
Algorithmisch gestützte Planung dezentraler Fluidsysteme

Tim Moritz Müller

Band 30



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FLUID
SYSTEM
TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Algorithmisch gestützte Planung dezentraler Fluidsysteme

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Tim Moritz Müller M. Sc.

aus Mühlthal

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Ulf Lorenz
Tag der Einreichung:	26.04.2022
Tag der mündlichen Prüfung:	21.06.2022

Darmstadt 2022

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 30

Tim Moritz Müller

**Algorithmisch gestützte Planung
dezentraler Fluidsysteme**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8731-4

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

„Sparen ist unsere größte Energiequelle“,

so das BMWK in seinem am 17.5.2022 vorgestellten „Arbeitsplan Energieeffizienz“¹. Dass dies richtig und wichtig ist, zeigt Herr Müller in der hier vorliegenden Arbeit, indem er nicht nur die Relevanz aufzeigt, sondern auch Wege, die Energiequelle „Sparen“ anzuzapfen: Ein Drittel der elektrischen Energie wird zum Antreiben von Fluidarbeitsmaschinen (Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren) benötigt. Von diesem Drittel könnten 40 % durch bessere Planung und Betrieb eingespart werden. Damit ist jedes zehnte bis zwölfte Windrad, Kohlekraftwerk und Atomkraftwerk überflüssig! Woran hapert es also in Zeiten der Ressourcenknappheit und des Klimawandels? Die Antwort ist

1. nicht beherrschte Komplexität des Planungsprozesses (Strukturunsicherheit),
2. Unsicherheit oder gar Unwissen über Nutzungsszenarien und Komponentenverhalten, d.h. Daten- und Modellunsicherheit,
3. mangelnde Transparenz der privaten und sozialen Kosten.
4. Diese mangelnde Transparenz führt zu viertens, dem falschen Fokus, nämlich allein auf Investitionskosten und nicht auf Betriebskosten oder Lebenszykluskosten und
5. Restriktionen durch Vergaberichtlinien bei öffentlichen Gebäuden.

Die letzten beiden Punkte führten sowohl zu der energetischen als auch ökonomischen Ineffizienz des Gerhard-Pahl-Zentrums an unserer eigenen Universität: 30 % der Investitions- und Betriebskosten hätten durch verbesserte Planungsabläufe und Komposition eingespart werden können. Herr Müller nennt all diese fünf genannten Gründe mit klarer und knapper Sprache und Bildern.

In dieser Klarheit, Knappheit und auch Konsistenz zu den Grundlagen der diskreten Optimierung und den Ingenieurwissenschaften folgt die Arbeit selbst dem Paradigma „less but better – Weniger, aber besser“ von Dieter Rams. Klar, knapp, konsistent im Sinne von Ockham, Hertz, Rams und vielen anderen ist der Inhalt der Arbeit, die Ergebnisse aber auch die Form selbst ein Lichtblick.

¹ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/20220517-arbeitsplan-energieeffizienz-energiesparen-fuer-mehr-unabhaengigkeit.html> ↗

Das Designparadigma „less but better“ von Dieter Rams aus Ingenieursicht interpretiert

In Kapitel 1.3 formuliert Herr Müller das Designparadigma, dass jede Komposition ein beschränktes Optimierungsproblem ist, bei dem die Qualität zu maximieren ist und zwar in den drei (i. d. R. konfliktären) Zielen

1. Effizienz,
2. Sicherheit und Verfügbarkeit sowie
3. Akzeptanz (durch formale, funktionale bis wahrgenommene Qualität).

Technische Lösungen sind also höchsten Pareto-optimal im Qualitätsraum. Dieser baut auf dem Designraum derart auf, dass in den Qualitätsraum nur „zulässige“ Kompositionen gelangen. „Zulässige“ Kompositionen sind konform, konsistent und veritabel, d.h. sie sind

1. konform zu Naturgesetzen und gesellschaftlichen Regeln,
2. konsistent mit den verfügbaren (auch wiederverwendeten) Ressourcen und Technologien und
3. verifiziert in Relation zu den Funktionsanforderungen.

Damit ist der Designraum geschlossen. Ideen können dessen Wände versetzen, indem die verfügbaren Technologien gemehrt werden. Zusammen mit den drei konfliktären Zielen ist das beschränkte Optimierungsproblem für jede Entwurfsaufgabe formuliert, bei der die Funktion sicher, nachhaltig und akzeptiert sein soll.

Von der Verifikation ist bekanntermaßen die Validierung zu unterscheiden: Bei der Validierung wird die Differenz zwischen Bedürfnis und Funktion ermittelt. Diese Differenz bestimmt die funktionale Qualität der Komposition. Die Robust-Design-Methodik von Gen'ichi Taguchi und der Großteil aller heute noch anzutreffenden Entwicklungen zielen allein auf die Maximierung der funktionalen Qualität. Es geht also darum, dass die Funktion das Bedürfnis trifft. Grundbedürfnisse sind durch die Sustainable Development Goals der United Nations genannt. Darüber hinausgehende Bedürfnisse können selbst- oder fremdbeschränkt sein.

Dieses Begnügen ist die Suffizienz und damit die erste von drei Richtungen der heute oft diskutierten Nachhaltigkeitsstrategie. Suffizienz ist das „less“ in „less but better“. Das „but better“ ist die zweite und dritte Richtung, nämlich höhere Effizienz und mehr Konsistenz durch den Versuch eines Kreisflusses oder Ersatz - immer im Sinne des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik,

der uns lehrt, dass ein geschlossener Kreisfluss unmöglich ist. Qualitäts- und Designraum wird durch den dritten Raum, den sozialen Raum komplementiert. In diesem Raum stehen drei Stakeholder im Dialog. Sie kommunizieren, streiten, einigen sich. Es sind

1. Anbieter (Hersteller, Lieferant, Plattformbetreiber, ...),
2. Nutzer (Endnutzer, Kunde, Betreiber, Besitzer, ...) und
3. Gesellschaft (Gesetzgebung, Marktüberwachung, ...).

Im sozialen Raum wird sowohl die Metrik ausgehandelt und definiert (z.B. Anzahl der CO₂-Zertifikate), als auch Marktregeln gestaltet (z.B. Sustainable-Finance-Policy der EU, die durch Taxonomie und ESG bekannt ist). Es werden Technologien verboten, besteuert oder durch Subventionen gefördert. Bilateral werden Verträge zwischen Anbieter und Nutzer geschlossen. Diesen Verträgen geht ein Verhandeln voraus. Qualitäten können als Ziele oder Nebenbedingungen verabredet werden. So ist ein „design to cost“ eine Restriktion im Sinne „just good enough“ nämlich dann, wenn ein Zielpreis vorgegeben ist. Die Lebenszykluskosten können aber auch als Ziel vorgegeben werden im Sinne „as good as it gets“ so wie in der vorliegenden Arbeit von Herrn Müller, vgl. auch eine der eigenen Publikationen².

Wissenschaftliche Diskussion

Das hier beschriebene Designparadigma (Verhandeln und Optimieren im Qualitäts-, Design- und sozialem Raum) erscheint klar und einfach. Aber, „Simple can be harder than complex“ (Steve Jobs). Das Designparadigma ist in vielen Diskussionen mit Herrn Müller und vielen anderen Mitarbeiterinnen und Kollegen am Institut und im Sonderforschungsbereich 805³ in den letzten zehn Jahren gereift. Bei diesem Vordenken hat Herr Müller einen starken und klaren Blick auf Nachhaltigkeit, Fairness, Transparenz und vor allem Umsetzbarkeit. Wie ich noch ausführe, hat das Reiben mit Herrn Müller die Wissenschaft, Lehre und auch Industrie deutlich vorangebracht. In der Wissenschaft hat sein Denken z.B. Prof. Pfetsch zu neuen Aspekten angeregt (s.u.), in der Lehre hat er neue Konzepte umgesetzt, die prämiert wurden und gemeinsam mit BASF und Herrn Dr.-Ing. Friesen hat Herr Müller ein einfaches Werkzeug entwickelt, um die Effizienz von Kühlsystemen zu beurteilen. Ingenieurwissenschaft ist also nicht nur Vordenken, sondern auch Umsetzen.

² PELZ U. A., *Sustainable Systems Design – The New Engineering Design Paradigm*, ([112], 2022)

³ PELZ U. A., *Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering*, ([111], 2021)

Probleme erkennen und lösen

Herr Müller behandelt in seiner Arbeit vier unterschiedliche Kompositionen (technische Systeme, die aus Komponenten komponiert sind), nämlich Wasserfördersysteme in Gebäuden und Kommunen, Kühlsysteme in verfahrenstechnischen Systemen, Lüftungssysteme in Gebäuden sowie Trennverfahren in der mechanischen Verfahrenstechnik. Damit hat Herr Müller in seiner Arbeit ganz unterschiedliche Fluidarbeitssysteme analysiert und synthetisiert und – im Falle der Wasserversorgung – auch experimentell mittels seines von ihm erschaffenen Pumpenbaukastens verifiziert.

Das besondere an den Arbeiten von Herrn Müller ist, dass er

1. klar das Problem mit weitem Blick erkennt,
2. den Kern des Problems herauschält,
3. die passenden Methoden auswählt,
4. Methoden weiterentwickelt sofern notwendig und,
5. nicht zuletzt die Transparenz, Fairness und Machbarkeit im Blick hat.

Er ist immer auf der Suche nach Ingenieurregeln. Man mag einwenden, dass dies für jede wissenschaftliche Arbeit gilt. Für das Wirken von Herrn Müller gilt dies aber in einem deutlich herausgehobenen Maß.

Dass der Horizont, den Herr Müller sieht, weit ist, zeigt Kapitel 2 der Arbeit von Herrn Müller unter der Überschrift „Sozio-technische Fluidsysteme“. Schon auf Seite 27 wird das Problem der unterschiedlichen Kostenstellen für Investition und Betrieb genannt. Dies ist ein Governance-Problem und kein technisches Problem. Herr Müller hat mit meinem Mitarbeiter Herrn Breuer an Lösungen für dieses Problem bei öffentlichen Gebäuden gearbeitet. Diese Lösungen finden sich in Kapitel 7. Dieses Kapitel stellt die vielen, weit über den Hauptteil der Arbeit gehenden Problemlösungsansätze heraus.

So hat Herr Müller für seine Arbeit zu verfahrenstechnischen Trennprozessen, vgl. Kapitel 7, den renommierten Hans-Voith-Stiftungspreis 2018 erhalten. Ein Beispiel dafür wie Herr Müller Transparenz für Entscheidungsprozesse erzielt, ist die Pareto-Linie, die in Abb. 7.2 zu sehen ist. Pareto-Flächen dieser Art finden sich in der Arbeit immer wieder. So in Abb. 5.10, bei der die Investitionskosten über der Leistungsaufnahme für dezentrale und zentrale Systeme zu sehen sind. In Abb. 5.23 ist das Verbesserungspotential im Vergleich zu einer realen Anlage zu sehen.

Mit Herrn Müller und auch mit meinem Mitarbeiter Herrn Dr. Friesen haben wir immer wieder diskutiert, dass durch die erreichte Transparenz

Planung und Entscheidung in unterschiedliche Hände gelegt werden können. Diese „Gewaltenteilung der Nachhaltigkeit“ oder das „Vieraugenprinzip der Nachhaltigkeit“ ist ein neues politisches Instrument, dessen Potential schon in der Industrie erkannt wurde.

In Abb. 5.10 ist ein Detail zu sehen, das typisch für Herrn Müller ist. Wir sehen die vertikale Asymptote der minimal möglichen Leistungsaufnahme für gegebenen Förderbedarf. Viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler übersehen die einfachen Lösungen. Herr Müller hat diese Asymptote aber nicht nur dargestellt, sondern als zusätzliche Restriktion im MINLP (mixed-integer nonlinear program) eingeführt, Gleichung 3.18v. Durch diese physikalische Restriktion, die eine spezielle Konformitätsrestriktion (s.o.) im Sinne von „besser geht’s nicht“ ist, wird der Lösungsraum verkleinert und die Rechenzeit verkürzt. Angeregt durch Herrn Müller hat Professor Marc Pfetsch diese Idee aufgegriffen, um technische Systeme von „außen nach innen“ über Optimierungsmethoden zu komponieren und nicht, wie sonst für Ingenieurinnen und Ingenieure üblich, von „innen nach außen“ frei nach „am Anfang war die Mittellinie“.

Die vielen Ideen von Herrn Müller aus dieser Arbeit sind im Modul „Technical Operations Research (TOR)“ des Fachbereichs Maschinenbau abgebildet. Für das innovative Lehrmodul hat das Team um Herrn Müller den „Athene Preis für Gute Lehre“ der TU Darmstadt 2021 erhalten. Auch hier ist das Weiterdenken zu erkennen: Forschungsergebnisse bleiben bei Herrn Müller nicht in der Schublade, sondern werden an Studierende vermittelt, so dass Studierende das „we engineer future“ leben können und zwar nach dem Paradigma aus TOR „less but better“.

Dass Wissenschaft auch Kommunikation bedeutet, ist an der großen Publikationsleistung von Herrn Müller zu erkennen. Insgesamt sind 20 Publikationen gelistet, viele im Bereich TOR aber auch ein Patent⁴, ein sehr grundlegendes Paper zum Energieertrag aus Gezeitenkraft im Journal of Fluid Mechanics⁵, sowie ein Artikel, der das angesprochene Verhandeln der Stakeholdergruppen behandelt⁶.

Die Forschungsdaten selbst (hier Szenarien, Ergebnisdaten, ...) sind Nachhaltig gestaltet und, dargestellt in Anhang A, auf TUDatalib mit DOI (digital object identifier) versehen und für die gesamte Wissenschaft nutzbar und einsehbar. Auch die Software-Frameworks sind auf einem auf Git-Repositoryum abgelegt. Daten inkl. Software sind der Rohstoff des 21ten Jahrhunderts.

⁴ PELZ U. A., *Kompakter, modularer Armaturenbaukasten*, ([113], 2020)

⁵ PELZ U. A., *Upper limit for tidal power with lateral bypass*, ([109], 2020)

⁶ PELZ U. A., *‘Just Good Enough’ Versus ‘as Good as It Gets’: Negotiating Specifications in a Conflict of Interest of the Stakeholders*, ([106], 2021)

Wenn man ein Vorbild sucht, wie Daten nachhaltig verfügbar sind, in Anhang A findet man dies. Auch die Idee, dass jedes Bild in einem Werk einen Identifikator (ID) erhält der es mit den Metadaten und Rohdaten verbindet, geht auf Herrn Müller zurück. Als PlotID steht dieses Werkzeug heute der Allgemeinheit zur Verfügung.

Der Kern der Arbeit von Herrn Müller

Es ist bekannt, dass durch Dezentralisierung von Pumpen wesentlich Energie eingespart werden kann. Allein fehlt es dafür an einer Systematik. Bis heute finden Planungen nach einfachen Regeln statt, nämlich Betrieb von Komponenten im besten Betriebspunkt. Die Drosselung in der Anlage wird dabei zumeist ignoriert. Plakativ stellt Herr Müller in Abb. 1.1 zentrale und dezentrale Systeme gegenüber. Abb. 1.2 zeigt die drei wesentlichen Methoden zur Lösung des oben formulierten beschränkten Optimierungsproblems, nämlich Brute-Force, Heuristiken und exakte Optimierungsverfahren. Die beiden erstgenannten Methoden sind die in den Ingenieurwissenschaften üblichen Methoden. Wie Herr Müller zeigt, sind diese beiden Methoden entweder zu rechenintensiv oder sie führen nicht zu einem garantierten Optimum. In den letzten zehn Jahren, initiiert im Wesentlichen durch die Zusammensetzung Lorenz/Pelz im SFB805 und im Austausch mit den Kollegen Lorenz, Pfetsch und Ulbrich, haben wir die TOR-Methodik entwickelt, dessen Lösungskern diskrete Mathematik ist.

Ein MINLP ist allerdings häufig in endlicher Zeit nicht lösbar. Daher hat Herr Müller in seiner Arbeit die in der Mitte von Abb. 4.1 dargestellte Methode entwickelt. Oben ist ja bereits angeklungen, dass Herr Müller Ingenieurwissen geschickt nutzt, um Designräume zu verkleinern und damit hinsichtlich Optimalität durchsuchbar zu machen. Herr Müller entwickelt in seiner Arbeit ein bestechendes Verfahren um Lebenszykluskosten in zwei Schritten zu optimieren, nämlich im ersten Schritt durch eine konstruktive und im zweiten Schritt durch eine verbessernde Heuristik.

Die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Müller hat das Beherrschen von Komplexität im Fokus. Dies ist bei Gleichteilen, vgl. Abb. 5.13, Planungsphasen bei öffentlichen Gebäuden, vgl. Kapitel 7, und Dezentralisierungsgrad, Abb. 5.12 und 5.13 sowie 5.18 bis 5.21, zu erkennen.

Ausblick

Wir haben gelernt, dass Kompositionsaufgaben in den Ingenieurwissenschaften immer durch „gutmütige Diktatoren“ ausgeführt werden (feststehender

Begriff in den Wirtschaftswissenschaften). Herr Müller und ich haben bereits vorgeschlagen, dass eine Trennung in Planung und Entscheidung stattfinden muss, die heute nicht gegeben ist. Es gibt aber noch ein weiteres Problem für die Ingenieurin in ihrer Rolle als gutmütige Diktatorin. Sie ist auf Informationen angewiesen und diese Informationen liegen häufig nicht vor. Daran ändern auch die vielen Digitalen Zwillinge zunächst wenig, die heute unsere Welt bevölkern. Herr Müller hatte die Idee, das Planen durch Markthandeln von technischen Komponenten zu transformieren⁷. Dieser radikale Gedanke ist für uns als Vordenker toll.

Darmstadt, im Juni 2022
Peter Pelz

⁷ LOGAN, STÜRMER, MÜLLER UND PELZ, *Comparing Approaches to Distributed Control of Fluid Systems based on Multi-Agent Systems*, ([79], 2022)

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit habe ich mich intensiv mit der Frage der Beherrschung von Komplexität bei der Planung und dem Betrieb technischer Systeme auseinandergesetzt. Auch die Forschung und Arbeit am Institut selbst war dabei häufig von Komplexität geprägt. Meist wurde dadurch meine Neugierde geweckt, es wurde jedoch des Öfteren auch von Kopfzerbrechen begleitet. Eben aus diesem Grund wäre die vorliegende Arbeit auch nicht ohne Unterstützung gelungen. Hierfür möchte ich mich aufrichtig bedanken.

Bei meinem Betreuer, Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz, möchte ich mich zunächst für die Möglichkeit zur Promotion bedanken. Hierbei schätzte ich im besonderen Maße das entgegengebrachte Vertrauen und die mir gelassenen Freiräume. Neue Ideen trafen auf offene Ohren und in vielfältigen Diskussionen wurden neue Denkweisen angeregt. Seine abstrakte, offene Herangehensweise an die Analyse und Synthese technischer Systeme hat diese Arbeit mitgeprägt. Prof. Dr. rer. nat. Ulf Lorenz danke ich für die Übernahme des Koreferats. Die Zusammenarbeit und der Austausch auf der GOR-Konferenz und unserem TOR-Workshop hat mich stets bereichert.

Das Institut lebt durch das Kollegium. Ich danke allen Wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die schöne Zeit am Institut: für einen lebhaften Ideenaustausch, für Rat und Tat, für zahlreiche Diskussionen, für das *sich selbst nicht zu wichtig nehmen*, für das gemeinsame Brände löschen und die zunehmend verbesserte Getränkeversorgung. Die TOR-Gruppe hat mit fachlicher Expertise, interessanten Anregungen und fleißigem Korrekturlesen direkt zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Danke Lena, Philipp, Marvin, Imke und Julius. Andreas danke ich für den guten Austausch. Kevin und John danke ich für die Projektzusammenarbeit. Max danke ich für die gute Beratung in den letzten Wochen.

Ohne Studierende wären viele Ideen niemals entwickelt und umgesetzt worden. In besonderem Maße möchte ich mich für die gute Zeit und Zusammenarbeit bei Jannik, Tobias, nochmals Marvin, Christoph, Marlene und Marius bedanken.

Zuletzt möchte ich meiner Familie, Carola, Jürgen, Gritta, Leoni, Julia und Madeleine danken. Ihr habt mir Wege eröffnet und mich stets unterstützt diese auch zu gehen. Ein besonderer Dank gilt meiner Partnerin Madeleine. Danke für den bedingungslosen Rückhalt & das Vertrauen, den Zuspruch & die Ermutigungen sowie all die schönen Momente in unserem Leben.

X

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

A handwritten signature in black ink, reading "Tim Moritz Müller". The signature is written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the right.

Darmstadt, im April 2022
Tim Moritz Müller

Kurzfassung

Fluidsysteme, wie Kühlkreisläufe oder die Wasserversorgung, sind essenziell für Industrie und Gesellschaft. Aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs, ca. 1/3 des weltweiten Strombedarfs, sind jedoch Maßnahmen zur Reduktion der benötigten Eingangsleistung notwendig. Anhand der in dieser Arbeit betrachteten Pumpensysteme zeigen sich zwei Wege dies zu realisieren: Zum einen kann die benötigte hydraulische Leistung durch dezentrale, verteilte Pumpen gesenkt werden. Zum anderen kann der Systemwirkungsgrad erhöht werden, wofür die Komponenten bestmöglich aufeinander abgestimmt werden müssen. Dies erfordert den Vergleich unterschiedlicher Pumpentypen, Verschaltungsoptionen sowie Betriebseinstellungen, was zu einer kombinatorischen Explosion führt. Aus dieser Komplexität folgen bei konventioneller Planung häufig subjektive, intransparente und vor allem suboptimale Entscheidungen.

Ziel der Arbeit ist es, Möglichkeiten zur Unterstützung des Entscheidungsfindungsprozesses zu entwickeln, zu validieren und zu diskutieren, um die Komplexität zu beherrschen. Dazu wird das Planungsproblem als gemischt-ganzzahliges, nichtlineares Optimierungsproblem formuliert. Zur Lösung werden problemspezifische Verfahren vorgestellt. Diese integrieren dabei einerseits physikalisch begründete Schranken für die erreichbare Lösungsgüte und teilen andererseits von ingenieurspezifischem Wissen geleitet den Lösungsraum in handhabbare Teilschritte bzw. Subprobleme auf. Die Zielkonflikte werden mittels transparenter Metriken und Darstellungsweisen präsentiert.

Es werden Druckerhöhungsanlagen für die Wasserversorgung in Gebäuden sowie ein industrieller Kühlkreislauf betrachtet. Es zeigt sich, dass wichtige Planungsanforderungen der Praxis – z. B. eine Überlastreserve – erfolgreich in der Optimierung berücksichtigt werden können. Auch der genutzte Modelldetailgrad erweist sich in einer experimentellen Validierung als angemessen. Die algorithmisch gestützte Planung ist dabei konventionellen Methoden überlegen, was sich in deutlich geringeren Lebenszykluskosten – insbesondere für dezentrale Topologien – zeigt. Durch die Dezentralisierung wird ein Großteil der benötigten hydraulischen Leistung eingespart – im Fall des Kühlkreislaufs bis zu 38 %. Diese kann, neben den Energiekosten, auch die Investitionskosten senken. Die Formulierung des Planungsproblems als mathematisches Programm und das Lösen mit Algorithmen steigert dabei die Objektivität. Es wird zudem gezeigt, dass der Entscheidungsfindungsprozess transparenter gestaltet werden kann, indem die Zielkonflikte in Form von Pareto-Fronten klar dargelegt werden und die ermittelten Schranken zum Aufzeigen des Potenzials genutzt werden. Insgesamt wird ersichtlich, dass der Ansatz der Dezentralisierung in Kombination mit einer algorithmisch gestützten Planung hohes Potenzial hat, um zukünftige Fluidsysteme nachhaltige zu gestalten.

Abstract

Fluid systems, like cooling cycles or water supply systems, are crucial for industry and society. However, due to the high energy consumption – currently about 1/3 of the worldwide electricity demand – measures to reduce the required energy input are necessary. There are two ways to realise this in the considered pump systems: On the one hand, the required hydraulic power can be reduced by decentralised pumps which are distributed in the system. On the other hand, the system efficiency can be increased, which requires the best possible combination of components. To realise this, different pump types, topological options as well as operating settings have to be compared, resulting in a combinatorial explosion. This complexity often cannot be mastered when using conventional planning methods, which leads to subjective, non-transparent and, above all, suboptimal decisions.

The goal of this work is the development, experimental validation and evaluation of algorithm-based design methods for decentral fluid systems to support decision-making and master the addressed complexity. For this purpose, the planning task is formulated as a mixed-integer, non-linear optimisation problem and solved using problem-specific algorithms: Firstly, in an exact method, the solution quality of certain pump combinations are estimated using physics-based bounds so that many combinations can be rejected at an early stage. Secondly, in a heuristic method, the topological degrees of freedom are reduced step by step and in turn the level of model detail is increased.

In this work, pressure booster stations for drinking water supply in buildings and an industrial cooling cycle are investigated. It is shown that practically important planning requirements – e.g., an overload reserve – can be incorporated into the optimisation. An experimental validation proves that the used degree of model detail is appropriate. The algorithm-based design is superior to conventional methods, which is reflected in significantly lower life-cycle costs, especially for decentral topologies. Decentralisation reduces a large part of the required hydraulic power – in the case of the cooling cycle up to 38 %. This, in addition to energy costs, can also reduce capital costs. Formulating the planning problem as a mathematical program and solving it with algorithms increases objectivity. It is also shown that the decision-making process can be made more transparent by clearly stating the conflicting goals by means of Pareto fronts and using the identified bounds to show the hidden potential. Overall, it becomes apparent that the approach of decentralisation in combination with algorithm-based design has high potential to increase the sustainability of future fluid systems.

*Unser Kopf ist rund, damit das Denken
die Richtung ändern kann.*

Francis-Marie Martinez Picabia, 1922.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Relevanz	1
1.2	Energieeinsparung bei der Fluidförderung	3
1.2.1	Reduktion hydraulischer Leistung	4
1.2.2	Steigerung der Effizienz	6
1.3	Designparadigmen	7
1.4	Forschungsfragen und Struktur der Arbeit	11
2	Gestaltung sozio-technischer Fluidsysteme	13
2.1	Elemente und Struktur	14
2.1.1	Komponenten	14
2.1.2	Klassifizierung	15
2.1.3	Dezentrale Strukturen	17
2.2	Planungsprozess und -methoden	20
2.2.1	Ablauf und Stakeholder	21
2.2.2	Auslegungsmethoden	24
2.3	Zwischenfazit	34
3	Planungsproblem	37
3.1	Techno-ökonomische Modellierung	37
3.1.1	Komponentenmodelle	37
3.1.2	Systemmodell	40
3.1.3	Bedarfe	41
3.1.4	Qualitätsmetriken	42
3.2	Optimierungsproblem	43
3.2.1	Druckerhöhungsanlagen für Gebäude	45
3.2.2	Kühlwasserversorgung in industriellen Prozessen	50
3.2.3	Einordnung der Probleme	56
4	Problemspezifische Lösungsmethoden	59
4.1	Exaktes Verfahren	60
4.1.1	Vorverarbeitung	62
4.1.2	Verbesserung der Schranken	63
4.1.3	Abschneiden von Lösungen	66
4.1.4	Parallelisierung	66
4.2	Heuristisches Verfahren	66
4.2.1	Auswahl von Pumpenstationen	68
4.2.2	Pumpenkatalog bestimmen	69

4.2.3	Design der Pumpenstationen	72
4.3	Zwischenfazit	75
5	Anwendung	77
5.1	Druckerhöhungsanlagen	77
5.1.1	Testfälle	78
5.1.2	Vergleich der Lösungsmethoden	81
5.1.3	Experimentelle Validierung	84
5.1.4	Techno-ökonomische Qualitätsbewertung	90
5.1.5	Zwischenfazit	100
5.2	Kühlkreislauf	101
5.2.1	Fallstudie	101
5.2.2	Analyse der Lösungsstrategien	105
5.2.3	Techno-ökonomische Qualitätsbewertung	109
5.2.4	Zwischenfazit	115
6	Diskussion	117
7	Weiterführende Arbeiten	123
8	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Literatur	133
A	Verknüpfte Daten	147
B	Modularer Demonstrator für Pumpensysteme	151
	Eigene Veröffentlichungen	153

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T) und Geld (G) an.

Symbol	Beschreibung	Dimension
A	Rentenbarwertfaktor	-
b, B	Pumpenstationen	-
$C^{\text{Pumpe}}, C^{\text{FU}}$	Investitionskosten	G
C^{Strom}	Energiekosten	G M ⁻¹ L ⁻² T ²
F^{Invest}	Faktor zur Berechnung der mit den Investitionen assoziierten Kosten	-
g	Massenkraft der Schwere	L T ⁻²
G	Graph	-
$\Delta h, \Delta H$	Totaldruckänderung	M L ⁻¹ T ⁻²
h, H	Totaldruck	M L ⁻¹ T ⁻²
I	Anzahl an Kombinationen	-
j, J	Variablenbelegung	verschiedene
k	Pumpentyp	-
K	Anzahl an Pumpentypen	-
L	duale Schranke für Zielfunktionswert	G
M	Anzahl an Iterationen	-
n, N	relative Pumpendrehzahl	-
N	Anzahl	-
O	Zielgröße	verschiedene
p, P	Leistung	M L ² T ⁻³
q, Q	Volumenstrom	L ³ T ⁻¹
r	Zinssatz	-
S	Sicherheitsfaktor	-
t	Auswahl einer topologischen Verbindung	-
T	Dauer	T
u	Strömungsgeschwindigkeit	L T ⁻¹
U	primale Schranke für Zielfunktionswert	G
x	Aktivität einer Komponente bzw. Verbindung	-
y	Kaufentscheidung für eine Komponente	-
z	Auswahl einer Pumpenstation	-

Δz^{geo}	geodätische Höhendifferenz	L
z^{geo}	geodätische Höhe	L
α	Regressionskoeffizient für Druck-Volumenstrom-Kennfeld	verschiedene
β	Regressionskoeffizient für Leistungs-Kennfeld	verschiedene
δ	erreichte Dualitätslücke	-
η	Wirkungsgrad	-
ε	geforderte Dualitätslücke	-
γ	Regressionskoeffizient für Ränder des Druck-Volumenstrom-Kennfelds	verschiedene
ϱ	Dichte	M L ⁻³
ρ	relative Anteil der gelösten Instanzen mit einer Dualitätslücke kleiner als δ	-
σ	Rohrnetzoeffizient	-
τ	Zeitanteil	-
ζ	Druckverlustbeiwert	-

Mengen:**Symbol Beschreibung**

$\mathcal{E}$	Kanten
$\mathcal{F}$	Senken, bzw. Druckzonen, des Systems
$\mathcal{I}$	Indexmenge der Pumpenkombinationen
$\mathcal{K}$	Pumpentypen
$\mathcal{L}$	duale Schranken
$\mathcal{P}$	Pumpen
$\mathcal{B}$	Pumpenstationen
$\mathcal{S}$	Lastszenarien
$\mathcal{T}$	Pumpenkombinationen
$\mathcal{U}$	primale Schranken
$\mathcal{V}$	Knoten

Indizes:

Index	Beschreibung
abs	absolute Größe
Alg. 1	Ergebnis des Lösens mit Algorithmus 1
Aus	Auslass
Auswahl	Auswahlverluste
Bedarf	Bedarf
BEP	Best Efficiency Point
BP	Bypass
dez	dezentral
direkt	Ergebnis des direkten Lösens des Problems mit Standardlösern
Dross	Drosselleistung
Ein	Einlass
elek	elektrische Leistung
Energie	Energie
Exp	Experiment
FU	Frequenzumrichter
geo	geodätisch
glob	global
hyd	hydraulische Leistung
inst	installiert
Invest	Investitionen
Iter	Iteration
Jahr	auf ein Jahr bezogen
Kauf	Kaufentscheidung
LCC	Lebenszykluskosten
links	linker Kennfeldrand
max	maximal
min	minimal
N	Anzahl an Pumpenstationen
net	netto
Nutz	Nutzleistung
oben	oberer Kennfeldrand
ökon	ökonomisch vielversprechend
Opt	Optimierung
par	parallelisiert
primal	primale Lösung
PS	Pumpenstation

Pumpe	Pumpe
Quelle	Quelle
R	Widerstand
rechts	rechter Kennfeldrand
Rohr	Rohr
schätz	heuristisch geschätzter Wert
Senke	Senke
statisch	statischer Druck
sub	Subproblem
sys	auf das System bezogen
total	total
Überlast	Überlastszenario
US	Unterschätzung
Varianten	Entscheidungsvarianten
Ventil	Ventil
Verlust	Verlust
versorg	Versorgungsdruck
Vorauswahl	Vorauswahl
zen	zentral
zul	zulässig

Diakritische Zeichen:

Zeichen Bedeutung

$\hat{\circ}$	mit der Auftretenshäufigkeit der Lastszenarien zeitlich gemittelte Größe
$\bar{\circ}$	obere Schranke für Variable
$\underline{\circ}$	untere Schranke für Variable

Abkürzungen:

Kürzel	Bedeutung
BEP	Best Efficiency Point
BigM	Groß-M-Methode
bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOI	Digital Object Identifier
EEI	Energy Efficiency Index
EN	Europäische Norm
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, and Re-usable
Ing.	Ingenieurmethode
LCC	Lebenszykluskosten
LP	Linear Program
MEI	Minimum Efficiency Index
MINLP	Mixed-Integer Nonlinear Program
s. g.	so genannt
URI	Uniform Resource Identifier
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Sonstiges:

Im Kontext von mathematischen Optimierungsproblemen werden Variablen stets als Kleinbuchstaben und Parameter stets als Großbuchstaben oder griechische Buchstaben bezeichnet. Aus diesem Grund werden für den Druck auch die Symbole h bzw. H , anstatt dem in der Physik gängigeren Symbol p , genutzt, da es sonst zu einer Dopplung mit dem Symbol für die Leistung, p bzw. P , käme. Werden die Größen unabhängig von den mathematischen Optimierungsproblemen genutzt, werden diese einheitlich groß oder klein geschrieben.

Bezeichnende Indizes werden stets hochgestellt, um diese leichter von den tiefgestellten Laufindizes unterscheiden zu können.

Mit dem Symbol ϖ werden in der digitalen Version dieser Arbeit externe Hyperlinks gekennzeichnet.