

Reihe 15

Umwelttechnik

Nr. 259

M.Sc. Gloria Sofia Robleto,
Magdeburg

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

II

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 Stromversorgungssysteme 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 Ermutigungen 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 Sánchez (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. Sofía 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 | Wasserssektor | 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 Umweltschutz- unternehmen) |
| 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 Nacional 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 Überwa- chung 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 Abwasser- entsorgungsunternehmen 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 |
| l | 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 Wasserdargebot.

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 transssektoraler Infrastrukturen zur Entwicklung effizienter und nachhaltiger Nutzungskonzepte?

Ausgehend von der Methode der mathematischen Materialflussanalyse (MMFA) und der Prozessmodellierung zur integrierten Analyse transssektoraler Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen wurde ein modellbasierter Ansatz entwickelt, der die Beschreibung von Bedarfen, Kapazitäten und deren Verknüpfungen auf makroskopischer Ebene (sektorale und transssektorale 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.