern, dass der hier vorgestellte Ansatz einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Interdependenzen und der Wechselwirkungen zwischen sektoralen und transsektoralen Infrastrukturen sowie zur Unterstützung von Maßnahmenplanungen leistet. Wirksame Maßnahmen zur Ressourcenschonung und bestmöglichen Infrastrukturauslastung wurden identifiziert und quantitativ bewertet. Das Anwendungsbeispiel bewies aufgrund der Komplexität sektoraler wasser- und energiewirtschaftlicher Infrastrukturen und der Menge der verwendeten Daten noch einmal nachdrücklich den Bedarf an und die Rolle integrierter modellgestützter Ansätze.

5 Zusammenfassung und weiterführende Arbeiten

5.1 Zusammenfassung und Beiträge der Arbeit

Die mathematische Materialflussanalyse (MMFA) (Abschnitt 3.3.2) ist ein skalierbarer und verallgemeinerter Ansatz, der die Modellierung technischer und natürlicher Systeme mit beliebigen Komplexitäten ermöglicht. Damit lassen sich Flüsse von Stoffen und Energie auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen bilanzieren. Prozessmodelle (Abschnitt 3.3.3) bieten die Möglichkeit, die Zustände sektoraler Systemkomponenten unter variierenden Randbedingungen abzubilden und den Einfluss von Systemtreibern qualitativ und quantitativ zu bewerten. Darüber hinaus lassen sich aus den Systemzuständen Kapazitäten und Bedarfe ableiten.

In dieser Arbeit werden folgende Eigenschaften verwendet:

- Räumliche Auflösung: Stadtteilebene, Stadtbene
- Zeitliche Auflösung: Monat, Jahre, Jahrzehnte
- Randbedingungen: demographisch, betrieblich, klimatisch, technisch
- Systemtreiber: Endverbraucher (Privathaushalte und Nicht-Haushalte)

In der vorliegenden Arbeit wurde ein modellbasiertter Ansatz vorgestellt, der die Beschreibung von Bedarfen, Kapazitäten und deren Verknüpfungen auf makroskopischer Ebene (sektorale und transsektorale Infrastrukturen) und zugleich die Abbildung einzelner sektoraler Komponenten (Endverbraucher, verfahrenstechnische Anlagen) durch Prozessmodelle (Prozessebene) erlaubt. Der Ansatz greift die bereits in [11] vorgeschlagene Integration von Prozessmodellen in die MMFA auf und entwickelt sie durch ein generisches Steuerungskonzept zur Bewirtschaftung von Kapazitäten und Deckung von Bedarfen (Abschnitt 3.7) weiter. Im Vergleich zur klassischen MFA und MMFA lässt sich mit dem hier vorgestellten Ansatz die schwierige Ermittlung von Transferkoeffizienten für Knoten, die für betrachtete Systeme die Verteilung von Ressourcen realisieren, zu jedem Zeitpunkt automatisch durchführen.

Mittels des Steuerungskonzepts lassen sich MMFA und Prozessmodelle aufwandsarm koppeln. Dies gilt umso mehr, wenn ein größerer Zeitbereich simulativ untersucht werden soll. Hier ergeben sich, bedingt durch die veränderlichen Zustände der Prozessmodelle, zur Laufzeit neue Konstellationen von Kapazitäten und Bedarfen. So können resultierende Stoff- und Energieströme automatisch bilanziert und realitätsnah abgebildet werden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, dominierende Parameter der Systemtreiber und deren Auswirkungen auf Stoff- und Energieströme und Systemzustände zu Identifizieren. Das trägt zum besseren Verständnis der komplexen Wechselwirkungen in gekoppelten Systemen bei.

Für die Modellierung der Systemtreiber (Endverbraucher) und verfahrenstechnischen Anlagen (wie Talsperrensysteme und Kläranlagen) wurden sowohl etablierte Prozessmodelle angewendet als auch neue Prozessmodelle entwickelt.

Der neue Ansatz zur Modellierung von Endverbrauchern in Privathaushalten (Abschnitt 3.8.1) ermöglicht die Ableitung treibender Faktoren des Ressourcenbedarfs und der Ressourcementsorgung durch Abbildung von Ressourcenbedarfs- und Ressourcenentsorgungsmustern. Die Muster basieren auf sozioökonomischen Bevölkerungsschichten. Jede Schicht ist durch spezifische Verbrauchs- und Ausstattungsparameter definiert. Mit dem Ansatz können beliebige Bevölkerungsstrukturen in beliebigen Detaillierungsgraden modelliert werden. Für die Parametrierung so modellierter Verbrauchermodelle können statistisch erhobene Daten, aber auch Literaturwerte (Abschnitt 4.4.5) herangezogen werden. Neben einem transsektoralen Modell können solche Verbrauchermodelle eingesetzt werden, um kostengünstig und zeitsparend Schlüsseldaten für Planungsaufgaben von Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen zu generieren. Dies gilt im Besonderen für urbane Ballungsräume, in denen verbraucherseitige Energie- und Stoffstromdaten häufig begrenzt verfügbar sind. Innerhalb eines transsektoralen Modells lassen sich die Auswirkungen verbraucherseitiger Maßnahmen (siehe Abschnitt 4.4.4) auf Prozesse sektoraler und transsektoraler Infrastrukturen bewerten.

Zur Modellierung von Talsperrensystemen wurde ein Talsperrenmodul entwickelt (siehe Abschnitt 3.8.2). Für die Bewirtschaftung der Wasserabgaben aus Verbundspeichersystemen wurde ein Regelungsalgorithmus aus dem Kanalnetz-bereich untersucht und übertragen (siehe Abschnitt 3.9). Der Algorithmus wurde mit dem Talsperrenmodul (siehe Abschnitt 3.8.2) gekoppelt und ermöglicht eine bestmögliche Bewirtschaftung vorhandener Speicherkapazitäten und Wasserressourcen durch gleichmäßige Auslastung der Speicher. Neben der Entwicklung des modellbasierten Ansatzes zur Beschreibung von Bedarfen, Kapazitäten und deren Verknüpfungen auf makro- und mikroskopischer Ebene trägt die vorliegende Arbeit durch Erprobung dieses neuen und vielversprechenden Ansatzes zum Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der Talsperrenbewirtschaftung bei.

Für die Modellierung von Kläranlagen wurde exemplarisch das etablierte Belebtschlammmodell ASM3 verwendet (siehe Abschnitt 3.8.2). Hier wurden die Einflüsse der Änderung betriebsspezifischer Parameter (z. B. Sauerstoffzufuhr) und externer Größen (z. B. Zulauffracht, Temperatur) auf die Reinigungsleistung in jeder Reinigungsstufe qualitativ und quantitativ erfasst.

Die Anwendbarkeit des Ansatzes wurde am Beispiel der Wasser- und Elektrizitätsinfrastrukturen der Stadt Lima (Peru) für die Jahre 2007 bis 2030 in Monatsschritten demonstriert (siehe Kapitel 4). Die Anwendung wurde in enger Kooperation mit dem Wasserunternehmen SEDAPAL und dem Energieunternehmen EDEGEL durchge-

führt. Beide Unternehmen zeigten großes Interesse an der Anwendung des Ansatzes und unterstützten diese Arbeit mit der Bereitstellung von Daten der exemplarisch ausgewählten sektoralen Infrastrukturen. Darüber hinaus begleiteten beide Unternehmen den Prozess des Modellaufbaus und der Untersuchung der sektoralen Infrastrukturen. In zahlreichen Gesprächen bei SEDAPAL und EDEGEL wurden die Simulationsergebnisse vorgestellt, diskutiert und validiert.

Ziel der Anwendung war die Ist-Darstellung der Wasser-, Abwasser- und Energieströme auf regionaler Ebene (siehe Abschnitt 4.2) und darauf aufbauend eine Darstellung der möglichen Auswirkungen zukünftiger Bevölkerungsentwicklungen und klimatischer Veränderungen (siehe Abschnitt 4.4.4) auf die zukünftige Wasser- und Stromversorgung und auf die Abwasserentsorgung und -reinigung der Stadt. Dabei wurden 96 variierende demographische, technische, natürliche und betriebliche Randbedingungen berücksichtigt. Auf dieser Grundlage konnte ein besseres Verständnis des zeitlichen Verlaufs von Interdependenzen der Wasser- und Energiesysteme in Lima erreicht werden. Anschließend wurden verschiedene technische und nicht-technische Maßnahmen (siehe Abschnitt 4.4.4) untersucht und deren Wirksamkeit hinsichtlich technischer, sozialer, betrieblicher und ökologischer Kriterien (siehe Abschnitt 4.4.4) bewertet. Die im Modell implementierten Maßnahmen stehen mit Ausnahmen im Einklang mit dem Masterplan des Wasserunternehmens SEDAPAL. Damit lassen sich mittels des Ansatzes Lösungen zur bestmöglichen Nutzung bestehender, aber auch geplanter Kapazitäten von Infrastrukturen und natürlichen Ressourcen erarbeiten. Ein wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit, verschiedene Experten in Vorplanungs- und Planungsprozessen, die immer ihre eigene Perspektive auf das Gesamtsystem haben, an einem transsektoralen Modell zusammenzuführen.

In den Prozessmodellen für Endverbraucher wurden verschiedene Wasserver- und Abwasserentsorgungsformen und die Ausstattung der Privathaushalte je nach sozio-ökonomischer Bevölkerungsschicht berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.4.5). Damit konnten einzelne Wasser- und Strombedarfe sowie einzelne Grauwasser-, Schwarzwasser- und Abwasseranfälle quantitativ und qualitativ bilanziert werden. Neue Daten, wie zum Beispiel die saisonalen Schwankungen des Wasser- und Strombedarfs sowie die Zusammenhänge zwischen Wasserversorgung und -bedarf und zwischen Abwasserentsorgung und -reinigung, konnten generiert werden. Damit wurden weitere Informationen für die Planung von Wasserversorgungs- und Sanitätkonzepten bereitgestellt.

Da der hier vorgestellte Ansatz Ergebnisse zeitigte und einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Interdependenzen und Wechselwirkungen zwischen sektoralen und transsektoralen Infrastrukturen sowie zur Unterstützung von Maßnahmenplanungen in Lima leistete, haben SEDAPAL und EDEGEL großes Potenzial im Ansatz gesehen. Damit kann der Ansatz als UnterstützungsInstrument für die

zukünftige Planung wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen und für die Bewältigung der Herausforderungen des Wasserressourcenmanagements der Stadt, insbesondere beim Auftreten hydrologisch trockener Abflussjahre, dienen.

5.2 Ausblick und weiterführende Arbeiten

Die Modellierung makroskopischer Systeme erfordert den Umgang mit einer Vielzahl von Daten und Informationen, die als Eingangsgrößen vorgegeben werden müssen. Dies gilt gerade dann, wenn im Makroskopischen einzelne Systemkomponenten auf der Grundlage von Prozessmodellen modelliert werden. Gleichzeitig werden durch die Simulation große Mengen an Daten und Informationen verarbeitet bzw. generiert. Für das Anwendungsbeispiel Lima wurden Messdaten und Informationen manuell aufbereitet, auf Plausibilität geprüft und bei Lücken notfalls durch eigene Annahmen ergänzt. Im Sinne praktischer Anwend- und Handhabbarkeit transsektoraler Modelle auf der Basis des Ansatzes sind Konzepte zur automatischen bzw. semi-automatischen Datenaufbereitung und -validierung eine zwingende Notwendigkeit. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, da die Datenstruktur sektoraler Komponenten und Prozesse sehr heterogen und die Datengüte in vielen Fällen ungenügend, aber neben der Güte des Systemmodells entscheidend für die Güte der Simulationsergebnisse sind.

Der vorgestellte Ansatz wurde vor dem Hintergrund der integrierten Modellierung und Analyse transsektoraler Infrastrukturen am Beispiel der Sektoren Wasser und Energie entworfen. Seine Anwendung am Beispiel der Megastadt Lima schöpft jedoch die Möglichkeiten des Ansatzes nicht aus. Die weiteren Sektoren liegen auf der Hand. Ein Beispiel dafür ist der Abfallsektor. Entsprechende Prozessmodule und deren Verknüpfung mit den Sektoren Wasser und Energie ließen sich einfach in den Ansatz integrieren.

Im Anwendungsbeispiel wurden Grundwasserressourcen mittels einfacher Modellansätze abgebildet (siehe Abschnitt 3.4). Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept zur Modellierung von Speicherungs- und Transportprozessen (siehe Abschnitt 3.8.2) könnte für die Modellierung der Grundwasserressourcen verwendet werden.

Der aus dem Kanalnetz übertragene Regelungsalgorithmus weist deutliche Potenziale zur effizienten Bewirtschaftung der Wasserabgaben aus Talsperrensystemen auf. Im Sinne des Anwendungsbeispiels bestünde eine Erweiterung darin, die Grundwasserspeicher in das Regelungskonzept mit aufzunehmen, um ober- und unterirdische Wasservorkommen integriert zu bewirtschaften.

Hinsichtlich der Systemtreiber wäre eine Zusammenführung mit sozial-wissenschaftlichen Modellansätzen, wie zum Beispiel Agentensystemen, ein vielver-

sprechendes Ziel. Hier könnte über das Verhalten von Agenten (z. B. Endverbraucher) der Einfluss sozioökonomischer, ökologischer und selbst politischer Aspekte auf das Gesamtsystem untersucht werden.

Interessant erscheint auch die Untersuchung der Einflüsse klimatischer (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit) und saisonaler (z. B. Tageslicht) Faktoren auf den Wasser- und Energieverbrauch, um die Ressourcenbedarfs- und Entsorgungsmuster näher abzubilden.

Damit der Ansatz die Entscheidungsfindungsprozesse auf Betriebs- und Managementebene bestmöglich unterstützen kann, müssen noch Investitions- und Betriebskostenrechnung in die Analyse einbezogen werden.

6 Anhang

6.1 Anhang A

Tabelle A 1: Mögliche Komponenten wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen

Sub-system	Natürliche/ künstliche Komponente	Elemente	Prozesse		
			Transport	Speicherung	Umwandlung
WGW	Oberflächen- gewässer	Flussbett, Böschungen, ...	Wasser/ Stoffe ¹	Stoffe ¹	Stoffe ²
	Grundwasser- leiter	Bodenschichten, Brunnen, Pumpen ...	Wasser/ Stoffe ¹	Wasser/Stoffe ¹	Stoffe ²
ARE	Einzelspeicher/ Verbund- speichersystem	Staudämme, Kanäle, Rohre, Schieber, Spei- cherraum, ...	Wasser/ Stoffe ¹	Wasser/ Stoffe ¹	Stoffe (z. B. Algenbildung)
TWP	Wasserwerke	Schieber, Kanäle, Flockungs-, Fäl- lungs-, Absetzbe- cken,...	Wasser/Stoffe (z. B. zwischen und in den Pro- zessen der Wasseraufbereitung)		Stoffe (z. B. Umwandlung von Fluss- in Trinkwasser)
TWV	Transport- und Verteilungs- netze	Rohre, Speicher, Schieber, Pumpen, Druckminderer, ...	Trinkwasser/ Stoffe (z. B. zwi- schen)	Trinkwasser / Stoffe (z. B. im Trinkwasser- speicher)	Stoffe (z. B. Bildung von Schwefel- wasserstoff)
	Tankwagen	Fahrer, Speicherkapazität	Trinkwasser / Stoffe	Trinkwasser / Stoffe	-

¹ z. B. Sedimente, lösliche Materialen

² z. B. durch Auflösung von Materialen

Fortsetzung von Tabelle A 1

Sub- system	Natürliche/ künstliche Komponente	Elemente	Prozesse		
			TSP	SPE	UMW
VER	Haushalte Nichthaushalte: Industrie, Landwirtschaft	Einwohner- und Haushaltzahl, Haushalts- und Elektrogeräte, ...	Trinkwasser / Stoffe Abwasser/ Stoffe	Trinkwasser in den Haushal- ten ³	Stoffe (z. B. Umwandlung der im Trink- wasser enthal- tenen Stoffe in Abwasser)
		Industriegeräte, Bewässerungs- anlagen, ...	Trinkwasser /Stoffe Abwasser/ Stoffe	Trinkwasser /Stoffe Abwasser (Grauwasser, Schwarz- wasser)/Stoffe	Stoffe (z. B. Umwandlung der im Trink- wasser enthal- tenen Stoffe in Abwasserstoffe)
AEN	Kanalnetze	Kanäle, Rohre, Speicherbecken, Schieber, Pum- pen, ...	Abwasser/ Stoffe (z. B. zwi- schen Verbraucher und Kläranla- ge)	Abwasser/Stoffe (z. B. Misch- wasser im Re- genüberlauf- becken)	Stoffe (durch physikalische, chemische und biologische Veränderungen während des Abwasser- transports)
AWR	Kläranlagen	Kanäle, Pumpen, Sensoren, Belüf- tungs-anlagen, Vorklärbecken, Nachklärbe- cken, Denitrifikatio- ns-becken, ...	Abwasser (z. B. zwi- schen den Prozessen der Abwas- ser-reinigung)	Abwasser (z. B. in Nach- klär-becken)	Stoffe (durch physikalische, biologische und chemische Stoffwechsel- prozesse)

WG: Wassergewinnung; ARE: Abflussregulierung; TWP: Trinkwasseraufbereitung; TWV: Trink-

wasserverteilung; VER: Endverbraucher; AEN: Abwasserentsorgung; AWR: Abwasserreinigung

Quelle: angepasst nach [143]; [144]

³ Wasserspeicher der nicht an das Trinkwassernetz angeschlossenen Verbraucher

Tabelle A 2: Mögliche Komponenten energiewirtschaftlicher Infrastrukturen

Natürliche/ künstliche Komponente	Elemente	Prozesse	Transport	Speicherung	Transformation
EVK	-	-	-	Energie (z. B. Wasser in Stau- seen)	-
KWK	Turbinen Generatoren Transformatoren ...	Energie und Stof- fe zwischen Pro- zessen	-	-	Umwandlung von Primärenergie (z. B. Wasser- und Kohlevorkommen) in Endenergie (Strom)
RAF	Rohöltanks Rohrleitungen Pumpen Turbinen Kompressoren Ejektoren Öfen Reaktoren Abscheider Kolonnen Kühler Wärmeaustauscher Verdampfer Entschwefelungsanlagen ...	Energie und Stof- fe: z. B. zwischen die verschiede- nen Verfahrens- schritte einer Raffinerie wie zwischen Destillation und Entschwefelung	Energie und Stoffe: z. B. Speicherung von Rohölen oder Fertigpro- dukten wie Pro- pan und Benzin	Energie und Stoffe: z. B. Umwandlung von Primärenergie (Erdöl) in End- energie (Heizöl, Benzine)	Energie und Stof- fe: z. B. Umwandlung von Primärenergie (Erdöl) in End- energie (Heizöl, Benzine)
STN	Stromleitungen Umspannstationen ...	Energie	-	-	z. B. Umwand- lungsprozesse der Stromspan- nung
VER	Haushalts- und Elektro- geräte Industriegeräte Bewäs- serungsanlagen ...	Energie	Energie (z. B. in Akkus von Handys und Notebooks)	-	-

EVK: Energievorkommen; KWK: Kraftwerke; RAF: Raffinerien; STN: Stromverteilungsnetze; VER: Verbraucher

Tabelle A 3: Kontaktpunkte im Haushalt und Stoff- und Energieströme in Zu- und Ablauf

Kontaktpunkt Z (Aktivität/Haushalts- und Elektrogeräte)	Klasse*	Stoff-/Energiestrom Zulauf	Ablauf
Schnittstelle			
Wäschewaschen			
a) Waschmaschine	A	TW, EEL	GW
b) Manuelle Wäsche	B	TW	GW
Körperpflege			
a) Warmwasser	A	TW, EEL	GW
b) Kaltwasser	B	TW	GW
Trinken	B	TW	–
Toilettenspülung	B	TW	BL, EX
Küche			
a) Kochen (Warmwasser)	A	TW, EEL	
b) Kochen (Kaltwasser)	B	TW	
c) Geschirrspülmaschine	A	TW, EEL	GW
d) Manuelle Spülung	B	TW	GW
Haushalts- und Elektrogeräte			
Beleuchtung	C	EEL	
Computer	C	EEL	
Radio	C	EEL	
Stereo	C	EEL	
Fernsehen	C	EEL	
Mikrowelle	C	EEL	
Kühl-/Gefrierschrank	C	EEL	
Elektroherd	C	EEL	

* Klasse A: Haushalts-, Elektrogeräte oder Aktivität, deren Betrieb sowohl vom Wasser als auch von Energie abhängig ist; Klasse B und Klasse C: Haushalts-, Elektrogeräte oder Aktivität, deren Betrieb nur vom Wasser bzw. von Energie abhängt; EEL: Energiestrom (Elektrische Energie); TW: Trinkwasserstrom; GW: Grauwasserstrom; BL: Schwarzwasserstrom; EX: Fäkalienstrom

Tabelle A 4 Stoff- und Energieströme*

Stoffe/Energie	Beschreibung
BL	Schwarzwasser
BW	Braunwasser
DW	Trinkwasser
EF	Ablauf
EX	Fäkalien
FA	Fäzes
FL	Spülwasser
FW	Grundwasser
GW	Grauwasser
RW	Flusswasser
UR	Urin
WW	Abwasser
EEL	Elektrische Energie
TS	Entwässerter Überschusschlamm

* angelehnt an [145]; [146]; [147]

Tabelle A 5: Fraktionen in Trinkwasser- und Abwasserströmen

Fraktion (Y)	Einheit	Beschreibung
IN	g N/m ³	Gesamter anorganischer Stickstoff
IP	g P/m ³	Gesamter anorganischer Phosphor
IC	g C/m ³	Gesamter anorganischer Kohlenstoff
ON	g N/m ³	Gesamter organisch gebundener Stickstoff
OP	g P/m ³	Gesamter organisch gebundener Phosphor
OC	g C/m ³	Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff
SS	g CSB/m ³	Gelöste organische Stoffe, leicht abbaubar
SI	g CSB/m ³	Gelöste organische Stoffe, biologisch inert
XS	g CSB/m ³	Partikuläre organische Stoffe, leicht abbaubar
XI	g CSB/m ³	Partikuläre organische Stoffe, biologisch inert
XB	g CSB/m ³	Biomasse
XMI	g /m ³	Mineralische Stoffe
Q	m ³ /d	Volumenstrom

Quelle: [74]

Tabelle A 6: Parametrierung der Fraktionen des Abwasserstroms

Fraktion	n [g N/Unit]	p [g P/Unit]	c [g C/Unit]	ts [g TS/Unit]
IN	1,000			
IP		1,000		
IC			1,000	
ON	1,000			
OP		1,000		
OC			1,000	
SS	0,030 (+)	0,000 (+)	0,311 (++)	0,000 (+)
SI	0,010 (+)	0,000 (+)	0,360 (++)	0,000 (+)
XS	0,030 (+)	0,005 (+)	0,312 (++)	0,750 (+)
XI	0,045 (+)	0,010 (+)	0,360 (++)	0,750 (+)
XB	0,080 (+)	0,014 (+)	0,312 (++)	0,900 (+)
XMI				1,000 (+)

(+) entnommen aus dem ASM3biop nach [70]; (++) entnommen aus dem ADM nach [76]; Quelle: [74]

Tabelle A 7: Parameter und CSB-Aufteilungsfaktoren

Parameter/Einheit	UR	FA	BT+WB	KS	WW	Gesamt
CSB [g CSB/p/d]	10,00 ^{a)}	60,00 ^{a)}	4,51 ^{b)}	2,58 ^{c)}	22,50 ^{b)}	100,00
TSS [g TSS/p/d]	11,0 ^{a)}	21,00 ^{a)}	1,53 ^{b)}	3,16 ^{b)}	3,16 ^{b)}	39,85
VSS [g VSS/p/d]	7,00 ^{a)}	18,00 ^{a)}	1,49 ^{b)}	2,78 ^{b)}	1,79 ^{b)}	31,10
IN [g IN/p/d]	-	-	0,02 ^{b)}	0,02 ^{c) +}	0,08 ^{b)}	
IP [g IP/p/d]	-	-	0,01 ^{d)}	0,05 ^{c) ++}	0,28 ^{d)}	
IC [g IC/p/d]	-	-	0,57 ^{h)}	0,57 ^{h)}	0,57 ^{h)}	
CSB-Faktoren						
fSS [g CSB/g CSBs]	0,95 ^{h)}	0,95 ^{h)}	0,20 ^{h)}	0,20 ^{h)}	0,20 ^{h)}	
fXS [g CSB/g CSBx]	0,90 ^{h)}	0,90 ^{h)}	0,54 ^{h)}	0,34 ^{h)}	0,34 ^{h)}	
fXB [g CSB/g CSBx]	0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}	0,00 ^{h)}	

UR: Urin; FA: Fäzes; BT: Baden; WB: Waschbecken; KS: Küche; WW: Wäschewaschen; CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf; TSS: Trockensubstanz, VSS: Organische Trockensubstanz; N: Gesamtstickstoff; IN: Gesamter anorganischer Stickstoff; P: Gesamtphosphor; IP: Gesamter anorganischer Phosphor; C: Gesamtkohlenstoff; IC: Gesamter anorganischer Kohlenstoff; fSS: CSB-Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB; CSBs: Gelöster CSB; fXS: CSB-Aufteilungsfaktor zum partikulären CSB; CSBx: Partikulärer CSB; fXB: CSB-Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB; Quelle: a) [132]; b) [77]; c)+ Selbst berechnet auf Grundlage der in [77] gegebenen Literaturwerte. Der Wert ergibt sich aus dem Produkt der CSB-Konzentration von 644 mg/l und dem Wasserverbrauch von 4 l/p/d. c)++ Der Wert ergibt sich aus dem Produkt der CSB-Konzentration von 13 mg/l und dem Wasserverbrauch von 4 l/p/d; d) Eigene Annahmen auf Grundlage von [77]; e) [133]; h) [75]; [74]

Tabelle A 8: Personenbezogene Parameter für Grauwasser

Parameter (K)	Beschreibung	Einheit
$p_{IN,GW}$	Gesamter anorganischer Stickstoff, Grauwasser	g N/p/d
$p_{IP,GW}$	Gesamter anorganischer Phosphor, Grauwasser	g P/p/d
$p_{IC,GW}$	Gesamter anorganischer Kohlenstoff, Grauwasser	g C/p/d
$p_{COD,GW}$	Chemischer Sauerstoff Bedarf, Grauwasser	g COD/p/d
$p_{TSS,GW}$	Trockensubstanz, Grauwasser	g TSS/p/d
$p_{VSS,GW}$	Organische Trockensubstanz, Grauwasser	g VSS/p/d
$p_{Q,GW}$	Grauwasseranfall	l/p/d

Tabelle A 9: Personenbezogene Parameter für Urin und Fäkalien

Parameter (M)	Beschreibung	Einheit
Urin		
$p_{TN,UR}$	Gesamtstickstoff, Urin	g N/p/d
$p_{TP,UR}$	Gesamtphosphor, Urin	g P/p/d
$p_{TC,UR}$	Gesamtkohlenstoff, Urin	g C/p/d
$p_{COD,UR}$	Chemischer Sauerstoff Bedarf, Urin	g COD/p/d
$p_{TSS,UR}$	Trockensubstanz, Urin	g TSS/p/d
$p_{VSS,UR}$	Organische Trockensubstanz, Urin	g VSS/p/d
$p_{Q,UR}$	Urinanfall	l/p/d
Fäzes		
$p_{TN,FA}$	Gesamtstickstoff, Fäkalien	g N/p/d
$p_{TP,FA}$	Gesamtphosphor, Fäkalien	g P/p/d
$p_{TC,FA}$	Gesamtkohlenstoff, Fäkalien	g C/p/d
$p_{COD,FA}$	Gesamtstickstoff, Fäkalien	g COD/p/d
$p_{TSS,FA}$	Trockensubstanz, Fäkalien	g TSS/p/d
$p_{VSS,FA}$	Organische Trockensubstanz, Fäkalien	g VSS/p/d
$p_{Q,FA}$	Fäzesanfall	l/p/d

Tabelle A 10: Stadtteile von Lima

Nº	Bezirke	Fläche		Einwohnerzahl*
		[km ²]	[%]	
	Lima und Provinz Callao	2.803	8.482.619	
	Provinz Lima	2.672	100,0	7.605.742
1	Lima Nord	857	32,1	2.083.583
2	Ancón	299	11,2	33.367
3	Carabayllo	347	13,0	213.386
4	Comas	49	1,8	486.977
5	Independencia	15	0,5	207.647
6	Los Olivos	18	0,7	318.140
7	Puente Piedra	71	2,7	233.602
8	San Martín de Porres	37	1,4	579.561
9	Santa Rosa	22	0,8	10.903
10	Lima Ost	814	30,5	2.111.289
11	Ate	78	2,9	478.278
12	El Agustino	13	0,5	180.262
13	San Juan de Lurigancho	131	4,9	898.443
14	Santa Anita	11	0,4	184.614
15	Chaclacayo	40	1,5	41.110
16	La Molina	66	2,5	132.498
	Lurigancho	236	8,8	169.359
	Cieneguilla	240	9,0	26.725

Fortsetzung von Tabelle A 10

Nº	Bezirke	Fläche	Einwohnerzahl*	
		[km ²]	[%]	[Gesamt]
	Lima Mitte	148	5,5	1.841.357
17	Breña	3	0,1	81.909
18	Cercado	22	0,8	299.493
19	La Victoria	9	0,3	192.724
20	Rímac	12	0,4	176.169
21	San Luis	3	0,1	54.634
22	Lince	3	0,1	55.242
23	Magdalena del Mar	4	0,1	50.764
24	Pueblo Libre	4	0,2	74.164
25	San Miguel	11	0,4	129.107
26	Barranco	3	0,1	33.903
27	Miraflores	10	0,4	85.065
28	San Isidro	11	0,4	58.056
29	Surquillo	3	0,1	89.283
30	Jesús María	5	0,2	66.171
31	San Borja	10	0,4	105.076
32	Santiago de Surco	35	1,3	289.597
	Lima Süd	853	31,9	1.569.513
33	San Juan de Miraflores	24	0,9	362.643
34	Villa El Salvador	35	1,3	381.790
35	Villa María del Triunfo	71	2,6	378.470
36	Pucusana	38	1,4	10.633
37	Lurín	181	6,8	62.940
38	Pachacámac	160	6,0	68.441
39	Punta Hermosa	120	4,5	5.762
40	Punta Negra	131	4,9	5.284
46	Carmen de la Legua Reynoso	2	1,6	41.863
47	La Perla	3	2,3	61.698
48	La Punta	1	0,6	4.370
49	Ventanilla	74	56,2	277.895

Quelle: [87]

Tabelle A 11: Nutzbares Volumen der Talsperren und natürlichen Seen

Talsperren/natürliche Seen	Wasservolumen [Mio.m ³]
Atlantische Seite	205,7
Antacoto	120,0
Marcacocha	10,7
Marcapomacocha	14,8
Sangrar	8,8
Tucto	2,8
Huascacocha	48,6
Pazifische Seite	77,0
Canchis	2,1
Huachua	5,1
Huallunca	1,6
Huasca	6,3
Manca	1,6
Piticulli	6,5
Quiula	1,9
Sacsa	16,2
Carpa	17,8
Chiche	2,3
Pirhua	0,9
Pucro	2,0
Quisha	8,7
Huampar	3,3
Misha	0,7
Yuracmayo	48,3
Gesamt (Bestand)	331,0
Geplant (Pazifische Seite, ab 2020)	110,0
Pomacocha	79
Huallacocha Bajo	11
Autisha	20
Gesamt (Bestand + geplant)	440,0

Tabelle A 12: Wasserverbrauch der Landwirtschaft im Einzugsgebiet des Rimac

Sektor	Bewässerungsblock	Fläche [ha]	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	
Santa Eulalia	Parca	75	273	273	278	214	168	108	
Rimac	Huachipa	465	1.628	1.592	1.370	1.109	951	691	
	Carapongo	171	660	683	374	426	404	250	
	Chachacayo	55	214	215	158	151	123	82	
	Ñaña	498	1.289	1.164	1.289	1.247	1.289	1.247	
	Nieveria	301	513	616	733	741	681	483	
	La Estrella	230	472	519	680	705	642	287	
	Ricardo Palma	250	514	509	526	475	376	244	
	Chacrasana	136	411	417	507	487	400	263	
	Chosica Vieja	207	487	494	576	521	395	270	
Lima	Surco	1.029	2.322	2.425	2.679	2.419	1.934	1.426	
	Ate	528	1.581	1.625	1.740	1.594	1.302	988	
Gesamt	-	3.946	10.364	10.532	10.910	10.089	8.665	6.339	
Q [m³/d]	-	-	334.323	376.143	351.935	336.300	279.516	211.300	
Sektor	Bewässerungsblock	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez		
Santa Eulalia	Parca	101	84	122	107	147	198		
Rimac	Huachipa	625	681	1.028	868	947	1.091		
	Carapongo	161	275	398	347	324	381		
	Chachacayo	53	64	104	89	80	135		
	Ñaña	1.289	1.289	1.247	1.289	1.247	1.289		
	Nieveria	421	548	278	510	590	648		
	La Estrella	143	433	399	546	482	505		
	Ricardo Palma	206	345	361	456	473	460		
	Chacrasana	243	261	290	289	296	349		
	Chosica Vieja	203	285	320	229	372	392		
Lima	Surco	1.374	1.334	1.497	1.670	1.770	1.896		
	Ate	911	1.032	1.124	1.239	1.280	1.352		
Gesamt	-	5.730	6.631	7.168	7.639	8.008	8.696		
Q [m³/d]	-	-	184.839	213.903	238.933	246.419	266.933	280.516	

Quelle: [107]. Alle Angaben in Mio.m³ außer der Fläche in [ha] und der Wasserbedarf Q in [m³/d];

Tabelle A 13: Wasserverbrauch der Gewerbe im Einzugsgebiet des Rimac

Verbraucher	Monatlicher Wasserverbrauch [m³]					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Bergbauindustrie	2.331.180	2.105.582	2.331.180	2.255.981	2.331.180	2.255.981
Industrie (andere)	80.176	72.417	80.176	77.590	80.176	77.590
Gesamt	2.411.356	2.177.999	2.411.356	2.333.571	2.411.356	2.333.571
Q [m³/d]	77.786	77.786	77.786	77.786	77.786	77.786
Verbraucher	Monatlicher Wasserverbrauch [m³]					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Bergbauindustrie	2.331.180	2.331.180	2.255.981	2.331.180	2.255.981	2.331.180,0
Industrie (andere)	80.176	80.176	77.590	80.176	77.590	80.176
Gesamt	2.411.356	2.411.356	2.333.571	2.411.356	2.333.571	2.411.356
Q [m³/d]	77.786	77.786	77.786	77.786	77.786	77.786

Quelle: [108]

Tabelle A 14: Mittlere jährliche Durchflüsse der Hauptsammler (2007 – 2013)

Sammler	Mittlerer Durchfluss [m ³ /s]							Ableitung
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Comas	2,78	2,75	2,83	3,16	3,19	3,05	3,11	Pazifischer Ozean (Playa Oquendo)
Interceptor Norte ¹	2,12	2,08	2,25	1,98	2,02	5,33	6,75	Rechenfang Taboada
Colector N°6 ²	2,16	2,27	2,48	2,64	2,62	-	-	Fluss Rimac, Be-wässerungs-kanäle
Centenario	2,39	2,49	2,54	2,74	2,68	2,08	1,60	Pazifischer Ozean (Playa Acapulco)
Bocanegra	0,28	0,29	0,30	0,29	0,29	-	-	Pazifischer Ozean (Playa Oquendo)
Condevilla	0,50	0,50	0,44	0,25	0,25	-	-	Fluss Rimac
Surco	5,22	4,69	4,77	4,60	4,76	4,78	4,74	Kläranlage San Juan de Miraflores und Huascar (0,25 m ³ /s). Rest wird in das pazifischen Ozean (Playa La Chira) abgeleitet
Chosica	0,49	0,46	0,42	0,42	0,45	0,44	0,38	Kläranlage Carapongo
Puente Piedra	0,26	0,36	0,44	0,50	0,51	0,53	0,56	Kläranlage Puente Piedra
Ventanilla	0,22	0,29	0,30	0,23	0,22	0,26	0,26	Kläranlage Ventanilla, Bewässerungs-kanäle
San Juan	0,42	0,43	0,42	0,41	0,40	0,44	0,41	Kläranlage San Juan de Miraflores
200 Millas	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,10	0,11	
Ancón	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	Kläranlage Ancón
Cienaguilla ³	-	-	-	0,06	0,07	0,07	0,07	
Manchay ⁴	-	-	-	-	0,02	0,03	0,03	
San Bartolo	0,79	0,78	0,84	0,78	0,76	0,82	0,84	Kläranlage San Bartolo
Gesamt	17,75	17,50	18,15	18,17	18,3	17,96	18,91	

Quelle: [99], [100], [101]

¹ Inbetriebnahme: am 15.03.08; ² Ein Anteil des Durchfluss des Sammlers N°6 ist zum Sammler Condevilla verzweigt; ³ Inbetriebnahme: im Januar 2010; ⁴ Inbetriebnahme: im Februar 2011

Tabelle A 15: Reinigungsverfahren der Kläranlagen des Abwassersystems von Lima (bis Ende 2013)

Kläranlage*	Reinigungsverfahren	Lage (Stadtteile)
<u>Lima Mitte</u>		
Carapongo	Anaerobe-aerobe Verfahren	Ate - Vitarte
San Antonio de Carapongo	Belebtschlammmanlage	Lurigancho
La Atarjea (Nueva Sede)	Belebtschlammmanlage	El Agustino
Cieneguilla	Belebtschlammmanlage	Cieneguilla
Manchay	Belebtschlammmanlage	Pachacamac
Santa Clara	Belebtschlammmanlage	Ate-Vitarte
<u>Lima Süd</u>		
San Juan	Belüftete Abwasserteiche	San Juan de Miraflores
Huascar - Parque 26	Belüftete Abwasserteiche	Villa El Salvador
San Pedro de Lurin	Anaerobe-aerobe Verfahren	Villa El Salvador
Nuevo Lurin	Oxidationsteiche	Pachacamac
Julio C. Tello	Oxidationsteiche	Lurin
Jose Galvez	Anaerobe-aerobe Verfahren	Lurin
Pucusana	Oxidationsteiche	Pucusana
Punta Hermosa	Oxidationsteiche	Punta Hermosa
San Bartolo	Belüftete Abwasserteiche	Lurin
Balnearios San Bartolo (Sur + Norte)	Belebtschlammmanlage	Balnearios San Bartolo
<u>Lima Nord</u>		
Taboada	Mechanische Abwasserreinigung	
Puente Piedra	Belebtschlammmanlage	San Martin de Porres
Ventanilla	Oxidationsteiche	Ventanilla
Ancon	Fakultativer Abwasserteiche	Ancon
Santa Rosa	Tropfkörperanlage	Santa Rosa

Quelle: SEDAPAL; *bezieht sich auf die von SEDAPAL betriebenen Kläranlagen

Tabelle A 16: Hydraulische Belastung der Kläranlagen (2007–2013)

Kläranlage	BZU [m ³ /s]	Mittlere Zuläufe [m ³ /s]						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Lima Mitte	0,621							
Carapongo	0,500	0,489	0,460	0,423	0,421	0,448	0,444	0,352
San Antonio	0,020	0,017	0,018	0,016	0,020	0,018	0,034	0,093
Carapongo								
La Atarjea (Nueva Sede)	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Cieneguilla	0,010	-	-	0,053	0,064	0,066	0,065	0,035
Manchay	0,090	-	-	-	-	0,019	0,028	0,034
Santa Clara	0,438	-	-	-	-	-	-	0,157
Lima Süd	2,850							
San Juan	0,800	0,420	0,428	0,423	0,410	0,396	0,434	0,396
Huascar - Parque 26	0,170	0,073	0,073	0,078	0,076	0,078	0,096	0,082
San Pedro de Lurin	0,020	0,015	0,015	0,024	0,025	0,025	0,025	0,025
Nuevo Lurin	0,010	0,009	0,005	0,020	0,059	0,072	0,072	0,072
Julio C. Tello	0,010	0,007	0,013	0,023	0,026	0,026	0,025	0,015
Jose Galvez	0,100	0,056	0,050	0,051	0,068	0,083	0,092	0,089
Pucusana	0,010	0,004	0,004	0,024	0,026	0,026	0,026	0,001
Punta Hermosa	0,010	-	0,012	0,014	0,018	0,018	0,018	0,018
San Bartolo	1,700	-	0,775	0,838	0,786	0,763	0,820	0,898
Balneario San Bartolo Norte	0,010	-	-	-	-	-	0,001	0,000
Balneario San Bartolo Sur	0,010	-	-	-	-	0,007	0,007	0,008
Lima Nord	14,708							
Puente Piedra	0,420	0,255	0,360	0,443	0,498	0,510	0,487	0,578
Ventanilla	0,250	0,220	0,290	0,297	0,224	0,220	0,240	0,267
Ancon	0,020	0,052	0,042	0,038	0,028	0,025	0,031	0,041
Santa Rosa	0,018	0,009	0,010	0,009	0,005	0,008	0,005	0,005
Taboada	14,00	-	-	-	-	-	-	10,235

BZU: Bemessungszulauf; Quelle: [96], [94], [91]

Tabelle A 17: Entwicklung der Bevölkerung und Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz in Lima-Nord von 2007 bis 2030 (Ist-Zustand und Szenarien)

Monat	Lima-Nord							
	HH		EW		HH		EW	
	2007*		2008		2009		2010	
Jan	332.286	1.621.118	353.668	1.690.817	374.140	1.758.700	384.650	1.806.745
Feb	334.068	1.626.926	355.450	1.696.626	375.013	1.762.691	385.556	1.810.885
März	335.850	1.632.734	357.231	1.702.434	375.887	1.766.683	386.462	1.815.024
Apr	337.632	1.638.543	359.013	1.708.242	376.760	1.770.674	387.368	1.819.164
Mai	339.414	1.644.351	360.795	1.714.051	377.633	1.774.666	388.274	1.823.303
Jun	341.195	1.650.159	362.577	1.719.859	378.506	1.778.657	389.180	1.827.443
Jul	342.977	1.655.967	364.358	1.725.667	379.379	1.782.648	390.086	1.831.582
Aug	344.759	1.661.776	366.140	1.731.475	380.252	1.786.640	390.993	1.835.722
Sep	346.541	1.667.584	367.922	1.737.284	381.125	1.790.631	391.899	1.839.861
Okt	348.322	1.673.392	369.704	1.743.092	381.998	1.794.623	392.805	1.844.001
Nov	350.104	1.679.201	371.486	1.748.900	382.871	1.798.614	393.711	1.848.140
Dez	351.886	1.685.009	373.267	1.754.709	383.744	1.802.606	394.617	1.852.280
	2011		2012		2013		2014	
Jan	395.558	1.856.577	406.883	1.908.279	418.583	1.961.653	430.646	2.016.634
Feb	396.499	1.860.874	407.855	1.912.716	419.586	1.966.224	431.678	2.021.333
März	397.440	1.865.170	408.828	1.917.153	420.589	1.970.795	432.710	2.026.033
Apr	398.381	1.869.467	409.801	1.921.589	421.592	1.975.366	433.743	2.030.733
Mai	399.322	1.873.764	410.773	1.926.026	422.595	1.979.937	434.775	2.035.433
Jun	400.264	1.878.061	411.746	1.930.462	423.598	1.984.508	435.807	2.040.132
Jul	401.205	1.882.358	412.718	1.934.899	424.600	1.989.079	436.839	2.044.832
Aug	402.146	1.886.655	413.691	1.939.336	425.603	1.993.650	437.871	2.049.532
Sep	403.087	1.890.952	414.663	1.943.772	426.606	1.998.221	438.903	2.054.232
Okt	404.028	1.895.249	415.636	1.948.209	427.609	2.002.792	439.935	2.058.932
Nov	404.969	1.899.546	416.608	1.952.645	428.612	2.007.363	440.967	2.063.631
Dez	405.910	1.903.843	417.581	1.957.082	429.614	2.011.934	441.999	2.068.331
	2015		2016		2017		2018	
Jan	443.059	2.073.153	455.809	2.131.157	468.922	2.190.780	482.397	2.252.019
Feb	444.119	2.077.976	456.899	2.136.114	470.042	2.195.872	483.548	2.257.245
März	445.179	2.082.798	457.989	2.141.071	471.163	2.200.964	484.699	2.262.470
Apr	446.239	2.087.620	459.079	2.146.029	472.283	2.206.057	485.849	2.267.696
Mai	447.299	2.092.443	460.170	2.150.986	473.404	2.211.149	487.000	2.272.922
Jun	448.359	2.097.265	461.260	2.155.944	474.524	2.216.241	488.150	2.278.148
Jul	449.419	2.102.088	462.350	2.160.901	475.645	2.221.333	489.301	2.283.374
Aug	450.478	2.106.910	463.440	2.165.859	476.765	2.226.425	490.451	2.288.600
Sep	451.538	2.111.732	464.531	2.170.816	477.886	2.231.517	491.602	2.293.825
Okt	452.598	2.116.555	465.621	2.175.773	479.006	2.236.609	492.752	2.299.051
Nov	453.658	2.121.377	466.711	2.180.731	480.126	2.241.701	493.903	2.304.277
Dez	454.718	2.126.199	467.801	2.185.688	481.247	2.246.793	495.053	2.309.503

Fortsetzung von Tabelle A 17

Monat	Lima-Nord							
	HH	EW	HH	EW	HH	EW	HH	EW
	2019		2020		2021		2022	
	2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
Jan	496.234	2.314.861	510.428	2.379.293	526.849	2.445.294	562.357	2.512.839
Feb	497.414	2.320.220	511.638	2.384.782	529.961	2.450.912	563.642	2.518.584
März	498.595	2.325.578	512.848	2.390.272	533.072	2.456.530	564.928	2.524.329
Apr	499.775	2.330.937	514.058	2.395.761	536.183	2.462.148	566.214	2.530.074
Mai	500.956	2.336.295	515.268	2.401.250	539.294	2.467.767	567.499	2.535.818
Jun	502.136	2.341.653	516.478	2.406.740	542.405	2.473.385	568.785	2.541.563
Jul	503.316	2.347.012	517.688	2.412.229	545.516	2.479.003	570.071	2.547.308
Aug	504.497	2.352.370	518.898	2.417.718	548.627	2.484.621	571.356	2.553.053
Sep	505.677	2.357.728	520.108	2.423.208	551.738	2.490.240	572.642	2.558.798
Okt	506.858	2.363.087	521.318	2.428.697	554.849	2.495.858	573.928	2.564.542
Nov	508.038	2.368.445	522.528	2.434.186	557.960	2.501.476	575.213	2.570.287
Dez	509.219	2.373.804	523.738	2.439.675	561.071	2.507.094	576.499	2.576.032
	2023	2024	2025	2026	2019	2020	2021	2022
Jan	577.812	2.581.901	593.599	2.652.444	609.710	2.724.432	626.134	2.797.823
Feb	579.126	2.587.769	594.940	2.658.433	611.076	2.730.539	627.526	2.804.043
März	580.439	2.593.638	596.280	2.664.423	612.443	2.736.645	628.918	2.810.263
Apr	581.752	2.599.506	597.621	2.670.412	613.810	2.742.752	630.310	2.816.483
Mai	583.066	2.605.375	598.961	2.676.401	615.176	2.748.858	631.702	2.822.703
Jun	584.379	2.611.243	600.301	2.682.390	616.543	2.754.964	633.094	2.828.923
Jul	585.692	2.617.112	601.642	2.688.380	617.909	2.761.071	634.486	2.835.143
Aug	587.006	2.622.981	602.982	2.694.369	619.276	2.767.177	635.878	2.841.363
Sep	588.319	2.628.849	604.322	2.700.358	620.643	2.773.284	637.270	2.847.583
Okt	589.632	2.634.718	605.663	2.706.347	622.009	2.779.390	638.662	2.853.802
Nov	590.946	2.640.586	607.003	2.712.336	623.376	2.785.497	640.054	2.860.022
Dez	592.259	2.646.455	608.343	2.718.326	624.742	2.791.603	641.446	2.866.242
	2027	2028	2029	2030	2019	2020	2021	2022
Jan	642.863	2.872.572	659.884	2.948.630	677.187	3.025.946	694.760	3.104.469
Feb	644.279	2.878.901	661.324	2.955.064	678.649	3.032.482	696.244	3.111.101
März	645.696	2.885.230	662.764	2.961.499	680.112	3.039.017	697.728	3.117.733
Apr	647.112	2.891.560	664.204	2.967.934	681.575	3.045.553	699.212	3.124.365
Mai	648.528	2.897.889	665.644	2.974.368	683.037	3.052.088	700.696	3.130.997
Jun	649.945	2.904.219	667.084	2.980.803	684.500	3.058.624	702.181	3.137.629
Jul	651.361	2.910.548	668.524	2.987.238	685.962	3.065.160	703.665	3.144.261
Aug	652.778	2.916.877	669.964	2.993.672	687.425	3.071.695	705.149	3.150.893
Sep	654.194	2.923.207	671.404	3.000.107	688.888	3.078.231	706.633	3.157.525
Okt	655.611	2.929.536	672.844	3.006.542	690.350	3.084.766	708.117	3.164.157
Nov	657.027	2.935.866	674.284	3.012.976	691.813	3.091.302	709.601	3.170.788
Dez	658.444	2.942.195	675.724	3.019.411	693.275	3.097.837	711.086	3.177.420

Quelle: * [87], [89]; HH: Privathaushalte; EW: Einwohnerzahl

Tabelle A 18: Entwicklung der Bevölkerung und Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz in Lima-Ost von 2007 bis 2030 (Ist-Zustand und Szenarien)

Monat	Lima-Ost							
	HH	EW	HH	EW	HH	EW	HH	EW
	2007*		2008		2009		2010	
Jan	327.353	1.588.798	356.022	1.663.441	383.385	1.736.768	396.408	1.795.762
Feb	329.742	1.595.018	358.411	1.669.662	384.468	1.741.672	397.523	1.800.813
März	332.131	1.601.239	360.800	1.675.882	385.550	1.746.576	398.637	1.805.863
Apr	334.520	1.607.459	363.190	1.682.102	386.633	1.751.480	399.752	1.810.913
Mai	336.909	1.613.679	365.579	1.688.322	387.715	1.756.384	400.867	1.815.964
Jun	339.298	1.619.899	367.968	1.694.543	388.798	1.761.288	401.982	1.821.014
Jul	341.687	1.626.120	370.357	1.700.763	389.880	1.766.192	403.097	1.826.064
Aug	344.076	1.632.340	372.746	1.706.983	390.963	1.771.096	404.212	1.831.115
Sep	346.466	1.638.560	375.135	1.713.203	392.045	1.776.000	405.327	1.836.165
Okt	348.855	1.644.780	377.524	1.719.424	393.128	1.780.904	406.441	1.841.216
Nov	351.244	1.651.001	379.913	1.725.644	394.210	1.785.808	407.556	1.846.266
Dez	353.633	1.657.221	382.303	1.731.864	395.293	1.790.712	408.671	1.851.316
	2011		2012		2013		2014	
Jan	409.820	1.856.521	423.634	1.919.100	437.789	1.983.223	452.257	2.048.762
Feb	410.969	1.861.725	424.812	1.924.434	438.993	1.988.676	453.484	2.054.322
März	412.118	1.866.929	425.989	1.929.768	440.196	1.994.128	454.711	2.059.881
Apr	413.266	1.872.133	427.166	1.935.101	441.400	1.999.581	455.938	2.065.441
Mai	414.415	1.877.337	428.344	1.940.435	442.604	2.005.034	457.166	2.071.001
Jun	415.564	1.882.541	429.521	1.945.768	443.807	2.010.486	458.393	2.076.560
Jul	416.713	1.887.746	430.698	1.951.102	445.011	2.015.939	459.620	2.082.120
Aug	417.862	1.892.950	431.876	1.956.436	446.215	2.021.392	460.847	2.087.680
Sep	419.010	1.898.154	433.053	1.961.769	447.418	2.026.844	462.075	2.093.239
Okt	420.159	1.903.358	434.231	1.967.103	448.622	2.032.297	463.302	2.098.799
Nov	421.308	1.908.562	435.408	1.972.437	449.826	2.037.750	464.529	2.104.359
Dez	422.457	1.913.767	436.585	1.977.770	451.029	2.043.202	465.757	2.109.918
	2015		2016		2017		2018	
Jan	467.005	2.115.573	482.004	2.183.521	497.243	2.252.553	512.708	2.322.611
Feb	468.253	2.121.228	483.272	2.189.752	498.530	2.258.385	514.013	2.328.523
März	469.501	2.126.883	484.541	2.196.470	500.817	2.264.216	515.318	2.334.435
Apr	470.750	2.132.537	485.809	2.203.673	501.104	2.270.047	516.623	2.340.347
Mai	471.998	2.138.192	487.077	2.211.362	502.392	2.275.879	517.928	2.346.259
Jun	473.246	2.143.847	488.346	2.219.538	503.679	2.281.710	519.233	2.352.171
Jul	474.494	2.149.502	489.614	2.228.199	504.966	2.287.542	520.538	2.358.083
Aug	475.743	2.155.156	490.882	2.237.346	506.254	2.293.373	521.843	2.363.995
Sep	476.991	2.160.811	492.150	2.246.979	507.541	2.299.205	523.148	2.369.907
Okt	478.239	2.166.466	493.419	2.257.099	508.828	2.305.036	524.453	2.375.819
Nov	479.487	2.172.120	494.687	2.267.704	510.115	2.310.868	525.758	2.381.731
Dez	480.736	2.177.775	495.955	2.246.722	511.403	2.316.699	527.063	2.387.643

Fortsetzung von Tabelle A 18

Monat	Lima-Ost							
	HH	EW	HH	EW	HH	EW	HH	EW
	2019	2020		2021		2022		
Jan	528.385	2.393.630	544.259	2.465.541	560.314	2.538.270	576.531	2.611.737
Feb	529.706	2.399.617	545.596	2.471.596	561.664	2.544.387	577.894	2.617.910
März	531.028	2.405.604	546.932	2.477.652	563.014	2.550.505	579.256	2.624.083
Apr	532.350	2.411.591	548.269	2.483.708	564.365	2.556.623	580.619	2.630.256
Mai	533.671	2.417.577	549.606	2.489.763	565.715	2.562.740	581.982	2.636.428
Jun	534.993	2.423.564	550.943	2.495.819	567.066	2.568.858	583.344	2.642.601
Jul	536.314	2.429.551	552.279	2.501.874	568.416	2.574.976	584.707	2.648.774
Aug	537.636	2.435.538	553.616	2.507.930	569.767	2.581.094	586.070	2.654.947
Sep	538.957	2.441.525	554.953	2.513.985	571.117	2.587.211	587.432	2.661.120
Okt	540.279	2.447.512	556.290	2.520.041	572.468	2.593.329	588.795	2.667.293
Nov	541.601	2.453.499	557.626	2.526.096	573.818	2.599.447	590.158	2.673.466
Dez	542.922	2.459.485	558.963	2.532.152	575.169	2.605.564	576.531	2.611.737
	2023	2024		2025		2026		
Jan	592.893	2.685.859	609.380	2.760.546	625.971	2.835.706	642.645	2.911.238
Feb	594.267	2.692.080	610.762	2.766.807	627.360	2.841.998	644.039	2.917.554
März	595.640	2.698.300	612.144	2.773.068	628.749	2.848.291	645.433	2.923.870
Apr	597.013	2.704.521	613.526	2.779.328	630.139	2.854.583	646.828	2.930.186
Mai	598.386	2.710.741	614.908	2.785.589	631.528	2.860.875	648.222	2.936.501
Jun	599.759	2.716.962	616.290	2.791.850	632.917	2.867.168	649.616	2.942.817
Jul	601.132	2.723.183	617.672	2.798.110	634.306	2.873.460	651.010	2.949.133
Aug	602.506	2.729.403	619.054	2.804.371	635.695	2.879.753	652.404	2.955.449
Sep	603.879	2.735.624	620.436	2.810.631	637.084	2.886.045	653.798	2.961.764
Okt	605.252	2.741.845	621.818	2.816.892	638.473	2.892.338	655.193	2.968.080
Nov	606.625	2.748.065	623.200	2.823.153	639.862	2.898.630	656.587	2.974.396
Dez	607.998	2.754.286	624.582	2.829.413	641.251	2.904.923	657.981	2.980.712
	2027	2028		2029		2030		
Jan	659.378	2.987.042	676.148	3.063.009	692.929	3.139.028	709.696	3.214.985
Feb	660.776	2.993.372	677.546	3.069.344	694.326	3.145.359	711.090	3.221.302
März	662.173	2.999.702	678.945	3.075.679	695.724	3.151.690	712.485	3.227.619
Apr	663.570	3.006.032	680.343	3.082.015	697.121	3.158.021	713.879	3.233.935
Mai	664.968	3.012.362	681.742	3.088.350	698.519	3.164.352	715.274	3.240.252
Jun	666.365	3.018.692	683.140	3.094.685	699.916	3.170.683	716.668	3.246.569
Jul	667.762	3.025.023	684.539	3.101.020	701.314	3.177.014	718.062	3.252.885
Aug	669.160	3.031.353	685.937	3.107.356	702.711	3.183.345	719.457	3.259.202
Sep	670.557	3.037.683	687.336	3.113.691	704.109	3.189.676	720.851	3.265.519
Okt	671.954	3.044.013	688.734	3.120.026	705.506	3.196.006	722.245	3.271.836
Nov	673.352	3.050.343	690.133	3.126.362	706.904	3.202.337	723.640	3.278.152
Dez	674.749	3.056.673	691.531	3.132.697	708.302	3.208.668	725.034	3.284.469

Quelle: * [87], [89]; HH: Privathaushalte; EW: Einwohnerzahl

Tabelle A 19: Entwicklung der Bevölkerung und Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz in Lima-Mitte von 2007 bis 2030 (Ist-Zustand und Szenarien)

Monat	Lima-Mitte							
	HH 2007*	EW 2008	HH 2009	EW 2010	HH 2011	EW 2012	HH 2013	EW 2014
Jan	460.579	1.728.416	473.054	1.773.999	484.425	1.815.546	483.681	1.812.757
Feb	461.619	1.732.215	474.093	1.777.797	484.362	1.815.309	483.632	1.812.572
März	462.658	1.736.013	475.133	1.781.596	484.299	1.815.072	483.582	1.812.387
Apr	463.698	1.739.812	476.172	1.785.394	484.236	1.814.836	483.533	1.812.202
Mai	464.737	1.743.610	477.212	1.789.193	484.172	1.814.599	483.483	1.812.017
Jun	465.777	1.747.409	478.251	1.792.991	484.109	1.814.362	483.434	1.811.832
Jul	466.816	1.751.207	479.291	1.796.790	484.046	1.814.126	483.385	1.811.646
Aug	467.856	1.755.006	480.330	1.800.588	483.983	1.813.889	483.335	1.811.461
Sep	468.895	1.758.804	481.370	1.804.387	483.920	1.813.652	483.286	1.811.276
Okt	469.935	1.762.603	482.409	1.808.185	483.857	1.813.416	483.236	1.811.091
Nov	470.974	1.766.401	483.449	1.811.984	483.793	1.813.179	483.187	1.810.906
Dez	472.014	1.770.200	484.488	1.815.782	483.730	1.812.942	483.138	1.810.721
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Jan	483.102	1.810.589	482.689	1.809.039	482.390	1.807.919	482.185	1.807.149
Feb	483.067	1.810.457	482.663	1.808.944	482.372	1.807.853	482.173	1.807.107
März	483.032	1.810.324	482.638	1.808.848	482.355	1.807.787	482.162	1.807.064
Apr	482.997	1.810.192	482.612	1.808.752	482.337	1.807.721	482.151	1.807.022
Mai	482.961	1.810.060	482.587	1.808.656	482.320	1.807.655	482.139	1.806.979
Jun	482.926	1.809.928	482.561	1.808.560	482.302	1.807.589	482.128	1.806.936
Jul	482.891	1.809.796	482.536	1.808.464	482.284	1.807.523	482.116	1.806.894
Aug	482.856	1.809.664	482.510	1.808.369	482.267	1.807.456	482.105	1.806.851
Sep	482.820	1.809.532	482.484	1.808.273	482.249	1.807.390	482.094	1.806.809
Okt	482.785	1.809.399	482.459	1.808.177	482.231	1.807.324	482.082	1.806.766
Nov	482.750	1.809.267	482.433	1.808.081	482.214	1.807.258	482.071	1.806.723
Dez	482.715	1.809.135	482.408	1.807.985	482.196	1.807.192	482.185	1.807.149
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Jan	482.053	1.806.656	481.996	1.806.442	482.220	1.807.281	482.718	1.809.149
Feb	482.046	1.806.631	482.013	1.806.517	482.259	1.807.429	482.780	1.809.382
März	482.040	1.806.605	482.030	1.806.605	482.299	1.807.578	482.842	1.809.615
Apr	482.033	1.806.580	482.046	1.806.705	482.339	1.807.727	482.905	1.809.847
Mai	482.026	1.806.555	482.063	1.806.817	482.378	1.807.875	482.967	1.810.080
Jun	482.019	1.806.530	482.080	1.806.942	482.418	1.808.024	483.029	1.810.313
Jul	482.013	1.806.505	482.096	1.807.079	482.458	1.808.173	483.091	1.810.546
Aug	482.006	1.806.480	482.113	1.807.228	482.497	1.808.321	483.153	1.810.779
Sep	481.999	1.806.455	482.130	1.807.390	482.537	1.808.470	483.215	1.811.012
Okt	481.993	1.806.430	482.147	1.807.564	482.577	1.808.618	483.278	1.811.245
Nov	481.986	1.806.405	482.163	1.807.751	482.616	1.808.767	483.340	1.811.478
Dez	481.979	1.806.380	482.180	1.807.132	482.656	1.808.916	483.402	1.811.711

Fortsetzung von Tabelle A 19

Monat	Lima-Mitte							
	HH	EW	HH	EW	HH	EW	HH	EW
	2019		2020		2021		2022	
	2019	2020	2021	2022				
Jan	483.486	1.812.027	484.519	1.815.897	485.812	1.820.744	487.363	1.826.555
Feb	483.570	1.812.342	484.625	1.816.294	485.940	1.821.222	487.511	1.827.112
März	483.655	1.812.658	484.731	1.816.691	486.067	1.821.700	487.660	1.827.669
Apr	483.739	1.812.974	484.837	1.817.089	486.194	1.822.177	487.808	1.828.226
Mai	483.823	1.813.290	484.943	1.817.486	486.322	1.822.655	487.957	1.828.783
Jun	483.907	1.813.605	485.049	1.817.883	486.449	1.823.132	488.106	1.829.340
Jul	483.992	1.813.921	485.155	1.818.280	486.577	1.823.610	488.254	1.829.897
Aug	484.076	1.814.237	485.261	1.818.678	486.704	1.824.088	488.403	1.830.454
Sep	484.160	1.814.552	485.367	1.819.075	486.832	1.824.565	488.552	1.831.011
Okt	484.244	1.814.868	485.473	1.819.472	486.959	1.825.043	488.700	1.831.568
Nov	484.328	1.815.184	485.579	1.819.869	487.086	1.825.520	488.849	1.832.125
Dez	484.413	1.815.500	485.685	1.820.267	487.214	1.825.998	488.997	1.832.682
	2023	2024	2025	2026				
Jan	489.167	1.833.318	491.223	1.841.024	493.529	1.849.664	496.082	1.859.234
Feb	489.337	1.833.954	491.413	1.841.737	493.740	1.850.455	496.314	1.860.102
März	489.506	1.834.589	491.604	1.842.451	493.951	1.851.246	496.545	1.860.970
Apr	489.676	1.835.225	491.794	1.843.164	494.162	1.852.037	496.777	1.861.838
Mai	489.845	1.835.861	491.985	1.843.878	494.373	1.852.828	497.008	1.862.707
Jun	490.015	1.836.496	492.175	1.844.592	494.584	1.853.619	497.240	1.863.575
Jul	490.185	1.837.132	492.365	1.845.305	494.795	1.854.410	497.472	1.864.443
Aug	490.354	1.837.768	492.556	1.846.019	495.006	1.855.202	497.703	1.865.311
Sep	490.524	1.838.403	492.746	1.846.732	495.217	1.855.993	497.935	1.866.179
Okt	490.693	1.839.039	492.937	1.847.446	495.428	1.856.784	498.167	1.867.047
Nov	490.863	1.839.674	493.127	1.848.160	495.639	1.857.575	498.398	1.867.916
Dez	491.033	1.840.310	493.317	1.848.873	495.850	1.858.366	498.630	1.868.784
	2027	2028	2029	2030				
Jan	498.882	1.869.729	501.929	1.881.147	505.221	1.893.488	508.761	1.906.752
Feb	499.134	1.870.674	502.201	1.882.169	505.515	1.894.586	509.075	1.907.929
März	499.387	1.871.619	502.474	1.883.191	505.808	1.895.685	509.389	1.909.105
Apr	499.639	1.872.564	502.747	1.884.213	506.101	1.896.784	509.702	1.910.281
Mai	499.891	1.873.509	503.019	1.885.235	506.394	1.897.883	510.016	1.911.457
Jun	500.143	1.874.454	503.292	1.886.257	506.688	1.898.982	510.330	1.912.634
Jul	500.395	1.875.399	503.565	1.887.279	506.981	1.900.081	510.644	1.913.810
Aug	500.647	1.876.344	503.838	1.888.301	507.274	1.901.180	510.958	1.914.986
Sep	500.900	1.877.290	504.110	1.889.323	507.567	1.902.279	511.272	1.916.162
Okt	501.152	1.878.235	504.383	1.890.345	507.861	1.903.378	511.585	1.917.338
Nov	501.404	1.879.180	504.656	1.891.367	508.154	1.904.477	511.899	1.918.515
Dez	501.656	1.880.125	504.928	1.892.389	508.447	1.905.576	512.213	1.919.691

Quelle: * [87], [89]; HH: Privathaushalte; EW: Einwohnerzahl

Tabelle A 20: Entwicklung der Bevölkerung und Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz in Lima-Süd von 2007 bis 2030 (Ist-Zustand und Szenarien)

Monat	Lima-Süd							
	HH 2007*	EW 2008	HH 2009	EW 2010	HH 2011	EW 2012	HH 2013	EW 2014
Jan	224.479	1.181.988	248.216	1.228.044	270.593	1.273.172	278.035	1.308.188
Feb	226.457	1.185.826	250.194	1.231.882	271.212	1.276.081	278.675	1.311.198
März	228.435	1.189.664	252.172	1.235.720	271.830	1.278.991	279.315	1.314.209
Apr	230.413	1.193.502	254.150	1.239.558	272.448	1.281.900	279.955	1.317.219
Mai	232.392	1.197.340	256.128	1.243.396	273.067	1.284.810	280.595	1.320.229
Jun	234.370	1.201.178	258.106	1.247.234	273.685	1.287.720	281.234	1.323.240
Jul	236.348	1.205.016	260.084	1.251.072	274.304	1.290.629	281.874	1.326.250
Aug	238.326	1.208.854	262.063	1.254.910	274.922	1.293.539	282.514	1.329.261
Sep	240.304	1.212.692	264.041	1.258.748	275.540	1.296.448	283.154	1.332.271
Okt	242.282	1.216.530	266.019	1.262.586	276.159	1.299.358	283.794	1.335.282
Nov	244.260	1.220.368	267.997	1.266.424	276.777	1.302.268	284.434	1.338.292
Dez	246.238	1.224.206	269.975	1.270.262	277.396	1.305.177	285.073	1.341.302
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Jan	285.736	1.344.421	293.711	1.381.945	301.933	1.420.630	310.396	1.460.446
Feb	286.399	1.347.540	294.395	1.385.161	302.637	1.423.940	311.119	1.463.848
März	287.062	1.350.659	295.078	1.388.377	303.340	1.427.250	311.842	1.467.250
Apr	287.725	1.353.778	295.762	1.391.592	304.044	1.430.561	312.565	1.470.653
Mai	288.388	1.356.897	296.445	1.394.808	304.747	1.433.871	313.288	1.474.055
Jun	289.051	1.360.016	297.129	1.398.024	305.451	1.437.181	314.011	1.477.457
Jul	289.713	1.363.135	297.812	1.401.240	306.155	1.440.492	314.734	1.480.859
Aug	290.376	1.366.253	298.496	1.404.456	306.858	1.443.802	315.457	1.484.262
Sep	291.039	1.369.372	299.179	1.407.672	307.562	1.447.112	316.180	1.487.664
Okt	291.702	1.372.491	299.863	1.410.888	308.265	1.450.423	316.903	1.491.066
Nov	292.365	1.375.610	300.546	1.414.103	308.969	1.453.733	317.627	1.494.469
Dez	293.028	1.378.729	301.230	1.417.319	309.672	1.457.044	318.350	1.497.871
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Jan	319.092	1.501.362	328.018	1.543.360	337.206	1.586.591	346.660	1.631.075
Feb	319.834	1.504.853	328.781	1.547.262	337.992	1.590.289	347.469	1.634.879
März	320.576	1.508.345	329.545	1.551.472	338.778	1.593.987	348.277	1.638.683
Apr	321.318	1.511.836	330.309	1.555.990	339.564	1.597.685	349.086	1.642.487
Mai	322.060	1.515.327	331.073	1.560.817	340.350	1.601.384	349.894	1.646.291
Jun	322.802	1.518.818	331.837	1.565.952	341.136	1.605.082	350.702	1.650.095
Jul	323.544	1.522.309	332.601	1.571.395	341.922	1.608.780	351.511	1.653.899
Aug	324.286	1.525.801	333.364	1.577.146	342.708	1.612.478	352.319	1.657.703
Sep	325.028	1.529.292	334.128	1.583.205	343.494	1.616.177	353.128	1.661.506
Okt	325.770	1.532.783	334.892	1.589.573	344.280	1.619.875	353.936	1.665.310
Nov	326.512	1.536.274	335.656	1.596.249	345.066	1.623.573	354.745	1.669.114
Dez	327.254	1.539.766	336.420	1.582.892	345.852	1.627.271	355.553	1.672.918

Fortsetzung von Tabelle A 20

Monat	Lima-Süd							
	HH	EW	HH	EW	HH	EW	HH	EW
	2019		2020		2021		2022	
	2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
Jan	356.384	1.676.829	366.380	1.723.861	376.649	1.772.177	387.191	1.821.777
Feb	357.215	1.680.739	367.234	1.727.878	377.526	1.776.302	388.090	1.826.007
März	358.047	1.684.649	368.088	1.731.896	378.402	1.780.426	388.989	1.830.238
Apr	358.878	1.688.560	368.942	1.735.913	379.279	1.784.551	389.888	1.834.469
Mai	359.709	1.692.470	369.796	1.739.931	380.156	1.788.675	390.788	1.838.699
Jun	360.540	1.696.381	370.650	1.743.948	381.032	1.792.799	391.687	1.842.930
Jul	361.371	1.700.291	371.503	1.747.966	381.909	1.796.924	392.586	1.847.161
Aug	362.202	1.704.202	372.357	1.751.983	382.785	1.801.048	393.485	1.851.392
Sep	363.033	1.708.112	373.211	1.756.001	383.662	1.805.173	394.384	1.855.622
Okt	363.864	1.712.023	374.065	1.760.018	384.539	1.809.297	395.283	1.859.853
Nov	364.695	1.715.933	374.919	1.764.036	385.415	1.813.421	396.183	1.864.084
Dez	365.527	1.719.844	375.773	1.768.053	386.292	1.817.546	397.082	1.868.314
	2023	2024	2025	2026	2023	2024	2025	2026
Jan	398.003	1.872.650	409.083	1.924.783	420.426	1.978.153	432.026	2.032.729
Feb	398.925	1.876.986	410.027	1.929.223	421.391	1.982.693	433.011	2.037.366
März	399.846	1.881.322	410.970	1.933.662	422.356	1.987.233	433.997	2.042.004
Apr	400.768	1.885.658	411.914	1.938.101	423.321	1.991.773	434.982	2.046.641
Mai	401.689	1.889.994	412.857	1.942.540	424.286	1.996.313	435.968	2.051.279
Jun	402.611	1.894.329	413.801	1.946.979	425.251	2.000.853	436.954	2.055.916
Jul	403.532	1.898.665	414.744	1.951.418	426.216	2.005.392	437.939	2.060.553
Aug	404.454	1.903.001	415.688	1.955.857	427.180	2.009.932	438.925	2.065.191
Sep	405.375	1.907.337	416.631	1.960.296	428.145	2.014.472	439.910	2.069.828
Okt	406.297	1.911.673	417.575	1.964.735	429.110	2.019.012	440.896	2.074.466
Nov	407.218	1.916.009	418.518	1.969.174	430.075	2.023.552	441.882	2.079.103
Dez	408.140	1.920.344	419.461	1.973.613	431.040	2.028.092	442.867	2.083.740
	2027	2028	2029	2030	2027	2028	2029	2030
Jan	443.873	2.088.471	455.958	2.145.332	468.268	2.203.256	480.791	2.262.176
Feb	444.878	2.093.202	456.982	2.150.152	469.311	2.208.160	481.850	2.267.158
März	445.884	2.097.933	458.007	2.154.972	470.353	2.213.063	482.908	2.272.139
Apr	446.889	2.102.664	459.031	2.159.792	471.395	2.217.967	483.967	2.277.120
Mai	447.895	2.107.395	460.055	2.164.612	472.437	2.222.870	485.026	2.282.101
Jun	448.900	2.112.126	461.080	2.169.432	473.479	2.227.774	486.084	2.287.082
Jul	449.906	2.116.857	462.104	2.174.252	474.522	2.232.677	487.143	2.292.063
Aug	450.911	2.121.588	463.129	2.179.072	475.564	2.237.581	488.202	2.297.044
Sep	451.917	2.126.319	464.153	2.183.892	476.606	2.242.485	489.260	2.302.025
Okt	452.922	2.131.050	465.177	2.188.712	477.648	2.247.388	490.319	2.307.006
Nov	453.928	2.135.781	466.202	2.193.532	478.690	2.252.292	491.378	2.311.987
Dez	454.933	2.140.512	467.226	2.198.352	479.732	2.257.195	492.436	2.316.968

Quelle: * [87], [89]; HH: Privathaushalte; EW: Einwohnerzahl

Tabelle A 21: Entwicklung der Bevölkerung und Privathaushalte mit Anschluss an das Trinkwassernetz in der Provinz Callao von 2007 bis 2030 (Ist-Zustand und Szenarien)

Monat	Provinz Callao							
	HH 2007*	EW 2008	HH 2009	EW 2010	HH 2011	EW 2012	HH 2013	EW 2014
Jan	136.507	657.491	145.539	674.116	154.144	690.660	158.079	706.371
Feb	137.260	658.877	146.291	675.502	154.470	691.963	158.424	707.743
März	138.013	660.262	147.044	676.887	154.796	693.267	158.769	709.115
Apr	138.765	661.648	147.796	678.273	155.123	694.570	159.113	710.488
Mai	139.518	663.033	148.549	679.658	155.449	695.874	159.458	711.860
Jun	140.270	664.418	149.302	681.044	155.776	697.178	159.803	713.232
Jul	141.023	665.804	150.054	682.429	156.102	698.481	160.148	714.604
Aug	141.776	667.189	150.807	683.814	156.429	699.785	160.492	715.976
Sep	142.528	668.575	151.559	685.200	156.755	701.088	160.837	717.348
Okt	143.281	669.960	152.312	686.585	157.082	702.392	161.182	718.720
Nov	144.033	671.346	153.065	687.971	157.408	703.696	161.527	720.092
Dez	144.786	672.731	153.817	689.356	157.734	704.999	161.871	721.464
	2011	2012	2013	2014				
Jan	162.234	722.904	166.610	740.260	171.219	758.493	176.086	777.710
Feb	162.597	724.345	166.992	741.773	171.623	760.087	176.513	779.394
März	162.960	725.785	167.375	743.285	172.026	761.681	176.941	781.078
Apr	163.323	727.225	167.757	744.798	172.430	763.275	177.368	782.762
Mai	163.686	728.665	168.139	746.311	172.834	764.869	177.795	784.446
Jun	164.049	730.106	168.522	747.823	173.237	766.463	178.222	786.130
Jul	164.412	731.546	168.904	749.336	173.641	768.057	178.649	787.814
Aug	164.775	732.986	169.286	750.849	174.045	769.651	179.076	789.499
Sep	165.139	734.426	169.669	752.361	174.448	771.244	179.503	791.183
Okt	165.502	735.867	170.051	753.874	174.852	772.838	179.930	792.867
Nov	165.865	737.307	170.433	755.387	175.256	774.432	180.357	794.551
Dez	166.228	738.747	170.816	756.899	175.659	776.026	180.784	796.235
	2015	2016	2017	2018				
Jan	181.236	798.018	186.698	819.541	192.539	842.595	198.764	867.195
Feb	181.689	799.801	187.182	821.451	193.055	844.635	199.312	869.364
März	182.141	801.584	187.666	823.362	193.571	846.674	199.860	871.533
Apr	182.594	803.367	188.150	825.272	194.087	848.713	200.408	873.701
Mai	183.046	805.150	188.634	827.183	194.603	850.752	200.957	875.870
Jun	183.499	806.933	189.118	829.093	195.119	852.791	201.505	878.039
Jul	183.951	808.716	189.602	831.004	195.635	854.831	202.053	880.207
Aug	184.404	810.499	190.087	832.914	196.151	856.870	202.601	882.376
Sep	184.856	812.282	190.571	834.825	196.667	858.909	203.149	884.545
Okt	185.309	814.065	191.055	836.735	197.184	860.948	203.697	886.713
Nov	185.761	815.848	191.539	838.646	197.700	862.987	204.246	888.882
Dez	186.214	817.630	192.023	840.556	198.216	865.027	204.794	891.051

Fortsetzung von Tabelle A 21

Monat	Provinz Callao							
	HH	EW	HH	EW	HH	EW	HH	EW
	2019		2020		2021		2022	
	2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
Jan	205.374	893.349	212.371	921.061	219.806	950.326	228.105	981.137
Feb	205.955	895.648	212.983	923.489	220.504	952.883	228.729	983.822
März	206.535	897.946	213.596	925.917	221.201	955.440	229.353	986.506
Apr	207.115	900.245	214.208	928.345	221.899	957.997	229.977	989.191
Mai	207.696	902.543	214.821	930.773	222.597	960.554	230.601	991.875
Jun	208.276	904.842	215.433	933.201	223.294	963.111	231.225	994.560
Jul	208.856	907.140	216.046	935.629	223.992	965.668	231.849	997.244
Aug	209.437	909.439	216.658	938.057	224.690	968.225	232.473	999.929
Sep	210.017	911.737	217.271	940.485	225.387	970.782	233.097	1.002.613
Okt	210.598	914.036	217.883	942.913	226.085	973.339	233.722	1.005.298
Nov	211.178	916.334	218.496	945.341	226.783	975.896	234.346	1.007.982
Dez	211.758	918.633	219.108	947.770	227.480	978.453	234.970	1.010.666
	2023	2024	2025	2026	2023	2024	2025	2026
Jan	235.623	1.013.477	243.491	1.047.321	251.703	1.082.639	260.247	1.119.391
Feb	236.276	1.016.287	244.173	1.050.254	252.412	1.085.692	260.984	1.122.560
März	236.930	1.019.097	244.855	1.053.187	253.122	1.088.745	261.721	1.125.729
Apr	237.583	1.021.907	245.537	1.056.120	253.832	1.091.798	262.458	1.128.899
Mai	238.236	1.024.717	246.219	1.059.053	254.542	1.094.851	263.194	1.132.068
Jun	238.890	1.027.527	246.901	1.061.987	255.252	1.097.904	263.931	1.135.237
Jul	239.543	1.030.337	247.583	1.064.920	255.961	1.100.957	264.668	1.138.406
Aug	240.196	1.033.147	248.265	1.067.853	256.671	1.104.010	265.405	1.141.575
Sep	240.850	1.035.957	248.947	1.070.786	257.381	1.107.063	266.141	1.144.744
Okt	241.503	1.038.767	249.629	1.073.719	258.091	1.110.116	266.878	1.147.913
Nov	242.156	1.041.577	250.311	1.076.652	258.801	1.113.169	267.615	1.151.082
Dez	242.810	1.044.388	250.993	1.079.586	259.510	1.116.222	268.352	1.154.251
	2027	2028	2029	2030	2027	2028	2029	2030
Jan	269.115	1.157.532	278.292	1.197.006	287.765	1.237.751	297.516	1.279.696
Feb	269.877	1.160.813	279.079	1.200.393	288.575	1.241.239	298.349	1.283.278
März	270.640	1.164.093	279.867	1.203.780	289.386	1.244.726	299.182	1.286.859
Apr	271.403	1.167.374	280.654	1.207.167	290.197	1.248.214	300.014	1.290.441
Mai	272.165	1.170.655	281.442	1.210.554	291.008	1.251.701	300.847	1.294.022
Jun	272.928	1.173.935	282.229	1.213.941	291.819	1.255.189	301.680	1.297.604
Jul	273.691	1.177.216	283.017	1.217.328	292.630	1.258.677	302.513	1.301.186
Aug	274.454	1.180.497	283.804	1.220.715	293.440	1.262.164	303.345	1.304.767
Sep	275.216	1.183.777	284.591	1.224.103	294.251	1.265.652	304.178	1.308.349
Okt	275.979	1.187.058	285.379	1.227.490	295.062	1.269.139	305.011	1.311.931
Nov	276.742	1.190.339	286.166	1.230.877	295.873	1.272.627	305.843	1.315.512
Dez	269.115	1.157.532	286.954	1.234.264	296.684	1.276.114	306.676	1.319.094

Quelle: * [87], [89]; HH: Privathaushalte; EW: Einwohnerzahl

Tabelle A 22: Ausstattung der Privathaushalte von Lima und der Provinz Callao je nach Wasserversorgungsform und Sozialschicht

Soziale Schicht/ Wasser-versorgung	Glühbirne ²		TV ¹		Radio ¹		Stereo ¹		Kühlschrank ¹		Herd ²	
	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²
TWN												
A	13	5	3	5	1	4	1	10	1	10	1	2
B			2	5	1	6				0	0	0
C	7	5	0	0	0	0	1	7,5	1	9	0	0
D			1	0	1	6	0	0		0	0	0
OTA												
D	5	4	1	5	1	7	0	0	1	8	0	0
TWA												
D	3	4	1	8	1	5	0	0	0	0	0	0
E												
PGW												
E	3	4	1	8	1	5	0	0	0	0	0	0
OGW												
E	3	4	1	8	1	5	0	0	0	0	0	0

Fortsetzung von Tabelle A 22

Soziale Schicht/ Wasserversorgung	Waschmaschine ¹		Mikrowelle ²		Elektrische Wassertherme ²		Computer ¹	
	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²	AN ²	VER (h/d) ²
TWN								
A	1	1	1	0,25	0		0	2
B	1	1	1	0,25	0		0	1
C					1		0,5	1
D	0	0	0	0	0		0	0
OTA								
D	0	0	0	0	0		0	0
TWA								
D	0	0	0	0	0		0	0
E								
PGW								
E	0	0	0	0	0		0	0
OGW								
E	0	0	0	0	0		0	0

TWN: Trinkwassernetz; PGW: Private Grundwasserbrunnen; OTA: Öffentliche Trinkwasseranschlüsse; TWA: Tankwagen; OGW: Oberflächengewässer; A, B, C, D, E: Soziale Schicht; AN: Anzahl; VER: Verbrauch; h/d: Stunden pro Tag

1 Die Werte wurden auf Basis von [87] berechnet.

2 Mittlere Anzahl und mittlerer Verbrauch. Für das Trinkwasserversorgungsnetz, Mittelwert der Anzahl und des Verbrauchs aus den sozialen Schichten B, C und D. Die Werte wurden auf Basis von [131] berechnet.

Lima-Mitte

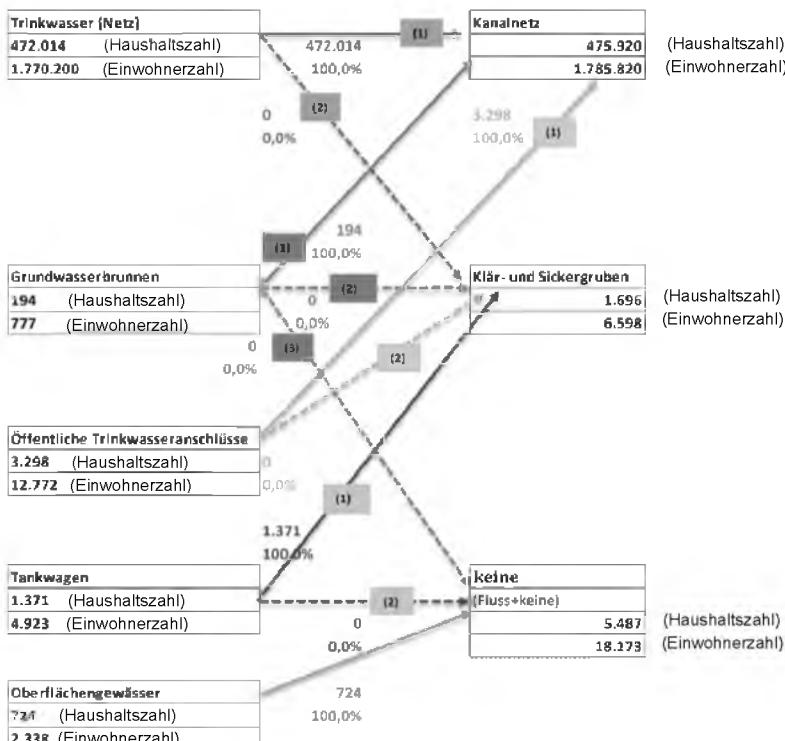


Bild A 1: Zusammenhänge zwischen Wasserversorgung, -verbrauch und Abwasseranfall am Beispiel der Privathaushalte von Lima-Mitte

	SO	SS	SNH	SNO	SN2	SALK	SI	X7	X8
p1	0	1 - fSI	cIn	0	0	cIn	fSI	0	-1
p2	1 - fSI	0	cIn	0	0	c2a	0	0	0
p3	0	-1	c3n	c3no	-1 c3no	c3a	0	0	0
p4	1 - $\frac{1}{YH_{min}}$	0	c4n	0	0	c4a	0	0	0
p5	0	0	c5n	c5no	-1 c5no	c5a	0	0	0
r6	-1 (1 - f61)	0	c6n	0	0	c6a	0	f61	0
r7	0	0	c7n	c7no	-1 c7no	c7a	0	f71	0
r8	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
r9	0	0	0	c9no	-1 c9no	c9a	0	0	0
r10	$\frac{-s4}{14} - \frac{1}{Y4} - 1$	0	c10n	c10no	0	c10a	0	0	0
r11	-1 (1 - f11)	0	c11n	0	0	c11a	0	f11	0
r12	0	0	c12n	c12no	-1 c12no	c12a	0	f12	0
r13	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	SO	SS	SNH	SNO	SN2	SALK	SI	X7	X8

Bild A 2: Ein Teil der Stöchiometrie und Kinetik des ASM3-Modells (basiert auf [69])

(Quelle: SIMBA#, ifak e.V.)

Tabelle A 23: Verbrauchskoeffizienten zur Berechnung des Strombedarfs der Abwasserreinigung

Aufgabe/Komponente	Verbrauchskoeffizienten (kWh/m ³)							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014–2030*
Abwasserreinigung	0,4381	0,4768	0,4453	0,4613	0,4165	0,2628	0,1337	0,3764

Quelle: Selbst berechnet auf Grundlage der Daten von [96], [97], [98], [99], [94], [100], [101]

* Mittelwert (2007–2014)

Tabelle A 24: Verbrauchkoeffizienten zur Berechnung des Strombedarfs der Grundwasserentnahme

Jahr	Verbrauchkoeffizienten [kWh/ m ³]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	0,46	0,45	0,37	0,44	0,37	0,29	0,28	0,29	0,30	0,28	0,30	0,28
2008	0,39	0,43	0,39	0,43	0,32	0,29	0,28	0,31	0,27	0,30	0,33	0,35
2009	0,45	0,43	0,35	0,41	0,38	0,35	0,25	0,29	0,29	0,28	0,31	0,42
2010	0,38	0,41	0,34	0,39	0,29	0,27	0,28	0,28	0,29	0,28	0,28	0,35
2011	0,42	0,43	0,36	0,43	0,36	0,29	0,29	0,30	0,30	0,29	0,31	0,38
2012	0,37	0,45	0,39	0,44	0,38	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,34
2013	0,46	0,47	0,38	0,46	0,31	0,32	0,32	0,31	0,33	0,34	0,34	0,39
2014–2030	0,46	0,47	0,38	0,46	0,31	0,32	0,32	0,31	0,33	0,34	0,34	0,39

Quelle: Selbst berechnet auf Grundlage der Daten von [96], [97], [98], [99], [94], [100], [101]

Tabelle A 25: Verbrauchkoeffizienten zur Berechnung des Strombedarfs der Trinkwasseraufbereitung aus Oberflächenwasser

Jahr	Verbrauchkoeffizienten [Wh/ m ³]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0	8,0	7,0	9,0	8,0	9,0	8,0
2008	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0	9,0	8,0	9,0	8,0	9,0	10,0	9,0
2009	8,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,0	8,0	8,0	7,0	7,0	7,0
2010	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0	10,0	8,0
2011	8,0	8,0	7,0	7,0	7,0	9,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0	8,0
2012	8,0	8,0	8,0	7,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0	9,0	9,0	8,0
2013	8,0	8,0	8,0	7,0	8,0	8,0	9,0	9,0	10,0	9,0	9,0	9,0
2014–2030	8,0	8,0	8,0	7,0	8,0	8,0	9,0	9,0	10,0	9,0	9,0	9,0

Quelle: Selbst berechnet auf Grundlage der Daten von [96], [97], [98], [99], [94], [100], [101]

Tabelle A 26: Verbrauchkoeffizienten zur Berechnung des Strombedarfs des Trinkwasserverteilungsnetzes

Jahr	Verbrauchkoeffizienten [kWh/ m ³]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	0,110	0,109	0,114	0,111	0,108	0,113	0,106	0,109	0,118	0,113	0,122	0,117
2008	0,114	0,121	0,125	0,122	0,120	0,114	0,108	0,113	0,116	0,111	0,117	0,111
2009	0,121	0,120	0,129	0,126	0,124	0,119	0,116	0,111	0,121	0,121	0,107	0,117
2010	0,120	0,121	0,133	0,128	0,126	0,128	0,121	0,128	0,133	0,129	0,132	0,123
2011	0,132	0,133	0,140	0,137	0,126	0,130	0,122	0,129	0,132	0,131	0,137	0,134
2012	0,133	0,136	0,145	0,142	0,132	0,138	0,129	0,133	0,138	0,134	0,143	0,134
2013	0,139	0,140	0,147	0,145	0,139	0,144	0,138	0,136	0,143	0,140	0,149	0,138
2014–2030	0,139	0,140	0,147	0,145	0,139	0,144	0,138	0,136	0,143	0,140	0,149	0,138

Quelle: Selbst berechnet auf Grundlage der Daten von [96], [97], [98], [99], [94], [100], [101]

Tabelle A 27: Verbrauchkoeffizienten zur Berechnung des Strombedarfs des Kanalnetzes

Jahr	Verbrauchkoeffizienten [Wh/ m ³]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	10,0	10,0	10,0	10,0	9,0	10,0	9,0	9,0	10,0	10,0	10,0	10,0
2008	10,0	10,0	11,0	11,0	10,0	11,0	10,0	10,0	11,0	9,0	9,0	9,0
2009	10,0	10,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	10,0
2010	12,0	12,0	12,0	13,0	12,0	13,0	12,0	13,0	13,0	12,0	13,0	12,0
2011	13,0	13,0	14,0	14,0	14,0	13,0	12,0	12,0	13,0	12,0	13,0	12,0
2012	12,0	13,0	14,0	14,0	13,0	14,0	13,0	13,0	14,0	14,0	14,0	13,0
2013	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	15,0	15,0	14,0	15,0	13,0
2014–2030	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	15,0	15,0	14,0	15,0	13,0

Quelle: Selbst berechnet auf Grundlage der Daten von [96], [97], [98], [99], [94], [100], [101]

Tabelle A 28: Aufteilung der mittleren monatlichen in Rechnung gestellten Wasservolumen der Gewerbe in Lima [m³/d]

Bezirk	2007					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	95.483,9	110.464,3	103.709,7	103.333,3	100.838,7	99.833,3
Lima Nord	12.575,6	14.548,6	13.658,9	13.609,4	13.280,8	13.148,4
Provinz Callao	4.897,1	5.665,4	5.318,9	5.299,6	5.171,7	5.120,1
Lima Mitte	52.843,6	61.134,2	57.396,0	57.187,7	55.807,1	55.250,7
Lima Ost	15.565,6	18.007,7	16.906,6	16.845,2	16.438,6	16.274,7
Lima Süd	9.602,0	11.108,5	10.429,2	10.391,4	10.140,5	10.039,4
Großkunden	126.096,8	154.285,7	144.387,1	150.600,0	146.000,0	143.000,0
Lima Nord	16.607,4	20.320,0	19.016,3	19.834,6	19.228,7	18.833,6
Provinz Callao	6.467,1	7.912,8	7.405,1	7.723,8	7.487,9	7.334,0
Lima Mitte	69.785,7	85.386,3	79.908,1	83.346,5	80.800,7	79.140,4
Lima Ost	20.556,1	25.151,4	23.537,7	24.550,6	23.800,7	23.311,6
Lima Süd	12.680,5	15.515,2	14.519,8	15.144,6	14.682,0	14.380,3
Gesamt	221.580,6	264.750,0	248.096,8	253.933,3	246.838,7	242.833,3
Bezirk	2007					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	93.806,5	93.322,6	94.166,7	91.548,4	98.700,0	96.967,7
Lima Nord	12.354,7	12.290,9	12.402,1	12.057,3	12.999,2	12.771,0
Provinz Callao	4.811,0	4.786,2	4.829,5	4.695,2	5.062,0	4.973,2
Lima Mitte	51.915,3	51.647,5	52.114,6	50.665,6	54.623,5	53.664,8
Lima Ost	15.292,2	15.213,3	15.350,9	14.924,1	16.089,9	15.807,5
Lima Süd	9.433,3	9.384,7	9.469,6	9.206,3	9.925,4	9.751,2
Großkunden	125.580,6	115.871,0	119.433,3	122.483,9	138.433,3	135.935,5
Lima Nord	16.539,4	15.260,6	15.729,8	16.131,6	18.232,2	17.903,2
Provinz Callao	6.440,6	5.942,6	6.125,3	6.281,8	7.099,8	6.971,7
Lima Mitte	69.500,0	64.126,4	66.097,9	67.786,2	76.613,1	75.230,7
Lima Ost	20.472,0	18.889,1	19.469,8	19.967,1	22.567,2	22.160,0
Lima Süd	12.628,6	11.652,2	12.010,4	12.317,2	13.921,1	13.669,9
Gesamt	219.387,1	209.193,5	213.600,0	214.032,3	237.133,3	232.903,2

Fortsetzung von Tabelle A 28

Bezirk	2008					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	95.871,0	116.071,4	104.645,2	114.766,7	103.064,5	109.366,7
Lima Nord	12.626,6	15.287,0	13.782,2	15.115,2	13.574,0	14.404,0
Provinz Callao	4.916,9	5.952,9	5.366,9	5.886,0	5.285,8	5.609,1
Lima Mitte	53.057,8	64.237,4	57.913,7	63.515,3	57.039,0	60.526,8
Lima Ost	15.628,7	18.921,8	17.059,1	18.709,1	16.801,4	17.828,8
Lima Süd	9.640,9	11.672,3	10.523,3	11.541,1	10.364,3	10.998,1
Großkunden	130.903,2	152.000,0	137.935,5	155.233,3	141.774,2	141.400,0
Lima Nord	17.240,4	20.019,0	18.166,6	20.444,8	18.672,2	18.622,9
Provinz Callao	6.713,6	7.795,6	7.074,3	7.961,4	7.271,1	7.251,9
Lima Mitte	72.445,7	84.121,3	76.337,6	85.910,7	78.462,0	78.254,9
Lima Ost	21.339,6	24.778,8	22.486,0	25.305,9	23.111,8	23.050,8
Lima Süd	13.163,8	15.285,4	13.871,0	15.610,5	14.257,0	14.219,4
Gesamt	226.774,2	268.071,4	242.580,6	270.000,0	244.838,7	250.766,7
Bezirk	2008					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	103.290,3	103.451,6	106.566,7	105.741,9	108.166,7	106.161,3
Lima Nord	13.603,7	13.625,0	14.035,2	13.926,6	14.245,9	13.981,8
Provinz Callao	5.297,4	5.305,7	5.465,5	5.423,2	5.547,5	5.444,7
Lima Mitte	57.163,9	57.253,2	58.977,1	58.520,7	59.862,6	58.752,8
Lima Ost	16.838,2	16.864,5	17.372,3	17.237,9	17.633,2	17.306,2
Lima Süd	10.387,0	10.403,3	10.716,5	10.633,6	10.877,4	10.675,7
Großkunden	126.903,2	124.451,6	125.633,3	129.806,5	136.700,0	135.806,5
Lima Nord	16.713,6	16.390,7	16.546,4	17.096,0	18.003,9	17.886,2
Provinz Callao	6.508,5	6.382,7	6.443,3	6.657,3	7.010,9	6.965,1
Lima Mitte	70.232,0	68.875,2	69.529,2	71.838,7	75.653,8	75.159,3
Lima Ost	20.687,6	20.287,9	20.480,5	21.160,8	22.284,6	22.138,9
Lima Süd	12.761,6	12.515,1	12.633,9	13.053,5	13.746,8	13.656,9
Gesamt	230.193,5	227.903,2	232.200,0	235.548,4	244.866,7	241.967,7
Bezirk	2009					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	108.387,1	120.678,6	105.774,2	115.500,0	109.193,5	110.100,0
Lima Nord	13.190,2	14.686,1	12.872,3	14.055,8	13.288,4	13.398,7
Provinz Callao	5.589,4	6.223,3	5.454,7	5.956,3	5.631,0	5.677,8
Lima Mitte	60.162,5	66.985,1	58.712,1	64.110,6	60.610,1	61.113,2
Lima Ost	19.119,3	21.287,4	18.658,3	20.374,0	19.261,5	19.421,4
Lima Süd	10.325,7	11.496,7	10.076,8	11.003,3	10.402,5	10.488,9
Großkunden	135.677,4	159.357,1	135.161,3	152.666,7	148.387,1	140.600,0
Lima Nord	16.511,4	19.393,1	16.448,5	18.578,9	18.058,1	17.110,4
Provinz Callao	6.996,8	8.217,9	6.970,2	7.872,9	7.652,2	7.250,6
Lima Mitte	75.310,5	88.454,4	75.024,0	84.740,7	82.365,3	78.042,9
Lima Ost	23.933,2	28.110,3	23.842,2	26.930,1	26.175,2	24.801,5
Lima Süd	12.925,6	15.181,4	12.876,4	14.544,1	14.136,4	13.394,5
Gesamt	244.064,5	280.035,7	240.935,5	268.166,7	257.580,6	250.700,0

Fortsetzung von Tabelle A 28

Bezirk	2009					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	100.129,0	99.451,6	108.000,0	101.193,5	106.533,3	105.290,3
Lima Nord	12.185,3	12.102,8	13.143,1	12.314,8	12.964,6	12.813,4
Provinz Callao	5.163,6	5.128,7	5.569,5	5.218,5	5.493,9	5.429,7
Lima Mitte	55.578,7	55.202,6	59.947,6	56.169,5	59.133,5	58.443,5
Lima Ost	17.662,5	17.543,1	19.051,0	17.850,3	18.792,3	18.573,0
Lima Süd	9.539,0	9.474,4	10.288,8	9.640,4	10.149,1	10.030,7
Großkunden	127.387,1	116.032,3	131.600,0	128.612,9	137.933,3	134.032,3
Lima Nord	15.502,5	14.120,6	16.015,1	15.651,6	16.785,9	16.311,1
Provinz Callao	6.569,3	5.983,7	6.786,5	6.632,5	7.113,1	6.912,0
Lima Mitte	70.708,8	64.406,1	73.047,3	71.389,2	76.562,7	74.397,3
Lima Ost	22.470,8	20.467,8	23.214,0	22.687,0	24.331,1	23.643,0
Lima Süd	12.135,8	11.054,0	12.537,1	12.252,5	13.140,5	12.768,8
Gesamt	227.516,1	215.483,9	239.600,0	229.806,5	244.466,7	239.322,6
2010						
Bezirk	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	104.677,4	120.464,3	114.451,6	119.333,3	107.516,1	113.300,0
Lima Nord	12.833,9	14.769,4	14.032,2	14.630,7	13.181,9	13.891,0
Provinz Callao	5.181,2	5.962,6	5.665,0	5.906,6	5.321,7	5.608,0
Lima Mitte	58.343,7	67.142,7	63.791,5	66.512,4	59.925,9	63.149,6
Lima Ost	17.560,6	20.209,0	19.200,3	20.019,3	18.036,8	19.007,1
Lima Süd	10.758,1	12.380,6	11.762,6	12.264,4	11.049,9	11.644,3
Großkunden	113.871,0	160.892,9	146.161,3	160.300,0	143.548,4	142.066,7
Lima Nord	13.961,0	19.726,1	17.920,0	19.653,4	17.599,6	17.417,9
Provinz Callao	5.636,2	7.963,7	7.234,5	7.934,3	7.105,2	7.031,8
Lima Mitte	63.467,8	89.676,2	81.465,4	89.345,8	80.009,0	79.183,2
Lima Ost	19.102,9	26.991,3	24.519,9	26.891,8	24.081,6	23.833,0
Lima Süd	11.703,0	16.535,6	15.021,6	16.474,7	14.753,0	14.600,7
Gesamt	218.548,4	281.357,1	260.612,9	279.633,3	251.064,5	255.366,7
2010						
Bezirk	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	108.677,4	102.419,4	109.566,7	106.161,3	110.366,7	116.516,1
Lima Nord	13.324,3	12.557,0	13.433,3	13.015,8	13.531,4	14.285,3
Provinz Callao	5.379,2	5.069,4	5.423,2	5.254,6	5.462,8	5.767,2
Lima Mitte	60.573,1	57.085,1	61.068,8	59.170,7	61.514,6	64.942,1
Lima Ost	18.231,6	17.181,8	18.380,8	17.809,5	18.515,0	19.546,6
Lima Süd	11.169,2	10.526,0	11.260,6	10.910,6	11.342,8	11.974,8
Großkunden	127.483,9	121.806,5	132.666,7	137.967,7	139.700,0	143.322,6
Lima Nord	15.630,0	14.934,0	16.265,5	16.915,4	17.127,8	17.571,9
Provinz Callao	6.310,0	6.029,0	6.566,6	6.828,9	6.914,7	7.094,0
Lima Mitte	71.055,2	67.890,8	73.943,9	76.898,6	77.864,1	79.883,2
Lima Ost	21.386,6	20.434,2	22.256,1	23.145,4	23.436,0	24.043,7
Lima Süd	13.102,0	12.518,5	13.634,7	14.179,5	14.357,5	14.729,8
Gesamt	236.161,3	224.225,8	242.233,3	244.129,0	250.066,7	259.838,7

Fortsetzung von Tabelle A 28

Bezirk	2011					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	112.871,0	132.428,6	119.806,5	125.133,3	117.806,5	121.166,7
Lima Nord	15.668,3	18.383,2	16.631,0	17.370,5	16.353,4	16.819,9
Provinz Callao	6.257,2	7.341,4	6.641,6	6.937,0	6.530,8	6.717,1
Lima Mitte	59.302,9	69.578,5	62.946,8	65.745,6	61.896,0	63.661,5
Lima Ost	20.053,1	23.527,8	21.285,3	22.231,7	20.930,0	21.526,9
Lima Süd	11.589,5	13.597,7	12.301,7	12.848,6	12.096,3	12.441,3
Großkunden	140.258,1	167.035,7	152.483,9	163.666,7	148.064,5	146.633,3
Lima Nord	19.470,0	23.187,2	21.167,2	22.719,5	20.553,7	20.355,0
Provinz Callao	7.775,4	9.259,9	8.453,2	9.073,1	8.208,2	8.128,8
Lima Mitte	73.692,2	87.761,3	80.115,7	85.991,2	77.793,7	77.041,8
Lima Ost	24.918,8	29.676,2	27.090,9	29.077,7	26.305,7	26.051,4
Lima Süd	14.401,6	17.151,2	15.657,0	16.805,2	15.203,2	15.056,3
Gesamt	253.129,0	299.464,3	272.290,3	288.800,0	265.871,0	267.800,0
Bezirk	2011					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	116.193,5	113.645,2	120.400,0	121.903,2	126.266,7	127.354,8
Lima Nord	16.129,5	15.775,7	16.713,4	16.922,1	17.527,8	17.678,9
Provinz Callao	6.441,4	6.300,1	6.674,6	6.757,9	6.999,8	7.060,1
Lima Mitte	61.048,6	59.709,6	63.258,7	64.048,5	66.341,0	66.912,8
Lima Ost	20.643,4	20.190,6	21.390,7	21.657,8	22.433,0	22.626,4
Lima Süd	11.930,7	11.669,0	12.362,6	12.517,0	12.965,0	13.076,7
Großkunden	133.064,5	119.677,4	129.900,0	135.548,4	147.566,7	147.516,1
Lima Nord	18.471,5	16.613,1	18.032,2	18.816,3	20.484,6	20.477,6
Provinz Callao	7.376,6	6.634,5	7.201,2	7.514,3	8.180,6	8.177,8
Lima Mitte	69.912,7	62.879,0	68.250,0	71.217,7	77.532,1	77.505,6
Lima Ost	23.640,8	21.262,4	23.078,5	24.082,1	26.217,3	26.208,3
Lima Süd	13.663,0	12.288,4	13.338,1	13.918,1	15.152,1	15.146,9
Gesamt	249.258,1	233.322,6	250.300,0	257.451,6	273.833,3	274.871,0
Bezirk	2012					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	126.483,9	139.571,4	133.677,4	141.566,7	133.483,9	133.966,7
Lima Nord	16.279,1	17.963,5	17.204,9	18.220,3	17.180,0	17.242,2
Provinz Callao	6.570,5	7.250,4	6.944,2	7.354,0	6.934,1	6.959,2
Lima Mitte	69.290,1	76.459,7	73.230,8	77.552,7	73.124,8	73.389,3
Lima Ost	21.655,3	23.896,0	22.886,9	24.237,6	22.853,8	22.936,4
Lima Süd	12.688,9	14.001,9	13.410,6	14.202,0	13.391,2	13.439,6
Großkunden	144.419,4	160.857,1	156.612,9	170.300,0	161.096,8	155.400,0
Lima Nord	18.587,5	20.703,1	20.156,8	21.918,4	20.733,9	20.000,7
Provinz Callao	7.502,2	8.356,1	8.135,6	8.846,6	8.368,5	8.072,6
Lima Mitte	79.115,5	88.120,4	85.795,3	93.293,3	88.251,6	85.130,9
Lima Ost	24.726,0	27.540,3	26.813,7	29.157,0	27.581,4	26.606,0
Lima Süd	14.488,2	16.137,3	15.711,5	17.084,6	16.161,3	15.589,8
Gesamt	270.903,2	300.428,6	290.290,3	311.866,7	294.580,6	289.366,7

Fortsetzung von Tabelle A 28

Bezirk	2012					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	129.064,5	127.064,5	131.033,3	131.096,8	133.533,3	138.322,6
Lima Nord	16.611,2	16.353,8	16.864,6	16.872,8	17.186,4	17.802,8
Provinz Callao	6.704,6	6.600,7	6.806,8	6.810,1	6.936,7	7.185,5
Lima Mitte	70.703,8	69.608,2	71.782,4	71.817,1	73.151,9	75.775,5
Lima Ost	22.097,1	21.754,7	22.434,2	22.445,1	22.862,2	23.682,2
Lima Süd	12.947,8	12.747,2	13.145,3	13.151,7	13.396,1	13.876,6
Großkunden	142.258,1	133.871,0	134.366,7	137.741,9	146.666,7	154.032,3
Lima Nord	18.309,3	17.229,8	17.293,6	17.728,0	18.876,7	19.824,7
Provinz Callao	7.389,9	6.954,2	6.980,0	7.155,3	7.618,9	8.001,6
Lima Mitte	77.931,5	73.336,9	73.608,4	75.457,5	80.346,6	84.381,6
Lima Ost	24.356,0	22.920,0	23.004,9	23.582,8	25.110,8	26.371,8
Lima Süd	14.271,4	13.430,0	13.479,7	13.818,3	14.713,7	15.452,6
Gesamt	271.322,6	260.935,5	265.400,0	268.838,7	280.200,0	292.354,8
Bezirk	2013					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	135.322,6	142.032,3	134.645,2	139.225,8	138.096,8	135.903,2
Lima Nord	17.416,7	18.280,2	17.329,5	17.919,0	17.773,7	17.491,4
Provinz Callao	7.029,6	7.378,2	6.994,5	7.232,4	7.173,8	7.059,8
Lima Mitte	74.132,1	77.807,8	73.761,0	76.270,3	75.651,8	74.450,2
Lima Ost	23.168,6	24.317,3	23.052,6	23.836,8	23.643,5	23.268,0
Lima Süd	13.575,6	14.248,7	13.507,7	13.967,2	13.853,9	13.633,9
Großkunden	146.387,1	159.741,9	153.258,1	162.741,9	161.548,4	153.354,8
Lima Nord	18.840,7	20.559,6	19.725,0	20.945,7	20.792,1	19.737,5
Provinz Callao	7.604,4	8.298,2	7.961,3	8.454,0	8.392,0	7.966,4
Lima Mitte	80.193,4	87.509,4	83.957,5	89.152,9	88.499,0	84.010,5
Lima Ost	25.062,9	27.349,4	26.239,3	27.863,0	27.658,7	26.255,9
Lima Süd	14.685,6	16.025,4	15.374,9	16.326,4	16.206,6	15.384,6
Gesamt	281.709,7	301.774,2	287.903,2	301.967,7	299.645,2	289.258,1
Bezirk	2013					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	131.548,4	127.387,1	133.903,2	134.193,5	133.967,7	141.903,2
Lima Nord	16.930,9	16.395,3	17.234,0	17.271,4	17.242,3	18.263,6
Provinz Callao	6.833,6	6.617,4	6.955,9	6.971,0	6.959,3	7.371,5
Lima Mitte	72.064,5	69.784,9	73.354,5	73.513,6	73.389,9	77.737,1
Lima Ost	22.522,4	21.809,9	22.925,5	22.975,3	22.936,6	24.295,2
Lima Süd	13.197,0	12.779,5	13.433,2	13.462,4	13.439,7	14.235,8
Großkunden	140.806,5	133.645,2	142.322,6	144.225,8	164.838,7	154.225,8
Lima Nord	18.122,5	17.200,8	18.317,6	18.562,6	21.215,5	19.849,6
Provinz Callao	7.314,5	6.942,5	7.393,3	7.492,1	8.562,9	8.011,6
Lima Mitte	77.136,2	73.213,2	77.966,8	79.009,4	90.301,5	84.487,6
Lima Ost	24.107,4	22.881,4	24.367,0	24.692,9	28.222,0	26.405,0
Lima Süd	14.125,8	13.407,3	14.277,9	14.468,8	16.536,7	15.472,0
Gesamt	272.354,8	261.032,3	276.225,8	278.419,4	298.806,5	296.129,0

Fortsetzung von Tabelle A 28

Bezirk	2014–2030					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
Nicht-Haushalte	135.322,6	142.032,3	134.645,2	139.225,8	138.096,8	135.903,2
Lima Nord	17.416,7	18.280,2	17.329,5	17.919,0	17.773,7	17.491,4
Provinz Callao	7.029,6	7.378,2	6.994,5	7.232,4	7.173,8	7.059,8
Lima Mitte	74.132,1	77.807,8	73.761,0	76.270,3	75.651,8	74.450,2
Lima Ost	23.168,6	24.317,3	23.052,6	23.836,8	23.643,5	23.268,0
Lima Süd	13.575,6	14.248,7	13.507,7	13.967,2	13.853,9	13.633,9
Großkunden	146.387,1	159.741,9	153.258,1	162.741,9	161.548,4	153.354,8
Lima Nord	18.840,7	20.559,6	19.725,0	20.945,7	20.792,1	19.737,5
Provinz Callao	7.604,4	8.298,2	7.961,3	8.454,0	8.392,0	7.966,4
Lima Mitte	80.193,4	87.509,4	83.957,5	89.152,9	88.499,0	84.010,5
Lima Ost	25.062,9	27.349,4	26.239,3	27.863,0	27.658,7	26.255,9
Lima Süd	14.685,6	16.025,4	15.374,9	16.326,4	16.206,6	15.384,6
Gesamt	281.709,7	301.774,2	287.903,2	301.967,7	299.645,2	289.258,1
2014–2030						
Bezirk	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nicht-Haushalte	131.548,4	127.387,1	133.903,2	134.193,5	133.967,7	141.903,2
Lima Nord	16.930,9	16.395,3	17.234,0	17.271,4	17.242,3	18.263,6
Provinz Callao	6.833,6	6.617,4	6.955,9	6.971,0	6.959,3	7.371,5
Lima Mitte	72.064,5	69.784,9	73.354,5	73.513,6	73.389,9	77.737,1
Lima Ost	22.522,4	21.809,9	22.925,5	22.975,3	22.936,6	24.295,2
Lima Süd	13.197,0	12.779,5	13.433,2	13.462,4	13.439,7	14.235,8
Großkunden	140.806,5	133.645,2	142.322,6	144.225,8	164.838,7	154.225,8
Lima Nord	18.122,5	17.200,8	18.317,6	18.562,6	21.215,5	19.849,6
Provinz Callao	7.314,5	6.942,5	7.393,3	7.492,1	8.562,9	8.011,6
Lima Mitte	77.136,2	73.213,2	77.966,8	79.009,4	90.301,5	84.487,6
Lima Ost	24.107,4	22.881,4	24.367,0	24.692,9	28.222,0	26.405,0
Lima Süd	14.125,8	13.407,3	14.277,9	14.468,8	16.536,7	15.472,0
Gesamt	272.354,8	261.032,3	276.225,8	278.419,4	298.806,5	296.129,0

Quelle: Selbst berechnet auf Grundlage von [96]; [97]; [98]; [99]; [94]; [100]

* Der monatliche Wasserverbrauch der Nicht-Haushaltskunden von 2014 bis 2030 wurde für die Modellierung gleich als der im Jahre 2013 angenommen.

Tabelle A 29: Mittlere monatliche Wasserentnahmen aus den Grundwasserbrunnen von Lima Nord (Ist-Zustand und Szenarien)

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2007	9.716,0	7.922,5	8.381,4	10.019,8	27.369,4	129.250,8
2008	49.599,1	22.235,1	11.994,8	8.870,7	77.914,4	144.905,4
2009	46.106,5	16.742,6	18.528,3	11.350,7	6.140,6	45.211,5
2010	3.749,9	4.982,4	4.657,1	4.596,2	89.786,2	160.086,2
2011	14.435,5	17.471,8	19.451,1	14.873,5	39.483,9	148.515,9
2012	54.003,7	19.037,6	15.547,5	13.117,7	33.312,2	147.941,5
2013	11.537,1	20.748,6	23.706,8	18.317,6	121.412,3	159.983,1
2014 ^a	165.793,2	178.630,4	160.240,4	146.664,1	139.288,1	134.881,2
2015 ^b	147.926,1	146.322,5	153.716,8	147.353,7	135.087,7	154.612,6
2016 ^c	150.897,0	152.882,4	154.449,8	153.989,3	157.400,7	161.264,5
2017 ^d	61.876,1	60.383,9	63.089,0	60.913,7	80.517,7	140.046,7
2018 ^e	169.396,7	103.386,7	60.760,6	62.329,4	205.470,5	195.444,6
2019 ^f	88.670,7	68.038,8	27.778,8	38.110,4	173.034,8	173.266,3
2020 ^g	144.194,3	28.868,8	19.129,9	17.445,5	86.582,3	147.845,7
2021 ^h	9.716,0	7.922,5	8.381,4	10.019,8	27.369,4	129.250,8
2022 ⁱ	49.599,1	22.235,1	11.994,8	8.870,7	77.914,4	144.905,4
2023 ^j	46.106,5	16.742,6	18.528,3	11.350,7	6.140,6	45.211,5
2024 ^k	3.749,9	4.982,4	4.657,1	4.596,2	89.786,2	160.086,2
2025 ^l	14.435,5	17.471,8	19.451,1	14.873,5	39.483,9	148.515,9
2026 ^m	54.003,7	19.037,6	15.547,5	13.117,7	33.312,2	147.941,5
2027 ^d	61.876,1	60.383,9	63.089,0	60.913,7	80.517,7	140.046,7
2028 ^e	169.396,7	103.386,7	60.760,6	62.329,4	205.470,5	195.444,6
2029 ^d	61.876,1	60.383,9	63.089,0	60.913,7	80.517,7	140.046,7
2030 ^e	169.396,7	103.386,7	60.760,6	62.329,4	205.470,5	195.444,6

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006, h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Fortsetzung von Tabelle A 29

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2007	127.226,7	125.639,4	130.402,8	136.484,0	139.473,1	142.366,4
2008	160.351,8	150.510,4	181.150,6	186.528,2	198.697,1	165.038,4
2009	143.627,0	149.447,1	152.069,2	151.412,9	133.200,8	4.527,2
2010	151.570,7	158.822,3	159.774,6	159.164,4	173.190,2	134.400,3
2011	152.642,5	150.637,9	154.630,4	162.466,2	163.150,2	73.107,3
2012	154.679,5	150.812,2	147.981,3	153.573,8	155.405,8	107.688,8
2013	156.134,5	156.625,6	165.314,6	161.353,1	164.572,3	77.189,0
2014 ^a	136.470,8	134.259,1	140.585,9	135.324,8	143.058,0	141.924,8
2015 ^b	148.889,5	148.523,8	148.780,3	141.362,3	138.468,2	144.285,0
2016 ^c	158.430,1	153.267,7	148.264,3	143.155,0	142.925,8	96.644,3
2017 ^d	138.616,6	131.620,9	133.591,2	139.473,2	146.979,3	96.760,7
2018 ^e	175.033,6	181.982,2	197.235,7	208.204,2	163.189,9	115.063,9
2019 ^f	169.113,2	157.753,7	152.548,8	162.958,7	174.498,7	170.339,1
2020 ^g	139.669,9	135.901,9	138.538,3	160.718,6	173.566,8	128.100,9
2021 ^h	127.226,7	125.639,4	130.402,8	136.484,0	139.473,1	142.366,4
2022 ⁱ	160.351,8	150.510,4	181.150,6	186.528,2	198.697,1	165.038,4
2023 ^j	143.627,0	149.447,1	152.069,2	151.412,9	133.200,8	4.527,2
2024 ^k	151.570,7	158.822,3	159.774,6	159.164,4	173.190,2	134.400,3
2025 ^l	152.642,5	150.637,9	154.630,4	162.466,2	163.150,2	73.107,3
2026 ^m	154.679,5	150.812,2	147.981,3	153.573,8	155.405,8	107.688,8
2027 ^d	138.616,6	131.620,9	133.591,2	139.473,2	146.979,3	96.760,7
2028 ^e	175.033,6	181.982,2	197.235,7	208.204,2	163.189,9	115.063,9
2029 ^d	138.616,6	131.620,9	133.591,2	139.473,2	146.979,3	96.760,7
2030 ^e	175.033,6	181.982,2	197.235,7	208.204,2	163.189,9	115.063,9

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006; h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Tabelle A 30: Mittlere monatliche Wasserentnahmen aus den Grundwasserbrunnen von Lima Ost (Ist-Zustand und Szenarien)

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2007	176.699,5	183.118,1	177.764,5	169.041,9	163.923,8	156.835,5
2008	170.639,8	183.667,4	172.942,8	165.788,9	163.689,1	162.893,6
2009	183.959,7	188.876,0	189.152,5	184.664,5	182.108,7	166.315,5
2010	175.090,2	182.361,9	188.283,4	184.631,6	171.231,1	165.880,1
2011	179.898,9	181.723,4	183.438,3	182.017,2	170.600,2	166.567,8
2012	184.318,9	192.135,6	189.739,2	186.375,2	175.424,0	166.776,4
2013	175.395,5	179.933,0	178.956,1	171.891,3	164.576,9	159.657,1
2014 ^a	154.586,7	169.976,9	180.711,7	180.216,9	171.957,1	154.771,6
2015 ^b	160.398,6	169.564,6	171.918,5	167.572,5	170.531,5	155.337,8
2016 ^c	168.131,8	178.020,0	184.442,0	186.206,7	180.984,8	168.313,4
2017 ^d	179.828,5	192.212,0	192.167,0	187.614,7	176.597,7	176.700,7
2018 ^e	204.815,0	195.928,5	186.569,2	190.150,3	208.760,3	200.138,3
2019 ^f	180.769,7	184.278,9	198.251,2	195.154,8	197.819,9	173.833,9
2020 ^g	186.024,6	186.531,8	182.510,4	170.581,0	165.764,2	175.796,2
2021 ^h	176.699,5	183.118,1	177.764,5	169.041,9	163.923,8	156.835,5
2022 ⁱ	170.639,8	183.667,4	172.942,8	165.788,9	163.689,1	162.893,6
2023 ^j	183.959,7	188.876,0	189.152,5	184.664,5	182.108,7	166.315,5
2024 ^k	175.090,2	182.361,9	188.283,4	184.631,6	171.231,1	165.880,1
2025 ^l	179.898,9	181.723,4	183.438,3	182.017,2	170.600,2	166.567,8
2026 ^m	184.318,9	192.135,6	189.739,2	186.375,2	175.424,0	166.776,4
2027 ^d	179.828,5	192.212,0	192.167,0	187.614,7	176.597,7	176.700,7
2028 ^e	204.815,0	195.928,5	186.569,2	190.150,3	208.760,3	200.138,3
2029 ^d	179.828,5	192.212,0	192.167,0	187.614,7	176.597,7	176.700,7
2030 ^e	204.815,0	195.928,5	186.569,2	190.150,3	208.760,3	200.138,3

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006; h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Fortsetzung von Tabelle A 30

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2007	147.558,6	147.063,2	152.015,2	158.682,2	164.827,8	161.822,1
2008	172.718,6	170.315,3	181.160,6	187.761,8	192.369,9	190.077,8
2009	166.411,4	166.047,4	169.112,9	175.084,7	173.793,1	174.579,9
2010	162.905,2	163.567,6	166.968,9	173.041,7	183.210,8	176.343,3
2011	156.543,5	152.574,7	168.312,1	171.561,5	171.108,8	176.973,9
2012	160.617,9	155.156,1	157.178,2	157.757,4	165.659,6	169.008,6
2013	151.963,7	156.215,0	157.170,8	160.134,4	159.699,4	167.788,3
2014 ^a	146.244,4	146.059,6	154.006,7	153.766,0	155.472,7	149.612,2
2015 ^b	148.970,6	148.517,1	154.087,6	155.847,2	159.672,9	168.364,7
2016 ^c	159.323,5	158.266,9	164.079,1	180.435,3	176.958,1	177.807,9
2017 ^d	172.679,0	168.628,6	151.197,5	165.352,8	171.967,2	175.556,7
2018 ^e	186.827,2	189.306,4	191.442,5	194.496,1	184.486,7	182.150,5
2019 ^f	170.725,6	172.041,0	166.493,7	184.529,0	192.078,3	194.537,3
2020 ^g	164.801,1	155.842,0	155.845,9	169.090,5	175.932,2	178.711,0
2021 ^h	147.558,6	147.063,2	152.015,2	158.682,2	164.827,8	161.822,1
2022 ⁱ	172.718,6	170.315,3	181.160,6	187.761,8	192.369,9	190.077,8
2023 ^j	166.411,4	166.047,4	169.112,9	175.084,7	173.793,1	174.579,9
2024 ^k	162.905,2	163.567,6	166.968,9	173.041,7	183.210,8	176.343,3
2025 ^l	156.543,5	152.574,7	168.312,1	171.561,5	171.108,8	176.973,9
2026 ^m	160.617,9	155.156,1	157.178,2	157.757,4	165.659,6	169.008,6
2027 ^d	172.679,0	168.628,6	151.197,5	165.352,8	171.967,2	175.556,7
2028 ^e	186.827,2	189.306,4	191.442,5	194.496,1	184.486,7	182.150,5
2029 ^d	172.679,0	168.628,6	151.197,5	165.352,8	171.967,2	175.556,7
2030 ^e	186.827,2	189.306,4	191.442,5	194.496,1	184.486,7	182.150,5

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006; h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Tabelle A 31: Mittlere monatliche Wasserentnahmen aus den Grundwasserbrunnen von Lima Mitte (Ist-Zustand und Szenarien)

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2007	14.024,6	13.869,8	13.764,2	13.648,7	11.785,0	11.259,4
2008	15.431,6	12.854,8	11.875,5	12.805,9	12.386,0	16.854,4
2009	27.380,7	15.444,6	16.779,8	12.465,3	11.132,2	8.796,9
2010	9.014,7	8.354,9	7.274,7	7.243,8	7.880,2	6.584,3
2011	7.949,3	7.785,3	8.416,2	9.646,3	9.432,0	9.171,0
2012	7.496,8	7.644,9	7.332,3	7.448,8	8.418,5	8.634,2
2013	7.812,7	8.050,3	8.567,3	8.236,4	7.854,2	9.204,3
2014 ^a	50.537,9	51.221,5	47.938,8	46.876,4	45.703,1	39.411,7
2015 ^b	33.893,8	33.781,2	34.650,7	30.845,4	29.265,4	29.722,8
2016 ^c	25.642,0	27.572,4	26.247,5	24.938,3	23.112,0	18.502,0
2017 ^d	12.939,4	16.775,4	15.467,4	14.720,1	14.041,6	12.316,8
2018 ^e	31.314,0	23.097,2	29.806,4	30.479,5	41.376,8	33.176,7
2019 ^f	18.968,4	16.243,0	12.828,9	12.818,8	22.134,3	19.385,7
2020 ^g	49.852,5	23.460,9	19.513,3	15.550,4	14.310,0	17.922,0
2021 ^h	14.024,6	13.869,8	13.764,2	13.648,7	11.785,0	11.259,4
2022 ⁱ	15.431,6	12.854,8	11.875,5	12.805,9	12.386,0	16.854,4
2023 ^j	27.380,7	15.444,6	16.779,8	12.465,3	11.132,2	8.796,9
2024 ^k	9.014,7	8.354,9	7.274,7	7.243,8	7.880,2	6.584,3
2025 ^l	7.949,3	7.785,3	8.416,2	9.646,3	9.432,0	9.171,0
2026 ^m	7.496,8	7.644,9	7.332,3	7.448,8	8.418,5	8.634,2
2027 ^d	12.939,4	16.775,4	15.467,4	14.720,1	14.041,6	12.316,8
2028 ^e	31.314,0	23.097,2	29.806,4	30.479,5	41.376,8	33.176,7
2029 ^d	12.939,4	16.775,4	15.467,4	14.720,1	14.041,6	12.316,8
2030 ^e	31.314,0	23.097,2	29.806,4	30.479,5	41.376,8	33.176,7

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006, h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Fortsetzung von Tabelle A 31

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2007	10.867,2	11.113,1	10.857,1	11.329,9	12.074,2	11.932,3
2008	30.642,0	26.945,3	51.729,4	58.602,9	33.769,3	48.519,4
2009	8.303,2	8.129,0	7.947,2	7.877,5	7.828,3	8.636,4
2010	7.263,8	7.002,1	6.882,9	6.347,2	27.852,5	16.100,3
2011	6.989,2	4.201,6	4.627,9	5.806,0	7.995,9	8.007,3
2012	8.189,4	8.281,8	7.362,2	7.111,5	7.176,0	7.215,5
2013	8.310,4	10.161,0	12.427,6	7.055,5	7.167,3	7.899,8
2014 ^a	35.591,9	33.554,6	35.482,1	35.131,7	35.547,4	35.558,7
2015 ^b	26.861,3	24.855,3	24.451,1	22.720,7	24.694,7	24.742,0
2016 ^c	16.392,8	16.573,3	15.523,2	16.512,9	14.312,9	14.090,1
2017 ^d	10.801,9	11.147,6	11.540,8	13.280,2	30.505,3	28.371,7
2018 ^e	27.040,0	35.868,9	41.680,0	49.007,6	39.080,2	30.549,0
2019 ^f	16.181,4	14.621,8	14.286,3	32.738,6	63.801,4	64.272,7
2020 ^g	21.414,8	12.808,4	12.982,6	41.678,6	58.965,5	52.547,1
2021 ^h	10.867,2	11.113,1	10.857,1	11.329,9	12.074,2	11.932,3
2022 ⁱ	30.642,0	26.945,3	51.729,4	58.602,9	33.769,3	48.519,4
2023 ^j	8.303,2	8.129,0	7.947,2	7.877,5	7.828,3	8.636,4
2024 ^k	7.263,8	7.002,1	6.882,9	6.347,2	27.852,5	16.100,3
2025 ^l	6.989,2	4.201,6	4.627,9	5.806,0	7.995,9	8.007,3
2026 ^m	8.189,4	8.281,8	7.362,2	7.111,5	7.176,0	7.215,5
2027 ^d	10.801,9	11.147,6	11.540,8	13.280,2	30.505,3	28.371,7
2028 ^e	27.040,0	35.868,9	41.680,0	49.007,6	39.080,2	30.549,0
2029 ^d	10.801,9	11.147,6	11.540,8	13.280,2	30.505,3	28.371,7
2030 ^e	27.040,0	35.868,9	41.680,0	49.007,6	39.080,2	30.549,0

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006; h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Tabelle A 32: Mittlere monatliche Wasserentnahmen aus den Grundwasserbrunnen von Lima Süd (Ist-Zustand und Szenarien)

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2007	20.871,6	17.801,8	17.487,8	17.452,7	16.436,1	15.230,6
2008	19.431,9	20.259,4	21.617,2	21.086,0	18.393,2	19.265,1
2009	30.062,5	27.453,3	28.353,8	26.982,3	25.080,9	21.011,4
2010	24.362,4	25.567,5	27.108,4	25.303,0	23.552,3	21.395,2
2011	25.202,6	25.499,0	25.624,0	24.145,6	22.978,5	22.860,9
2012	24.383,2	25.830,2	24.774,2	24.396,9	22.872,5	21.759,0
2013	24.118,5	23.868,6	23.461,3	22.823,8	21.876,8	21.559,4
2014 ^a	52.111,5	54.141,3	50.949,7	45.407,2	39.314,1	35.700,0
2015 ^b	43.332,4	42.972,7	42.874,4	39.910,5	36.320,9	36.107,4
2016 ^c	37.874,2	38.368,9	36.567,5	34.810,8	30.232,5	25.808,0
2017 ^d	16.960,9	19.041,3	17.614,1	16.807,5	16.012,6	14.541,1
2018 ^e	16.749,1	17.175,0	15.967,2	15.899,0	17.552,8	16.173,0
2019 ^f	17.697,5	18.211,5	15.739,9	15.077,6	16.716,0	13.932,6
2020 ^g	21.500,1	19.598,7	18.228,6	17.176,9	14.718,8	14.701,3
2021 ^h	20.871,6	17.801,8	17.487,8	17.452,7	16.436,1	15.230,6
2022 ⁱ	19.431,9	20.259,4	21.617,2	21.086,0	18.393,2	19.265,1
2023 ^j	30.062,5	27.453,3	28.353,8	26.982,3	25.080,9	21.011,4
2024 ^k	24.362,4	25.567,5	27.108,4	25.303,0	23.552,3	21.395,2
2025 ^l	25.202,6	25.499,0	25.624,0	24.145,6	22.978,5	22.860,9
2026 ^m	24.383,2	25.830,2	24.774,2	24.396,9	22.872,5	21.759,0
2027 ^d	16.960,9	19.041,3	17.614,1	16.807,5	16.012,6	14.541,1
2028 ^e	16.749,1	17.175,0	15.967,2	15.899,0	17.552,8	16.173,0
2029 ^d	16.960,9	19.041,3	17.614,1	16.807,5	16.012,6	14.541,1
2030 ^e	16.749,1	17.175,0	15.967,2	15.899,0	17.552,8	16.173,0

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006, h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Fortsetzung von Tabelle A 32

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2007	15.895,0	14.463,8	15.721,5	16.249,1	16.758,9	16.994,6
2008	20.579,1	21.670,0	24.943,3	26.972,8	27.314,2	28.605,1
2009	21.703,7	20.676,2	22.631,3	22.854,3	22.682,2	23.665,2
2010	20.400,4	20.584,9	22.796,0	22.647,4	26.049,2	26.294,3
2011	22.203,5	22.492,6	22.357,4	22.593,1	22.892,9	23.451,7
2012	21.232,3	20.530,8	21.165,6	21.784,4	22.644,0	22.803,7
2013	19.924,3	20.298,0	20.746,5	21.909,6	22.218,0	22.993,6
2014 ^a	37.588,2	35.573,6	37.239,0	38.693,1	41.179,1	40.842,6
2015 ^b	33.835,2	33.516,5	35.477,7	36.286,4	37.852,6	39.867,4
2016 ^c	25.163,3	24.827,9	24.349,3	26.824,4	21.522,6	18.339,1
2017 ^d	14.253,2	13.513,7	12.746,9	13.922,5	14.847,7	14.750,6
2018 ^e	15.493,2	14.496,3	15.638,8	16.563,9	16.174,9	16.555,1
2019 ^f	14.373,1	14.414,9	14.230,2	18.077,8	22.703,1	24.017,8
2020 ^g	14.174,2	13.468,3	13.330,4	19.315,1	24.721,0	25.451,7
2021 ^h	15.895,0	14.463,8	15.721,5	16.249,1	16.758,9	16.994,6
2022 ⁱ	20.579,1	21.670,0	24.943,3	26.972,8	27.314,2	28.605,1
2023 ^j	21.703,7	20.676,2	22.631,3	22.854,3	22.682,2	23.665,2
2024 ^k	20.400,4	20.584,9	22.796,0	22.647,4	26.049,2	26.294,3
2025 ^l	22.203,5	22.492,6	22.357,4	22.593,1	22.892,9	23.451,7
2026 ^m	21.232,3	20.530,8	21.165,6	21.784,4	22.644,0	22.803,7
2027 ^d	14.253,2	13.513,7	12.746,9	13.922,5	14.847,7	14.750,6
2028 ^e	15.493,2	14.496,3	15.638,8	16.563,9	16.174,9	16.555,1
2029 ^d	14.253,2	13.513,7	12.746,9	13.922,5	14.847,7	14.750,6
2030 ^e	15.493,2	14.496,3	15.638,8	16.563,9	16.174,9	16.555,1

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006, h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Tabelle A 33: Mittlere monatliche Wasserentnahmen aus den Grundwasserbrunnen von der Provinz Callao (Ist-Zustand und Szenarien)

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2007	26.286,6	18.340,1	16.934,0	13.607,3	12.814,5	14.140,3
2008	10.469,7	9.893,0	8.499,7	9.213,0	9.702,7	11.898,2
2009	14.057,2	8.238,7	9.466,2	8.210,8	7.723,5	8.256,8
2010	8.779,8	7.993,2	7.469,4	7.470,3	9.920,2	13.493,5
2011	8.110,1	8.782,8	8.697,4	9.612,2	10.651,2	18.754,3
2012	12.575,7	10.025,3	9.511,6	9.654,8	10.030,0	18.692,6
2013	10.098,3	10.903,5	18.642,5	10.267,7	16.428,4	18.603,2
2014 ^a	132.915,0	148.293,9	134.282,2	140.265,4	136.858,3	137.894,7
2015 ^b	127.890,2	133.976,6	122.099,6	119.624,4	112.115,2	113.462,1
2016 ^c	111.150,7	107.808,2	101.487,6	95.878,6	86.858,6	75.410,4
2017 ^d	58.431,1	49.277,9	39.884,3	39.366,0	29.336,6	18.327,8
2018 ^e	91.086,8	82.883,6	78.470,1	74.565,4	84.907,4	82.485,4
2019 ^f	62.953,9	71.716,5	45.364,0	40.154,9	59.458,0	58.158,9
2020 ^g	83.874,5	65.128,6	52.426,2	46.906,8	45.418,9	51.491,6
2021 ^h	26.286,6	18.340,1	16.934,0	13.607,3	12.814,5	14.140,3
2022 ⁱ	10.469,7	9.893,0	8.499,7	9.213,0	9.702,7	11.898,2
2023 ^j	14.057,2	8.238,7	9.466,2	8.210,8	7.723,5	8.256,8
2024 ^k	8.779,8	7.993,2	7.469,4	7.470,3	9.920,2	13.493,5
2025 ^l	8.110,1	8.782,8	8.697,4	9.612,2	10.651,2	18.754,3
2026 ^m	12.575,7	10.025,3	9.511,6	9.654,8	10.030,0	18.692,6
2027 ^d	58.431,1	49.277,9	39.884,3	39.366,0	29.336,6	18.327,8
2028 ^e	91.086,8	82.883,6	78.470,1	74.565,4	84.907,4	82.485,4
2029 ^d	58.431,1	49.277,9	39.884,3	39.366,0	29.336,6	18.327,8
2030 ^e	91.086,8	82.883,6	78.470,1	74.565,4	84.907,4	82.485,4

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006, h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Fortsetzung von Tabelle A 33

Mittlere monatliche Wasserentnahme [m ³ /d]						
Jahr	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2007	13.955,4	15.403,3	13.886,0	14.120,6	11.380,8	10.285,0
2008	19.794,0	21.294,7	59.668,7	70.309,5	52.736,3	40.036,0
2009	11.385,1	12.544,5	13.881,8	15.801,4	14.084,4	10.095,6
2010	10.852,5	9.540,0	9.784,9	11.786,2	36.398,2	24.933,6
2011	21.063,7	21.164,6	21.265,3	21.937,4	22.143,9	15.014,7
2012	21.052,0	20.015,9	18.522,0	15.743,9	16.350,5	14.729,3
2013	14.672,5	20.537,8	29.349,2	15.180,7	14.797,7	13.556,7
2014 ^a	123.503,7	129.160,2	126.290,4	119.999,8	132.881,0	125.916,9
2015 ^b	114.333,2	113.195,3	107.591,4	108.538,4	107.739,8	107.319,8
2016 ^c	66.772,8	62.137,0	66.886,5	64.376,5	67.138,2	68.737,3
2017 ^d	23.681,7	31.122,6	25.731,8	29.439,9	49.567,4	62.587,3
2018 ^e	71.909,0	79.649,4	91.248,4	93.969,6	80.588,1	76.090,8
2019 ^f	47.973,9	27.932,9	40.490,0	63.791,8	88.581,5	98.580,1
2020 ^g	49.088,3	35.826,6	26.751,6	59.370,4	61.828,3	64.079,0
2021 ^h	13.955,4	15.403,3	13.886,0	14.120,6	11.380,8	10.285,0
2022 ⁱ	19.794,0	21.294,7	59.668,7	70.309,5	52.736,3	40.036,0
2023 ^j	11.385,1	12.544,5	13.881,8	15.801,4	14.084,4	10.095,6
2024 ^k	10.852,5	9.540,0	9.784,9	11.786,2	36.398,2	24.933,6
2025 ^l	21.063,7	21.164,6	21.265,3	21.937,4	22.143,9	15.014,7
2026 ^m	21.052,0	20.015,9	18.522,0	15.743,9	16.350,5	14.729,3
2027 ^d	23.681,7	31.122,6	25.731,8	29.439,9	49.567,4	62.587,3
2028 ^e	71.909,0	79.649,4	91.248,4	93.969,6	80.588,1	76.090,8
2029 ^d	23.681,7	31.122,6	25.731,8	29.439,9	49.567,4	62.587,3
2030 ^e	71.909,0	79.649,4	91.248,4	93.969,6	80.588,1	76.090,8

Quelle: SEDAPAL: a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002; d: Daten aus dem Jahr 2003; e: Daten aus dem Jahr 2004; f: Daten aus dem Jahr 2005; g: Daten aus dem Jahr 2006, h: Daten aus dem Jahr 2007; i: Daten aus dem Jahr 2008; j: Daten aus dem Jahr 2009; k: Daten aus dem Jahr 2010; l: Daten aus dem Jahr 2011; m: Daten aus dem Jahr 2012

Tabelle A 34: Anfangsvolumen in den Talsperren und natürlichen Seen

Talsperren/natürliche Seen	Gespeicherte Wasservolumen Ende Dezember 2006 [Mio.m ³]
Atlantische Seite	103,87
Antacoto	85,51
Marcacocha	6,07
Marcapomacocha	7,52
Sangrar	2,95
Tucto	1,81
Huascacocha	0,00
Pazifische Seite	27,84
Canchis	2,09
Huachua	0,72
Huallunca	0,96
Huasca	3,36
Manca	0,39
Piticulli	0,00
Quiula	0,46
Sacsa	4,57
Carpa	5,42
Chiche	1,45
Pirhua	0,19
Pucro	1,39
Quisha	4,75
Huampar	1,44
Misha	0,66
Yuracmayo	19,05
Gesamt	150,78

Quelle: EDEGEL

Tabelle A 35: Natürliche Zuläufe zu den Talsperren und natürlichen Seen [m³/s]

Talsperren/ Seen	2007											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische Seite	11,66	6,76	11,44	5,87	3,62	2,82	3,44	2,90	2,82	2,34	3,69	4,55
Antacoto	4,10	2,24	3,73	1,09	1,37	0,96	1,47	1,31	1,13	0,78	1,22	1,18
Marcacocha	0,55	0,43	0,62	0,41	0,19	0,12	0,09	0,10	0,07	0,05	0,06	0,26
Marcapom.	5,86	3,34	5,81	3,65	1,56	1,51	1,76	1,44	1,44	1,43	2,18	2,96
Sangrar	0,49	0,40	0,70	0,39	0,19	0,14	0,07	0,01	0,01	0,03	0,09	0,07
Tucto	0,66	0,35	0,58	0,32	0,30	0,09	0,06	0,04	0,18	0,04	0,14	0,08
Pazifische Seite	7,69	8,10	9,08	6,63	4,28	1,53	1,18	1,30	1,15	1,12	1,81	1,97
Yuracmayo	3,64	2,86	4,53	2,07	1,48	0,80	0,54	0,46	0,21	0,28	0,78	1,12
Talsperren/ Seen	2008											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische Seite	16,38	14,15	14,23	7,49	2,24	2,54	1,31	1,05	2,54	2,19	2,04	4,43
Antacoto	6,42	5,57	5,42	3,26	0,79	0,77	0,21	0,15	0,72	0,33	0,18	0,69
Marcacocha	0,70	0,62	0,58	0,28	0,10	0,03	0,01	0,04	0,09	0,28	0,12	0,32
Marcapom.	8,28	7,07	7,22	3,59	1,27	1,49	0,88	0,68	1,55	0,81	0,98	2,63
Sangrar	0,44	0,45	0,34	0,13	0,03	0,23	0,21	0,17	0,15	0,20	0,20	0,32
Tucto	0,54	0,44	0,67	0,22	0,05	0,02	0,01	0,00	0,04	0,57	0,56	0,48
Pazifische Seite	5,46	7,61	5,86	5,43	3,47	1,40	1,84	0,92	1,20	1,69	2,02	3,69
Yuracmayo	3,49	3,44	2,20	2,66	1,15	0,61	0,41	0,34	0,26	0,51	0,81	1,53
Talsperren/ Seen	2009											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische Seite	10,44	22,29	21,51	13,70	5,42	1,51	1,53	1,26	1,85	2,98	5,63	14,3
Antacoto	4,03	9,15	9,12	5,61	2,23	0,34	0,40	0,22	0,20	0,52	1,61	5,49
Marcacocha	0,63	0,77	0,37	1,34	0,62	0,14	0,08	0,06	0,09	0,15	0,25	0,55
Marcapom.	5,11	11,12	10,76	5,70	1,95	0,80	1,01	0,71	1,35	1,99	3,17	6,86
Sangrar	0,27	0,65	0,57	0,49	0,14	0,07	0,01	0,20	0,13	0,24	0,36	0,51
Tucto	0,40	0,60	0,69	0,57	0,48	0,16	0,04	0,06	0,08	0,09	0,23	0,89
Pazifische Seite	5,97	9,05	8,23	8,08	4,23	3,42	2,06	0,75	0,93	2,11	4,42	7,16
Yuracmayo	2,73	5,21	3,53	2,76	2,02	1,10	0,76	0,64	0,75	0,42	2,01	4,52

Quelle: EDEGEL

Fortsetzung von Tabelle A 35

Talsperren/ Seen	2010											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische Seite	16,87	13,11	13,74	7,85	2,27	1,47	3,07	2,54	1,96	3,82	3,38	9,59
Antacoto	5,91	4,38	4,75	2,74	0,43	0,33	1,14	1,03	0,88	1,18	0,44	3,37
Marcacocha	0,95	0,36	0,45	0,36	0,27	0,12	0,14	0,13	0,13	0,19	0,35	0,60
Marcapom.	7,85	6,50	7,22	3,81	1,38	0,81	1,51	1,20	0,72	2,19	2,53	4,86
Sangrar	0,79	0,97	0,75	0,58	0,10	0,01	0,23	0,02	0,21	0,24	0,03	0,38
Tucto	1,37	0,90	0,57	0,36	0,09	0,20	0,05	0,16	0,02	0,02	0,03	0,38
Pazifische Seite	9,90	6,83	8,60	6,59	3,30	2,32	1,86	1,34	1,18	1,47	1,23	5,90
Yuracmayo	5,49	4,66	3,40	2,39	0,42	0,01	0,07	0,16	0,26	0,45	0,84	4,09
Talsperren/ Seen	2011											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische Seite	18,20	20,88	12,10	11,95	3,26	2,38	2,30	2,36	2,99	2,85	2,81	10,4
Antacoto	7,21	8,13	4,11	3,97	1,04	0,63	0,65	0,46	0,58	0,07	0,69	3,61
Marcacocha	0,70	0,34	0,16	0,52	0,34	0,15	0,04	0,04	0,08	0,19	0,13	0,56
Marcapom.	9,27	11,24	7,12	6,60	1,73	1,47	1,37	1,63	2,27	2,27	1,67	4,95
Sangrar	0,47	0,60	0,15	0,40	0,10	0,11	0,20	0,19	0,04	0,22	0,16	0,47
Tucto	0,55	0,56	0,56	0,47	0,05	0,02	0,03	0,04	0,02	0,11	0,17	0,84
Pazifische Seite	7,77	8,29	5,62	5,53	3,95	1,97	1,38	1,42	1,22	1,22	2,55	4,07
Yuracmayo	4,56	7,08	4,20	3,23	0,73	0,13	0,07	0,19	0,30	0,32	1,28	2,99
Talsperren/ Seen	2012											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische Seite	12,28	17,81	13,23	11,90	2,92	1,64	1,55	1,26	2,05	3,32	5,43	11,5
Antacoto	4,82	7,39	5,35	4,15	0,97	0,23	0,16	0,19	0,44	0,94	1,37	3,95
Marcacocha	1,01	0,88	0,49	0,32	0,23	0,08	0,07	0,03	0,13	0,17	0,22	0,25
Marcapom.	6,09	9,19	7,01	5,98	1,20	1,26	1,02	0,79	1,20	1,59	3,40	6,98
Sangrar	0,25	0,35	0,18	0,65	0,29	0,03	0,23	0,20	0,22	0,54	0,42	0,07
Tucto	0,11	0,01	0,20	0,80	0,24	0,03	0,06	0,05	0,06	0,08	0,02	0,26
Pazifische Seite	5,21	5,69	6,20	5,96	4,40	3,01	1,53	1,26	1,05	2,43	4,95	2,92
Yuracmayo	2,63	4,93	2,57	2,49	0,17	0,59	0,37	0,35	0,36	0,58	1,24	3,27

Quelle: EDEGEL

Fortsetzung von Tabelle A 35

Talsperren/ Seen	2013											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Atlantische												
Seite	13,42	16,15	20,76	7,23	1,72	2,81	3,44	3,12	2,93	2,85	2,98	7,06
Antacoto	5,26	6,37	7,91	2,63	0,20	0,13	1,06	0,93	0,86	0,24	0,28	2,41
Marcacocha	0,29	0,61	0,61	0,24	0,20	0,11	0,05	0,11	0,11	0,04	0,12	0,35
Marcapom.	6,66	8,22	11,20	3,77	1,18	1,65	1,65	1,33	1,33	1,96	2,21	3,97
Sangrar	0,74	0,50	0,51	0,45	0,04	0,78	0,67	0,65	0,57	0,53	0,27	0,00
Tucto	0,46	0,45	0,53	0,14	0,11	0,15	0,01	0,11	0,07	0,09	0,10	0,33
Pazifische												
Seite	4,81	6,53	6,80	4,49	2,77	1,33	0,94	1,11	0,58	1,12	2,00	3,17
Yuracmayo	2,97	4,73	4,83	0,77	1,27	0,69	0,47	0,41	0,09	0,64	1,21	2,37

Quelle: EDEGEL

Tabelle A 36: Monatlicher Niederschlag an den Pegeln Marcapomacocha (atlantische Seite) und Yuracmayo (pazifische Seite)

Jahr	Messstelle Marcapomacocha [mm/Monat]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	142,4	119,7	203,4	77,2	31,7	0,0	2,2	10,7	70,7	102,0	73,7	102,7
2008	188,9	138,4	105,1	36,5	5,4	6,7	5,7	13,4	24,7	115,1	38,6	104,9
2009	158,1	168,0	138,0	106,6	54,5	4,9	8,5	36,0	53,5	149,2	189,7	187,6
2010	176,4	137,6	186,1	73,7	16,0	6,3	1,2	10,5	38,0	65,5	66,5	217,8
2011	206,9	209,3	195,3	96,3	29,1	0,5	13,3	24,3	104,3	42,5	141,0	184,1
2012	130,6	165,7	149,7	121,6	21,8	15,1	19,2	12,2	66,6	82,9	120,2	175,3
2013	153,4	163,6	210,9	43,8	31,3	48,7	20,4	35,0	27,4	89,0	53,7	143,0

Jahr	Messstelle Yuracmayo [mm/Monat]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	157,0	163,6	252,7	69,4	13,1	1,5	0,0	3,2	16,3	61,5	42,5	75,5
2008	168,4	163,3	108,0	59,7	1,2	2,1	0,0	10,7	8,1	90,1	67,6	126,2
2009	153,5	162,1	166,2	82,4	21,5	0,0	3,5	10,5	13,0	96,4	176,2	177,6
2010	209,5	181,1	179,2	94,6	8,6	0,9	0,9	3,8	45,4	38,3	67,1	233,6
2011	201,1	226,8	180,4	112,9	9,1	0,0	1,4	2,3	55,4	45,0	84,9	222,4
2012	138,9	202,7	189,5	140,3	22,0	2,0	2,7	0,8	71,9	65,8	86,1	206,6
2013	124,8	223,7	169,5	50,1	34,7	3,6	2,8	21,5	11,0	63,1	56,7	110,5

Quelle: EDEGEL

Tabelle A 37: Monatliche Verdunstung an den Messstellen Marcapomacocha (atlantische Seite) und Yuracmayo (pazifische Seite)

Jahr	Messstelle Marcapomacocha [mm/Monat]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	74,7	83,0	66,9	86,7	91,6	97,4	103,1	108,1	89,0	105,1	117,7	98,1
2008	73,2	67,5	80,0	86,5	113,5	97,4	99,8	107,4	104,2	82,7	103,9	105,5
2009	70,8	54,4	66,5	78,5	88,0	93,1	95,7	110,1	94,2	104,0	92,7	75,0
2010	75,6	71,4	92,4	93,5	98,2	91,3	122,3	141,4	107,9	107,7	92,3	68,8
2011	63,5	62,4	80,2	78,2	99,6	93,6	95,8	114,1	93,8	106,3	97,0	78,1
2012	89,0	75,4	74,1	66,0	90,4	88,1	94,9	119,8	93,4	100,2	84,4	75,5
2013	92,9	62,6	152,3	101,7	93,2	77,2	83,1	103,3	105,5	90,3	107,2	79,0
Jahr	Messstelle Yuracmayo [mm/Monat]											
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	79,1	80,6	88,6	78,9	109,5	120,9	130,1	133,5	104,1	123,3	135,8	111,3
2008	77,7	80,7	83,7	88,6	119,5	113,7	121,9	114,1	134,5	80,0	110,2	100,4
2009	87,1	60,6	77,7	88,7	89,8	122,3	121,4	138,9	120,2	105,0	94,0	74,6
2010	83,6	83,2	84,2	98,8	121,2	101,9	140,1	147,6	120,2	107,7	102,4	79,0
2011	69,3	56,6	66,5	72,8	123,0	122,2	120,6	147,6	109,7	122,2	101,1	75,4
2012	101,7	71,5	88,7	75,1	102,7	102,7	118,8	148,3	117,2	108,4	97,8	82,2
2013	90,8	76,7	168,0	100,0	90,9	100,7	113,2	127,4	109,5	92,4	102,5	74,5

Quelle: EDEGEL

Tabelle A 38: Mittlere monatliche Abflüsse des Flusses Chillón (Ist-Zustand und Szenarien)

Jahr	Mittlere monatliche Abflüsse des Chillón [m ³ /d]					
	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2007	1.130.112,0	1.179.360,0	2.210.976,0	1.904.434,4	289.868,4	0,0
2008	946.080,0	1.760.184,0	1.566.432,0	832.088,3	228.314,9	0,0
2009	725.760,0	2.306.880,0	2.874.611,6	1.650.240,0	460.707,1	250.560,0
2010	1.681.278,0	1.120.608,0	1.880.064,0	1.136.137,8	201.312,0	0,0
2011	1.171.677,3	1.538.150,1	1.390.167,4	1.650.293,6	311.697,5	24.734,4
2012	457.056,0	1.658.907,0	1.876.203,4	1.187.300,4	340.328,7	167.519,0
2013	769.001,3	1.369.628,6	2.277.395,5	572.725,7	206.145,8	0,0
2014 ^{1a}	1.066.580,3	1.525.162,8	1.275.843,9	752.805,3	419.808,1	214.795,0
2015 ^{1b}	1.522.954,2	980.501,8	1.535.647,4	692.037,0	333.168,1	202.280,3
2016 ^{1c}	358.554,5	787.624,6	1.005.909,0	765.921,7	354.245,8	215.757,7
2017 ^{2a}	1.075.680,0	1.389.461,1	2.094.908,5	1.073.062,8	210.174,9	0,0
2018 ^{2b}	166.571,2	853.200,0	562.495,4	645.122,4	0,0	0,0
2019 ^{2c}	787.186,5	518.327,3	1.022.648,4	851.041,8	0,0	0,0
2020 ^{2d}	246.118,1	806.667,3	1.423.174,5	1.175.040,0	88.568,1	0,0
2021 ^{3a}	1.130.112,0	1.179.360,0	2.210.976,0	1.904.434,4	289.868,4	0,0
2022 ^{3b}	946.080,0	1.760.184,0	1.566.432,0	832.088,3	228.314,9	0,0
2023 ^{3c}	725.760,0	2.306.880,0	2.874.611,6	1.650.240,0	460.707,1	250.560,0
2024 ^{3d}	1.681.278,0	1.120.608,0	1.880.064,0	1.136.137,8	201.312,0	0,0
2025 ^{3e}	1.171.677,3	1.538.150,1	1.390.167,4	1.650.293,6	311.697,5	24.734,4
2026 ^{3f}	457.056,0	1.658.907,0	1.876.203,4	1.187.300,4	340.328,7	167.519,0
2027 ^{2a}	1.075.680,0	1.389.461,1	2.094.908,5	1.073.062,8	210.174,9	0,0
2028 ^{2b}	166.571,2	853.200,0	562.495,4	645.122,4	0,0	0,0
2029 ^{2a}	1.075.680,0	1.389.461,1	2.094.908,5	1.073.062,8	210.174,9	0,0
2030 ^{2b}	166.571,2	853.200,0	562.495,4	645.122,4	0,0	0,0

Fortsetzung von Tabelle A 38

Jahr	Mittlere monatliche Abflüsse des Chillón [m ³ /d]					
	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
2007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	234.144,0
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	444.384,0	988.416,0
2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	349.465,8
2011	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	717.115,2
2012	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	484.303,3
2013	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	415.921,6
2014 ^{1a}	0,0	0,0	0,0	0,0	201.678,7	913.097,1
2015 ^{1b}	0,0	0,0	0,0	0,0	358.352,7	418.410,6
2016 ^{1c}	0,0	0,0	0,0	0,0	522.126,3	491.891,6
2017 ^{2a}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	225.504,0
2018 ^{2b}	0,0	0,0	0,0	0,0	142.644,0	496.498,1
2019 ^{2c}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45.206,7
2020 ^{2d}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	849.312,0
2021 ^{3a}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2022 ^{3b}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	234.144,0
2023 ^{3c}	0,0	0,0	0,0	0,0	444.384,0	988.416,0
2024 ^{3d}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	349.465,8
2025 ^{3e}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	717.115,2
2026 ^{3f}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	484.303,3
2027 ^{2a}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	225.504,0
2028 ^{2b}	0,0	0,0	0,0	0,0	142.644,0	496.498,1
2029 ^{2a}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	225.504,0
2030 ^{2b}	0,0	0,0	0,0	0,0	142.644,0	496.498,1

Quelle: [99]; [94]; [100]; [101]; Senamhi; 1 Messdaten aus dem Pegel „Obrajillo“. Es wurde angenommen, dass die Abflüsse des Chillón in den Jahren 2014, 2015 und 2016 genauso wie in den Jahren 2000, 2001 und 2002 sein werden. a: Daten aus dem Jahr 2000; b: Daten aus dem Jahr 2001; c: Daten aus dem Jahr 2002. Da die Anlage Chillón in den Monaten Juli bis Oktober in der Regel außer Betrieb ist, wurden die gemessenen Abflüsse auf null gesetzt. 2 Messdaten vom Pegel „Punchauca“ (Anlage Chillón). Es wurde angenommen, dass der Chillón in den Jahren 2017, 2018, 2019 und 2020 genauso viel Wasser wie in den Jahren 2003, 2004, 2005 und 2006 führen wird. a: Daten aus dem Jahr 2003; b: Daten aus dem Jahr 2004; c: Daten aus dem Jahr 2005; d: Daten aus dem Jahr 2006. 3a: Daten aus dem Jahr 2007; 3b: Daten aus dem Jahr 2008; 3c: Daten aus dem Jahr 2009; 3d: Daten aus dem Jahr 2010; 3e: Daten aus dem Jahr 2011; 3f: Daten aus dem Jahr 2012

Tabelle A 39: Trinkwasserverluste im Trinkwassernetz (Ist-Zustand + Szenario)

Jahr	Physikalische Trinkwasserverluste in jedem Stadtbezirk [%]				
	Provinz Callao	Lima Nord	Lima Ost	Lima Mitte	Lima Süd
2007	38,0	38,1	27,9	17,1	21,2
2008	37,6	37,8	27,9	17,3	21,3
2009	37,2	37,4	27,8	17,4	21,4
2010	36,8	37,0	27,8	17,5	21,6
2011	36,5	36,7	27,8	17,6	21,7
2012	36,1	36,3	27,7	17,7	21,8
2013	35,7	35,9	27,7	17,8	21,9
2014	35,3	35,6	27,6	17,9	22,1
2015	34,9	35,2	27,6	17,9	22,1
2016	34,5	34,8	27,6	17,9	22,1
2017	34,1	34,5	27,6	17,9	22,1
2018	33,7	34,1	27,6	17,9	22,1
2019	33,3	33,7	27,6	17,9	22,1
2020	32,9	33,4	27,6	17,9	22,1
2021	32,5	33,0	27,6	17,9	22,1
2022	32,1	32,6	27,6	17,9	22,1
2023	31,7	32,2	27,6	17,9	22,1
2024	31,3	31,9	27,6	17,9	22,1
2025	30,9	31,5	27,6	17,9	22,1
2026	30,5	31,1	27,6	17,9	22,1
2027	30,1	30,8	27,6	17,9	22,1
2028	29,7	30,4	27,6	17,9	22,1
2029	29,3	30,0	27,6	17,9	22,1
2030	28,9	29,7	27,6	17,9	22,1

Quelle: [89]

Tabelle A 40: Mittlere monatliche Zuläufe zur Kläranlage Carapongo (Lima-Ost)

Jahr	Q [m ³ /d]					
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun
2007	44.582,4	44.496,0	43.718,4	42.768,0	41.644,8	42.249,6
2008	41.040,0	40.608,0	40.953,6	41.385,6	41.731,2	41.126,4
2009	36.547,2	37.152,0	37.324,8	37.670,4	37.324,8	36.115,2
2010	37.670,4	36.979,2	36.720,0	36.806,4	34.732,8	36.374,4
2011	36.547,2	37.929,6	38.275,2	38.534,4	37.324,8	38.620,8
2012	40.616,6	36.771,8	38.430,7	39.234,2	38.785,0	38.223,4
2013–2030*	40.616,6	36.771,8	38.430,7	39.234,2	38.785,0	38.223,4

Fortsetzung von Tabelle A 40

Jahr	Q [m ³ /d]					
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2007	41.644,8	42.336,0	40.521,6	41.126,4	40.694,4	40.694,4
2008	40.780,8	41.385,6	37.324,8	37.497,6	37.497,6	35.164,8
2009	36.460,8	35.683,2	35.078,4	35.596,8	36.201,6	37.324,8
2010	36.806,4	36.460,8	35.856,0	35.164,8	36.201,6	36.806,4
2011	39.225,6	39.830,4	39.484,8	39.830,4	39.571,2	39.052,8
2012	38.059,2	37.126,1	37.203,8	37.687,7	39.242,9	39.242,9
2013–2030*	38.059,2	37.126,1	37.203,8	37.687,7	39.242,9	39.242,9

Quelle: SEDAPAL; * Annahmen

Tabelle A 41: Detaillierte Beschreibung der Maßnahmen des Szenarios S2

Maßnahme	Umsetzungsjahr/ Anwendungsort	Steuerungsstrategie (Ressourcen- bewirtschaftung)	Beschreibung
MA			
MA1	Erweiterung von der Kapazität der Anlage „La Atarjea“	2017/ Trinkwasser- aufbereitungs- anlage „La Atarjea“	Priorisierung 1 Auf Grundlage der Ergebnisse des Ist-Zustandes wird die Wir- kung der Erweiterung der Kapazi- tät der Anlage „La Atarjea“ von 19 m ³ /s auf 24 m ³ /s ab 2017 unter- sucht.
MA2	Erweiterung des Talsperrensystems durch Bau weiterer Talsperren, Erwei- terung der Kapazi- tät der Anlage „Huachipa“	2020, 2025/ Talsperrensystem im Einzugsgebiet des Rimac (Marca II und Au- tisha)	Laut Masterplan des Wasserun- ternehmens wird das Projekt „Marca II“ 2020 gebaut. Das Projekt umfasst die Kapazitäts- erhöhung der Anlage „Huachipa“ um weitere 5 m ³ /s und die Erwei- terung des Talsperrensystems durch den Bau der Talsperre „Pomacocha“ mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 78,6 Mio. m ³ und der Talsperre „Hualla- cocha Bajo“ mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 11,4 Mio. m ³ . Durch das Projekt werden zusätzlich 5 m ³ /s während der Trockenzeit für die Wasserver- sorgung von Lima-Süd bereit- gestellt. Ein weiteres geplantes Projekt ist der Bau der Talsperre „Autisha“ mit einer nutzbaren Speicherkapazität von 20 Mio. m ³ und einer Anlage mit einer Kapa- zität von 1,20 m ³ /s in 2025. So werden zusätzlich 1,20 m ³ /s während der Trockenzeit für die Wasserversorgung von Lima-Ost (San Juan del Lurigancho) ange- boten.

Fortsetzung von Tabelle A 41

Maßnahme	Umsetzungsjahr/ Anwendungsort	Steuerungs- strategie (Ressourcen- bewirtschaftung)	Beschreibung
MA			
MA3 Bau von Meerwasser- entsalzungsanlagen	2020, 2025/Lima- Süd		Durch Bau einer vom Wasser- unternehmen geplanten Meerwasserentsalzungsanlage wird die Wasserversorgung von Lima-Süd um 0,25 m ³ /s ab 2020 erhöht. Ab 2025 wird die Aufbereitungskapazität der Anlage von 0,25 auf 0,40 m ³ /s gesteigert.
MB			
MB1 Anwendung wasserspa- render Toiletten	ab 2014/ Privat- haushalte (Lima- Nord, Lima-Mitte und Lima-Ost)		Es wurde angenommen, dass für die Bevölkerung und Haus- halte mit Sozialschicht C und Anschluss an das Trinkwas- sernetz von Lima-Nord, Lima- Mitte und Lima-Ost Wasser- spartoiletten installiert werden. Durch Implementierung dieser Maßnahme wird der Wasser- verbrauch zur Toilettenspülung von 9 auf 4,5 l/p/d gesenkt. Der Wert 4,5 l/p/d entspricht dem durchschnittlichen Was- serverbrauch der Toilettenspül- lung für Urin und Fäzes (3 bzw. 6 l/p/d)
MB2 Reduktion der physikali- schen Trinkwasserver- luste	ab 2014/ Verteilungsnetz von Lima-Nord und der Provinz Callao		Die angenommenen Prozent- werte der Entwicklung der physikalischen Wasserverluste in Lima-Nord und der Provinz Callao stehen im Einklang mit den Schätzungen von [89] und wurden in Tabelle A 39 darge- stellt.
MC			
MC Änderung der imple- mentierten Steuerungs- strategien zur Bewirt- schaftung der Grund- wasserentnahmen		Unterste Priorisierung	Implementierte Steuerungs- strategien zur Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in Lima-Nord werden geändert. In diesen Stadtgebieten wer- den die Grundwasserressour- cen – im Vergleich zum Ist- Zustand und zum Szenario ohne Maßnahmen – mit un- terster Priorisierung bewirt- schaftet. Oberflächenwasser wird zuerst priorisiert.
Alle	MA, MB und MC	-	-

6.2 Anhang B

Tabelle B 1: Geschätzte Fremdwassermenge

Jahr	Länge des Kanalnetzes [km]	Geschätzte Fremdwassermenge [m ³ /d]
2007	9.666	167.028,5
2008	10.131	175.063,7
2009	10.553	182.355,8
2010	11.245	194.313,6
2011	11.504	198.789,1
2012	11.987	207.135,4
2013	12.244	211.576,3

Für die Abschätzung der Fremdwassermenge wurde eine Infiltrationsrate von 0,2 l/s/km angenommen (vgl. [130])

Grundlagen der Charakterisierung häuslichen Abwassers

Bei der Bildung der einzelnen Fraktionen aus Tabelle A 5 wurde wie folgt vorgegangen:

$$tsCSB_X = fXS \cdot ts_{XS} + (1 - fXS - fXB) \cdot ts_{XI} + fXB \cdot ts_{XB} \quad \left[\frac{g \text{ TS}}{g \text{ CSB}_X} \right]$$

mit:

$tsCSB_X$: Anteil von Trockensubstanz am partikulären CSB

fXS CSB-Aufteilungsfaktor zum partikulären CSB in $\left[\frac{g \text{ CSB}}{g \text{ CSB}_X} \right]$

fXB CSB-Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB in $\left[\frac{g \text{ CSB}}{g \text{ CSB}_X} \right]$

ts_{XI} Anteil von Trockensubstanz am partikulären biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ TS}}{g \text{ CSB}} \right]$

ts_{XB} Anteil von Trockensubstanz an der Biomasse in $\left[\frac{g \text{ TS}}{g \text{ CSB}} \right]$

Der partikuläre CSB (CSB_X) lässt sich wie folgt ermitteln:

$$CSB_X = \frac{oTS}{tsCSB_X} \quad \left[\frac{g \text{ CSB}_X}{p \cdot d} \right]$$

mit:

oTS Organische Trockensubstanz in $\left[\frac{g \text{ TS}}{p \cdot d} \right]$

fXS CSB-Aufteilungsfaktor zum partikulären CSB in $\left[\frac{g \text{ CSB}}{g \text{ CSB}_X} \right]$

fXB CSB-Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB in $\left[\frac{g \text{ CSB}}{g \text{ CSB}_S} \right]$

$$ts_{XI} \quad \text{Anteil von Trockensubstanz am partikulären biologisch inerten organischen CSB in } \left[\frac{g \text{ TS}}{g \text{ CSB}} \right]$$

$$ts_{XB} \quad \text{Anteil von Trockensubstanz an der Biomasse in } \left[\frac{g \text{ TS}}{g \text{ CSB}} \right]$$

Der gelöste CSB (CSB_S) wird in Zusammenhang mit dem gesamten CSB und dem partikulären CSB (CSB_X) wie folgt ermittelt:

$$CSB_S = CSB - CSB_X \left[\frac{g \text{ CSB}_S}{p \cdot d} \right]$$

Der gelöste leicht abbaubare organische CSB (CSB_{SS}) wird in Zusammenhang mit dem gelösten CSB (CSB_S) und dem entsprechenden Aufteilungsfaktor berechnet.

$$CSB_{SS} = CSB_S \cdot fSS \left[\frac{g \text{ CSB}}{p \cdot d} \right]$$

mit:

$$fSS \quad \text{CSB-Aufteilungsfaktor zum gelösten CSB in } \left[\frac{g \text{ CSB}}{g \text{ CSB}_S} \right]$$

Der gelöste biologisch inerte organische CSB (CSB_{SI}) kann dann wie folgt berechnet werden:

$$CSB_{SI} = CSB_S \cdot (1 - fSS) \left[\frac{g \text{ CSB}}{p \cdot d} \right]$$

Der partikuläre leicht abbaubare organische CSB (CSB_{XS}) lässt sich aus dem partikulären CSB (CSB_X) und dem entsprechenden Aufteilungsfaktor berechnen.

$$CSB_{XS} = CSB_X \cdot fXS \left[\frac{g \text{ CSB}}{p \cdot d} \right]$$

Der partikuläre biologisch inerte organische CSB (CSB_{XI}) und die Biomasse (CSB_{XB}) lassen sich mittels der folgenden Gleichungen berechnen. Es gilt somit:

$$CSB_{XI} = CSB_X \cdot (1 - fXS - fXB) \left[\frac{g \text{ CSB}}{p \cdot d} \right]$$

$$CSB_{XB} = CSB_X \cdot fXB \left[\frac{g \text{ CSB}}{p \cdot d} \right]$$

Der gesamte organisch gebundene Stickstoff (ON) und der gesamte Stickstoff (N) lassen sich wie folgt bestimmen:

$$ON = n_{SS} \cdot CSB_{SS} + n_{SI} \cdot CSB_{SI} + n_{XS} \cdot CSB_{XS} + n_{XI} \cdot CSB_{XI} + n_{XB}$$

$$\cdot CSB_{XB} \left[\frac{g \text{ N}}{p \cdot d} \right]$$

$$N = ON + IN \left[\frac{g \text{ N}}{p \cdot d} \right]$$

mit:

$$IN = NH_4 - NO_3 \left[\frac{g \text{ N}}{p \cdot d} \right]$$

mit:

IN : Gesamter anorganischer Stickstoff in $\left[\frac{g \text{ N}}{p \cdot d} \right]$

n_{SS} : Stickstoffanteil am gelösten leicht abbaubaren organischen CSB in $\frac{g \text{ N}}{g \text{ CSB}}$

n_{SI} : Stickstoffanteil am gelösten biologisch inerten organischen CSB in $\frac{g \text{ N}}{g \text{ CSB}}$

n_{XS} : Stickstoffanteil am partikulären leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ N}}{g \text{ CSB}} \right]$

n_{XI} : Stickstoffanteile am partikulären biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ N}}{g \text{ CSB}} \right]$

n_{XB} : Stickstoffanteil von Biomasse in $\left[\frac{g \text{ N}}{g \text{ CSB}} \right]$

Der gesamte organisch gebundene Phosphor (OP) und der gesamte Phosphor (P) lassen sich mittels der folgenden Gleichungen bilanzieren:

$$OP = p_{SS} \cdot CSB_{SS} + p_{SI} \cdot CSB_{SI} + p_{XS} \cdot CSB_{XS} + p_{XI} \cdot CSB_{XI} + p_{XB}$$

$$\cdot CSB_{XB} \left[\frac{g \text{ P}}{p \cdot d} \right]$$

$$P = OP + IP \left[\frac{g \text{ P}}{p \cdot d} \right]$$

mit:

$$IP = PO_4 \left[\frac{g \text{ P}}{p \cdot d} \right]$$

IP : Gesamter anorganischer Phosphor in $\left[\frac{g \text{ P}}{p \cdot d} \right]$

p_{SS} : Phosphoranteil am gelösten leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ P}}{g \text{ CSB}} \right]$

p_{SI} : Phosphoranteil am gelösten biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ P}}{g \text{ CSB}} \right]$

p_{XS} : Phosphoranteil am partikulären leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ P}}{g \text{ CSB}} \right]$

p_{XI} : Phosphoranteil am partikulären biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \text{ P}}{g \text{ CSB}} \right]$

p_{XB} : Phosphoranteil von Biomasse in $\left[\frac{g \text{ P}}{g \text{ CSB}} \right]$

Die Trockensubstanz (TS) lässt sich wie folgt bilanzieren:

$$TS = ts_{SS} \cdot CSB_{SS} + ts_{SI} \cdot CSB_{SI} + ts_{XS} \cdot CSB_{XS} + ts_{XI} \cdot CSB_{XI} + ts_{XB} \cdot CSB_{XB} \\ + ts_{XMI} \cdot CSB_{XMI} \left[\frac{g \ TS}{p \cdot d} \right]$$

mit:

- ts_{SS} Anteil von Trockensubstanz am gelösten leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \ TS}{g \ CSB} \right]$
- ts_{SI} Anteil von Trockensubstanz am gelösten biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \ TS}{g \ CSB} \right]$
- ts_{XS} Anteil von Trockensubstanz am partikulären leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \ TS}{g \ CSB} \right]$
- ts_{XI} Anteil von Trockensubstanz am partikulären biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \ TS}{g \ CSB} \right]$
- ts_{XB} Anteil von Trockensubstanz an der Biomasse in $\left[\frac{g \ TS}{g \ CSB} \right]$
- ts_{XMI} Anteil von Trockensubstanz an mineralischen Stoffen in $\left[\frac{g \ TS}{g \ CSB} \right]$

Der gesamte organisch gebundene Kohlenstoff (OC) und der gesamte Kohlenstoff (C) lassen sich wie folgt bilanzieren:

$$OC = c_{SS} \cdot CSB_{SS} + c_{SI} \cdot CSB_{SI} + c_{XS} \cdot CSB_{XS} + c_{XI} \cdot CSB_{XI} + c_{XB} \\ \cdot CSB_{XB} \left[\frac{g \ C}{p \cdot d} \right]$$

$$C = OC + IC \left[\frac{g \ C}{p \cdot d} \right]$$

mit:

- IC Gesamter anorganischer Kohlenstoff in $\left[\frac{g \ C}{p \cdot d} \right]$
- c_{SS} Kohlenstoffanteil am gelösten leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \ C}{g \ CSB} \right]$
- c_{SI} Kohlenstoffanteil am gelösten biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \ C}{g \ CSB} \right]$
- c_{XS} Kohlenstoffanteil am partikulären leicht abbaubaren organischen CSB in $\left[\frac{g \ C}{g \ CSB} \right]$
- c_{XI} Kohlenstoffanteil am partikulären biologisch inerten organischen CSB in $\left[\frac{g \ C}{g \ CSB} \right]$
- c_{XB} Kohlenstoffanteil der Biomasse im CSB in $\left[\frac{g \ C}{g \ CSB} \right]$

Literaturverzeichnis

- [1] United Nations: World Urbanisation Prospects: The 2014 Revision, Highlights, URL: <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>, Zugriff am 01.02.2015, New York, 2014.
- [2] WHO und UNEP: Urban Air Pollution in Megacities of the World. Blackwell, Oxford, 1992.
- [3] Demographia: Demographia World Urban Areas (Built-Up Urban Areas or Urban Agglomerations), 13th Annual Edition: April 2017. Demographia, Illinois, USA, 2017.
- [4] Bach, P. M; Rauch, W.; Mikkelsen, P. S.; McCarthy, D. T.; Deletic, A.: A critical review of integrated urban water modelling - Urban drainage and beyond. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 54 (2014), S. 88-107.
- [5] Kenway, S.; Binks, A.; Lane, J.; Lant, P.; Lam, K.; Simms, A.: A systemic framework and analysis of urban water energy. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 73(2015), S. 272-285.
- [6] GAO (U.S. Government Accountability Office): Energy-Water Nexus: Coordinated Federal Approach needed to better Manage Energy and Water tradeoffs. ULR: <https://www.gao.gov/assets/650/648306.pdf>, Zugriff am 06.01.2016, 2012.
- [7] DOE (U.S. Department of Energy): The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/Water%20Energy%20Nexus%20Full%20Report%20July%202014.pdf>, Zugriff am 06.01.2016, USA, 2014.
- [8] Kennway, S.; Lant, P.; Priestley, A.; Daniels, P.: The connection between water and energy in cities: a review. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 63(2011), Nr. 9, S. 1983-990.
- [9] DOE (U.S. Department of Energy): Community Modeling and Long-Term Predictions of the Integrated Water Cycle. URL: http://science.energy.gov/~/media/ber/pdf/workshop%20reports/Water_Cycle_Report_LR.pdf, Zugriff am 06.02.2016, USA, 2012.
- [10] Decker, E.; Elliott, S.; Smith, F.; Blake, D.; Rowland, F.: Energy and Material Flow through the Urban Ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*. Vol. 25(2000), Nr.1, S. 685-740.
- [11] Baccini, P.; Bader, H.-P.: Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Heidelberg – Berlin – Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH 1996.
- [12] Votrubá, L. ; Kos, Z.; Nacházel, K.; Patera, A.; Zeman, V.: Analysis of Water Resources Systems. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo: Elsevier 1988.

- [13] Jain, S. K.; Singh, V. P.: Water Resources Systems Planning and Management. 1. Aufl. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney - Tokyo: Elsevier 2003.
- [14] UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)-WWAP (World Water Assessment Programme): Water for People, Water for Life: The United Nations World Water Development Report, Barcelona, 2003.
- [15] IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change): Cambio climático 2007: Informe de síntesis, Contribución de los Grupos de trabajo I, II y II al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, 2007.
- [16] Chevallier, P.; Pouyaud, B.; Suarez, W.; Condom, Th.: Climate change threats to environment in the tropical Andes: Glaciers and Water Resources. *Regional Environmental Change*. Vol. 11(2011), Nr. 1, S. 179-187.
- [17] Hazel, G.; Miller, D.: Megacities und ihre Herausforderungen. GlobeScan, MRC McLean Hazel und Siemens AG, 2012.
- [18] IEA (International Energy Agency): Electricity Information 2012. URL: <http://www.iea.org/media/training/presentations/statisticsmarch/electricityinformation.pdf>, Zugriff am 05.02.2015. OECD Publishing, Paris, 2012.
- [19] IEA (International Energy Agency): Electricity Information 2013. URL: <http://www.cne.es/cgi-bin/BRSCGI.exe?CMD=VEROBJ&MLKOB=761997451515>, Zugriff am 05.02.2016. OECD Publishing, Paris, 2013.
- [20] IEA (International Energy Agency): Electricity Information 2014. URL: <http://www.cne.es/cgi-bin/BRSCGI.exe?CMD=VEROBJ&MLKOB=820853454949>, Zugriff am 05.02.2015. OECD Publishing, Paris, 2014.
- [21] Weick, K. E.: Educational Organizations as Loosely Coupled Systems. *Administrative Science Quarterly*. Vol. 21(1976), Nr.1, S. 1-19.
- [22] Lekka, Ch.: High reliability organisations. A review of the literature, RR899 Research Report. Health and Safety Executive, United Kingdom, 2011.
- [23] Wolff, S.: Soziale personenbezogene Dienstleistungsorganisationen als lose gekoppelte Systeme und organisierte Anarchien. In: Klatetzki, T. (Eds): Soziale personenbezogene Dienstleistungsorganisationen. 1. Aufl. Heidelberg: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2010.
- [24] Orton, D. ; Weick, K.: Lossely Coupled Systems: A Reconceptualization. *Academy of Management Review*. Vol. 15(1990), Nr. 2, S. 203-223.
- [25] Perrow, J.: Accidents in High-Risks Systems. *Technology Studies*. Vol. 1(1994), S. 1-20.

- [26] Olson, G.: Water and energy: conflicts and connections. *Water21*, IWA Publishing 2012, S. 12-16.
- [27] IEA (International Energy Agency): Water for Energy: Is energy becoming a thirstier resource? Excerpt from the World Energy Outlook 2012, URL: https://www.iea.org/media/publications/weo/WEO_2012_Water_Excerpt.pdf.
- [28] Kenway, S.: The Water- - Connections in Cities. Urban Water Security Research Alliance, Technical Report Energy Nexus and Urban Metabolism No.100, 2012.
- [29] DOE (U.S. Department of Energy): Energy Demands on Water Resources: Report to Congress on the Interdependency of Energy and Water, USA, 2006.
- [30] Marsh, D.; Sharma, D.: Energy–water nexus: an integrated modelling approach. *International Energy Journal*. Vol. 8(2007), S. 235-242.
- [31] Marsh, D. M.: The Water-Energy Nexus: A Comprehensive Analysis in the Context of New South Wales. Dissertation, University of Technology Sydney, Sydney, 2008.
- [32] Hussey, K.; Pittock, J.: The Energy–Water Nexus: Managing the Links between Energy and Water for a Sustainable Future. *Ecology and Society*. Vol. 7(2012), Nr. 1, 31.
- [33] Cohen, R.; Nelson, B.; Wolff, G.: Energy Down the Drain, The Hidden Costs of California's Water Supply. Natural Resources Defense Council, Pacific Institute, California, 2004.
- [34] Retamal, M.; Abeyysuriya, K.; Turner, A.; White, S.: The Water-Energy Nexus: Literature Review. Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney, Sydney, 2008.
- [35] James, K.; Campbell, S.; Godlove, Ch.: Watergy, Agua y Energía: Aprovechando las oportunidades de eficiencia de agua y energía aún no exploradas en los sistemas municipales de agua. Alliance to save energy, USAID, 2003.
- [36] Endo, A.; Tsurita, I.; Burnett, K.; Orencio, P. M.: A review of the current state of research on the water,energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. Vol. 11(2017), S. 20-30.
- [37] McMahon, J.; Price, S.: Water and Energy Interactions. *Annual Review of Environment Resources*. Vol. 36(2011), Nr. 1, S. 163-191.
- [38] Kenway, S.; Lant, P.; Priestley, T.: Quantifying water-energy links and related carbon emissions in cities. *Journal of Water and Climate Change*. Vol. 2(2011), Nr. 4, S. 247-259.
- [39] Novotny, V.: Water and Energy Link in the Cities of the Future – Achieving Net Zero Carbon and Pollution Emissions Footprint, S. 37-59. In: Lazarova, V.; Choo, K.H; Cornel, P.: Water/Energy Interactions of Water Reuse. 1. Aufl. London: IWA Publishing 2012.

- [40] Kenway, S.; McMahon, J.; Elmer, V.; Conrad, S.; Rosenblum, J.: Managing water-related energy in future cities - a research and policy roadmap. *Journal of Water and Climate Change*. Vol. 4(2013), Nr. 3, S. 161-175.
- [41] Jägerskog, A.; Clausen, T. J.; Holmgren, T.; Lexén, K.: Energy and Water: The Vital Link for a Sustainable Future, Report Nr. 33. Stockholm International Water Institute, Stockholm, 2014.
- [42] Fisher, J.; Ackerman, F.: The Water-Energy Nexus in the Western States: Projections to 2100. Stockholm Environment Institute - US, USA, 2011.
- [43] Olson, G.: Water and Energy. Threats and Opportunities. 2. Aufl. London: IWA Publishing 2015.
- [44] Erbe, V.: Entwicklung eines integralen Modellansatzes zur inmissionsorientierten Bewirtschaftung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2004.
- [45] Bach, M.: Integrierte Modellierung für Einzugsgebiete mit komplexer Nutzung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2011.
- [46] HSGSim (Hochschulgruppe Simulation): Integrierte Modellierung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer, HSG-Leitfaden der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung, 1 Auflage 2008. Hrsg.: Hochschulgruppe „Erfahrungsaustausch Dynamische Simulation in der Siedlungswasserwirtschaft“ (HSGSim). Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung. URL: <http://hsgsim.org/de/>, Zugriff am 03.01.2019.
- [47] Muschalla, D.; Schütze, M.; Schroeder, K.; Bach, M.; Blumensaat, F.; Klepiszewski, K.; Pabst, M.; Pressl, A.; Schindler, N.; Wiese, J. und Gruber, G.: The HSG Guideline Document for Modelling Integrated Urban Wastewater Systems. In 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- [48] Muschalla, D.; Schütze, M.; Schroeder, K.; Bach, M.; Blumensaat, F.; Gruber, G.; Klepiszewski, K.; Pabst, M.; Pressl, A.; Schindler, N.; Solvi, A.M. und Wiese, J.: The HSG Procedure for Modelling Integrated Urban Wastewater Systems. *Water Science and Technology*. Vol. 60(2009), Nr. 8, S. 2065-2075.
- [49] HSGSim: Leitfaden für integrale Modellierung urbaner Abwassersysteme der Hochschulgruppe Simulation. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.) *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser*. HSGSim, Aachen 2010.
- [50] Leontief, W.: The Structure of American Economy, 1919-1929. An Empirical Application of Equilibrium Analysis. Cambridge – Massachusetts: Harvard University Press 1941.
- [51] Wilting, H.C.; Biesiot, W.; Moll, H. C.: Analysing Potentials for Reducing the Energy Requirement of Households in the Netherlands. *Economic Systems Research*. Vol. 11(1999), Nr. 3, S. 233-243.

- [52] Hoekstra, R.: *Economic Growth, Material Flows and the Environment. New Applications of Structural Decomposition Analysis and Physical Input-Output Tables.* Cheltenham – Northampton: Edward Elgar Publishing 2005.
- [53] Wolman, A.: The metabolism of cities. *Scientific American.* Vol. 213(1965), S. 178-193.
- [54] Kenway, S.; Gregory, A.; McMahon, J.: Urban Water Mass Balance Analysis. *Journal of Industrial Ecology.* Vol. 15(2011), Nr.15, S. 693-706.
- [55] Brunner, P. H.; Rechberger, H.: *Practical Handbook of Material Flow Analysis: Advanced Methods in Resource and Waste Management.* Bd. 1. Boca Raton: Lewis Publishers 2003.
- [56] Müller, D. B.; Bader, H-P.; Baccini, P.: Long-term Coordination of Timber Production and Consumption Using a Dynamic Material and Energy Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology.* Vol. 8(2004), Nr. 3, S. 65-87.
- [57] Hu, M.: *Dynamic Material Flow Analysis to Support Sustainable Built Environment Development: with Case Studies on Chinese Housing Stock Dynamics.* Dissertation, University of Leiden, 2010.
- [58] Horvath, A.; Stokes, J.: *Life-Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems in California,* Public Interest Energy Research (PIER) Program, Final Project Report. University of California, Berkeley, 2011.
- [59] Prytula, M.: *Ein integrales Energie- und Stoffstrommodell als Grundlage zur Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme.* Dissertation, Technische Universität Berlin, 2011.
- [60] Schaffner, M.: *Applying a Material Flow Analysis Model to Assess River Water Pollution and Mitigation Potentials: A Case-Study in the Thachin River Basin, Central Thailand.* Dissertation, Universität Bern, 2007.
- [61] Erni, M.: *Modelling urban water flows: An insight into current and future water availability and pollution of a fast growing city, Case study of Kumasi, Ghana.* Diplomarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich), Zürich, 2007.
- [62] Bieker, S.: *Semizentrale Ver- und Entsorgungssysteme: neue Lösungen für schnell wachsende urbane Räume, Untersuchung empfehlenswerter Größenordnungen.* Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2009.
- [63] Kenway, S.; Scheidegger, R.; Larsen, T.; Lant, P.; Bader, H.-P.: Water related-energy in households: A model designed to understand the current state and simulate possible measures. *Energy and Buildings.* Vol. 58(2013), S. 378-389.
- [64] Christaller, W.: *Die zentralen Orte in Süddeutschland: Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen.* 3. Unveränderte Aufl. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft Verlag 2009.

- [65] Kenway, S.; Gregory, A.; McMahon, J.: Urban Water Mass Balance Analysis. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 15(2011), Nr. 15, S. 693-706.
- [66] Robleto, G.; Alex, J.; Schütze, M.: Sustainable Planning and Management of the complex water and wastewater system of the megacity of Lima-based on Macro-modelling and Simulation. In *IFAC, Workshop on Intelligent Control Systems WICS2010*, Sinaia, Romania, 2010.
- [67] Schütze, M.; Robleto, G.; León, C.; Rodriguez, I.: Modelling and scenario building of urban water and wastewater systems – Addressing water shortage in Lima. In *12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre, Brasil, 2011.
- [68] Robleto, G.; Henke, R.; Jumar, U.; Wolfgang, H.: Integrierte Materialflussanalyse und Prozessmodellierung als Planungshilfe im Wasser- und Energiesektor. *at-Automatisierungstechnik*. Vol. 63(2015), Nr. 7, S. 518-534.
- [69] Henze, M.; Gujer, W.; Mino , T.; Van Loosdrecht, M.: Activated Sludge Models ASM1, ASM 2, ASM2d And ASM3. London: IWA Publishing 2000.
- [70] Rieger, L.; Koch, G.; Kühni, M.; Gujer, W.; Siegrist, H.: The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3. *Water Research*. Vol. 35(2001), Nr. 16, S. 3887-3903.
- [71] Robleto, G.; Godoy, E.; Schütze, M.; Halang, W.; Jumar, U.: Simulation und Steuerung der Wasserabgabe des Talsperrensystems des Flusses Rímac in Peru. *WasserWirtschaft*. Vol. 1(2014), S. 62-65.
- [72] Robleto, G.; Céspedes, J.; Huamán, J.; Ogurek, M.: Anwendung eines neuartigen Ansatzes für die Regelung des Talsperrensystems der Megastadt Lima (Peru). *WasserWirtschaft*. Vol. 6(2016), S. 70-73.
- [73] Krumke, S. O.; Noltemeier, H.: Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2012.
- [74] Ogurek, M.; Alex., J; Henke, R.: Nachhaltiges, innovatives und dezentrales Abwasserreinigungssystem inklusive der Mitbehandlung des Biomülls auf Basis alternativer Sanitärkonzepte – nidA200, Abschlussbericht. ifak e.V. Magdeburg, Magdeburg, 2017.
- [75] Henke, R.: Modellierung und Simulation neuartiger Sanitärsysteme. Bachelor-Arbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2014.
- [76] Siegrist , H.; Vogt , D.; Garcia-Heras, J. L.; Gujer, W.: Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion. *Environmental Science & Technology*. Vol. 36(2002), Nr. 5, S. 1113-1123.
- [77] Friedler, E.; Galli, N.: On-site greywater reuse in multi-storey buildings: sustainable solution for water saving. In *Efficient 2003 - 2nd International Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply*, Tenerife, Canary Islands, Spain, 2003.

- [78] Lund, J.; Guzman, J.: Some Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 125(1999), Nr. 3, S. 143-153.
- [79] Litrico, X.; Georges, D.: Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system. (II) Controller design. *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 23(1999), Nr.11, S. 829-846.
- [80] Litrico, X.; Fromion, V.: Modeling and Control of Hydrosystems. Dordrecht – Heidelberg – London - New York: Springer Verlag, 2009.
- [81] J. Labadie: Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 130(2004), Nr. 2, S. 93-111.
- [82] Deepti, R.; Moreira, M. M.: Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir System Operation. *Water Resources Management*. Vol. 24(2010), Nr. 6, S. 1107-1138.
- [83] Schütze, M.; Alex, J.; Ogurek, M.: Ein Verfahren zur Entwicklung von Algorithmen für die Kanalnetzsteuerung. VDI-Berichte. Vol. 1890(2005), S. 93-101.
- [84] Alex, J.; Schütze, M.; Ogurek, M.; Jumar, U.: Systematic Design of Distributed Controllers for Sewer Networks. In *17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, 2008.
- [85] Pabst, M.; Alex, J.; Beier, M.; Niclas, C.; Ogurek, M.; Peikert, D.; Schütze, M.: ADESBA – A new general global control system applied to the Hildesheim sewage system. In *12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre, Brasil, 2011.
- [86] Peikert, D.; Alex, J.; Beier, M.; Niclas, C.; Ogurek, M.; Pabst, M.; Schütze, M.: ADESBA+ : Ein integriertes und verallgemeinertes Regelungskonzept für Kanalnetz und Kläranlagenzulauf zur nachhaltigen und energieoptimierten Abwasserreinigung. In *DWA- und VDI-Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen - Konzepte, Erfahrungen, Trends*, Fulda, 2011.
- [87] INEI Perú (Instituto Nacional de Estadísticas e Informática): IX Censo de Población y Vivienda, 2007.
- [88] PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), CONAM (Consejo Nacional del Medio Ambiente), Municipalidad Metropolitana de Lima, Municipalidad Provincial del Callao und Grupo GEA (Grupo de Emprendimientos Ambientales): Perspectivas del Medio Ambiente Urbano, GEO Lima y Callao, Lima, Perú, 2005.
- [89] Consorcio GyZ: Servicio de Actualización y Mantenimiento de Modelos de Simulación Hidráulica de Agua Potable y Acantarillado Sanitario de la Ciudad de Lima Metropolitana, Capítulo III. Consorcio GyZ, Lima, Peru, 2012.

- [90] Ministerio de Agricultura und Autoridad Nacional del Agua (ANA): Estudio de la Delimitación del Ámbito Territorial de la Administración Local de Agua Chillón-Rímac-Lurín, Lima, 2013.
- [91] MML (Municipalidad Metropolitana de Lima); IMP (Instituto Metropolitano de Planeamiento): Plan Regional de desarrollo concertado de Lima (2012-2025), Lima somos todos, Lima, Perú, 2013.
- [92] Red Interamericana de Academias de Ciencias und Foro Consultivo Científico y Tecnológico: Diagnóstico del Agua en las Américas, México, 2012.
- [93] Falkenmark, M.: The massive water scarcity threatening Africa - why isn't it being addressed. *Ambio*, Vol. 18, pp. 112-118, 1989.
- [94] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2011, Lima, Perú, 2011.
- [95] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2006, Lima, Perú, 2006.
- [96] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2007, Lima, Perú, 2007.
- [97] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2008, Lima, Perú, 2008.
- [98] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2009, Lima, Perú, 2009.
- [99] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2010, Lima, Perú, 2010.
- [100] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2012, Lima, Perú, 2012.
- [101] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Anuario Estadístico 2013, Lima, Perú, 2013.
- [102] Godoy, E.: Serie Volumenes Almacenados 1965-2014. Excel-Datei, EDEGEL, Lima, Perú, 2014.
- [103] Godoy, E.: Modeling and control of the complex reservoirs system of the Rímac river catchment. Final Report, EDEGEL, ifak e.V., DAAD, Magdeburg, 2011.
- [104] Quintana, J.; Tovar, J.: Evaluación del acuífero de Lima (Perú) y medidas correctoras para contrarrestar la sobreexplotación. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 113(2002), Nr. 3, S. 303-312.
- [105] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima): Información para LiWatool, Excel-Datei, Lima, Perú, 2009.
- [106] SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima); MVCS (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento): Plan Maestro Optimizado, Volumen II, Lima, Perú, 2009.

- [107] Gutierrez, E.: Propuesta de Asignación de Agua en Bloques - Valle del Río Rimac. Ministerio de Agricultura, PROFODUA, Lima, Perú, 2004.
- [108] Ministerio de Agricultura, Autoridad Nacional del Agua und Administración Local del Agua Chillón, Rimac, Lurín: Evaluación de los Recursos Hídricos en la cuenca del Río Rimac, Volumen I, Informe final, Lima, Perú, 2010.
- [109] Cassella, J.: Planta de tratamiento de aguas residuales TABOADA. In *Primer Encuentro Nacional ProVMA*, 24.10.-26.10.2012, Lima, Perú, 2012.
- [110] Caramanzana, A.: Planta de tratamiento de aguas residuales La Chira. In *Primer Encuentro Nacional ProVMA*, 24.10.-26.10.2012, Lima, Perú, 2012.
- [111] Sarmiento, S.: Problemática y Consecuencias de las Descargas Industriales no Tratadas. In *Primer Encuentro Nacional ProVMA*, 24.10.-26.10.2012, Lima, Perú, 2012.
- [112] Alejos, R.: Documentos de Trabajo #12, Proyecciones de la Matriz Energética a Largo Plazo. CEPLAN (Centro Nacional de Planeamiento Estratégico), Lima, Perú, 2011.
- [113] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2010, Lima, Perú, 2010.
- [114] Gobierno Regional del Callao: Microzonificación Ecológica Económica, Provincia Constitucional del Callao, Perú, 2011.
- [115] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2009, Lima, Perú, 2009.
- [116] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2002, Lima, Perú, 2002.
- [117] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2003, Lima, Perú, 2003.
- [118] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2004, Lima, Perú, 2004.
- [119] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2005, Lima, Perú, 2005.
- [120] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2006, Lima, Perú, 2006.
- [121] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2007, Lima, Perú, 2007.
- [122] MEM (Ministerio de Energía y Minas): Anuario Estadístico de Electricidad 2008, Lima, Perú, 2008.
- [123] Alex, J.; Schütze, M.: A novel simulation platform to test WWTP control options. In *11th IWA Conference on Instrumentation Control and Automation*, Narbonne, 2013.

- [124] Schütze, M.; Alex, J.: A simulator for model-based participatory integrated urban water management. In *13th International Conference on Urban Drainage*, Surawak, 2014.
- [125] ifak e.V. Magdeburg: Basissystem und Grundmodule für Planungs- und Simulationswerkzeuge – BAPSI, Projektdokumentation, Magdeburg, 2012.
- [126] Chamorro, A.: Modeling Rimac river, Santa Eulalia sub catchment. Informe del Proyecto LiWa, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011.
- [127] Chamorro, A.: Stochastic and Hydrological Modelling for Climate Change Prediction in the Lima Region, Peru. Dissertation, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, 2014.
- [128] Kosow, H.; León, Chr.; Schütze, M.: Escenarios para el futuro – Lima Metropolitana 2040, Escenarios CIB, storylines & simulación LiWatool. Informe del Proyecto LiWa, Perú, Alemania, 2013.
- [129] Municipalidad de Miraflores: Consejos para ahorrar agua, Lima, Perú, ohne Datum.
- [130] OPS (Organización Panamericana de la Salud); CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria) und COSUDE (Cooperación Suiza en Perú): Guía para el diseño de tecnologías de alcantarillado, Lima, Perú, 2005.
- [131] OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería): Guía para calcular el consumo eléctrico doméstico, Lima, Perú, ohne Datum.
- [132] DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.): Arbeitsblatt DWA-A 272: Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS), Hennef, Deutschland, 2014.
- [133] Friedler, E.; Butler, D.; Alfiya, Y.: Wastewater composition, S. 241-257. In: Larsen T. A.; Udert, K. M.; Lienert, J. Source Separation and Decentralization for Wastewater Management. London: IWA Publishing 2013.
- [134] Crites, R.; Tchobanoglous, G.: Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A 2000.
- [135] OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería): Anuario Estadístico 2007. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 01.10.15, Lima, Perú, 2007.
- [136] OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería: Anuario Estadístico 2008. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 01.10.15, Lima, Perú, 2008
- [137] OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería: Anuario Estadístico 2009. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 01.10.15, Lima, Perú, 2009.

- [138] OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería):
Anuario Estadístico 2010. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 30.09.15, Lima, Perú, 2010.
- [139] OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería):
Anuario Estadístico 2011. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 01.10.15, Lima, Perú, 2011.
- [140] OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería):
Anuario Estadístico 2012. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 01.10.15, Lima, Perú, 2012.
- [141] OSINERGMIN Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería):
Anuario Estadístico 2013. URL:
<http://srvgart07.osinerg.gob.pe/Publicaciones/PanelPublicaciones.aspx?Tema=GART&Despliegue=T>, Zugriff am 01.10.15, Lima, Perú, 2013.
- [142] Consorcio Agua para Lima: Actualización y complementación de los estudios técnicos del proyecto "Obras de cabecera y conducción para el abastecimiento de agua potable para Lima", Componente 4: Iventario y Diagnóstico general de la infraestructura existente, Informe Final, Lima, Perú, 2014.
- [143] Salas, J.; Hall, W.; Smith, R.: Dissagregation and Aggregation of Water Systems. In: Guggino, E.; Rossi, G.; Hendricks, D. (Eds.) Operation of Complex Water Systems: Operation, Planning, and Analysis of Already Developed Water Systems. Boston – The Hague – Dordrecht - Lancaster: Martinus Nijhoff Publishers 1983.
- [144] Harboe, R.: Optimaler Betrieb wasserwirtschaftlicher Verbundsysteme mit Speichern und anderen Anlagen, Schriftenreihe Hydrologie, Wasserwirtschaft, Vol. 4. Ruhr-Univ., Lehrstuhl für Wasserwirtschaft u. Umwelttechnik I, Bochum, 1985.
- [145] Tilley, E.; Ulrich, L.; Lüthi, Ch.; Reymond, Ph.; Zurbrügg, Ch.: 2nd edition of the Compendium of Sanitation Systems and Technologies. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Switzerland, 2014.
- [146] Ormandzhieva, Z.; Schütze, M.; Alex, J.: Modelling and simulation of new sanitation concepts. In 13th International Conference on Urban, 7.09.-12.09.2014, Surawak, Malaysia, 2014.
- [147] Campos, L.; Jain, V.; Schütze, M.: Simulating Nutrient and Energy Fluxes in Non-networked Sanitation Systems. In Faecal Sludge Management Conference, 29.10.-01.11.2012, Durban, 2012.

Werden Sie Autor im VDI Verlag!

Publizieren Sie in „Fortschritt- Berichte VDI“



Veröffentlichen Sie die Ergebnisse Ihrer interdisziplinären technikorientierten Spitzenforschung in der renommierten Schriftenreihe **Fortschritt-Berichte VDI**. Ihre Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte sind hier bestens platziert:

- **Kompetente Beratung und editorische Betreuung**
- **Vergabe einer ISBN-Nr.**
- **Verbreitung der Publikation im Buchhandel**
- **Wissenschaftliches Ansehen der Reihe Fortschritt-Berichte VDI**
- **Veröffentlichung mit Nähe zum VDI**
- **Zitierfähigkeit durch Aufnahme in einschlägige Bibliographien**
- **Präsenz in Fach-, Uni- und Landesbibliotheken**
- **Schnelle, einfache und kostengünstige Abwicklung**

PROFITIEREN SIE VON UNSEREM RENOMMEE!
www.vdi-nachrichten.com/autorwerden

VDI verlag

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
- 2 Fertigungstechnik
- 3 Verfahrenstechnik
- 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- 6 Energietechnik
- 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- 10 Informatik/Kommunikation
- 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- 15 Umwelttechnik
- 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
- 21 Elektrotechnik
- 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-325915-1