

# Über die Anwendung exakter Optimierungsverfahren zur Planung von Druckerhöhungsanlagen

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

**Dipl.-Ing. Philipp Franz Betz**

geb. Pöttgen, in Frankenberg (Eder)

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Ulf Lorenz
Tag der Einreichung:	24.01.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	24.05.2017

Darmstadt 2017

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 13

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 13

**Philipp Betz**

**Über die Anwendung exakter Optimierungsverfahren  
zur Planung von Druckerhöhungsanlagen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5370-8

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort des Herausgebers

In Europa wird jedes dritte Wärmekraftwerk, jede dritte Windturbine, jede dritte Wasserturbine allein zum Betrieb von Pumpen, Ventilatoren und Kompressoren benötigt (vgl. Pelz; 250 Jahre Energienutzung: Algorithmen übernehmen Synthese, Planung und Betrieb von Energiesystemen, Festvortrag im Rahmen der Ehrenpromotion von Herrn Banzhaf, Universität Siegen, 2013).

Will man entscheiden, ob an erster Stelle effizientere Kraftwerke oder effizientere Arbeitsprozesse stehen, dann ist offensichtlich, dass die Funktion der Arbeitsprozesse zuerst in den Fokus rücken sollte. Die Effizienz von Kraftwerken zu erhöhen um damit Energie und damit Emissionen einzusparen, ist aller Ehren wert. Allerdings wird dadurch nur das Symptom bekämpft und nicht die Ursache. Die Arbeitsprozesse soll(t)en an erster Stelle bei der Energiewende stehen.

Der Arbeitsprozess wird durch die Systemfunktion beschrieben. Diese ist unabhängig von Komponenten und einer Systemstruktur. In der Praxis ist die Systemfunktion durch ein Lastkollektiv gegeben, das darüber hinaus häufig unsicher ist. Im Konkreten sind die durch die Arbeitssysteme zu erfüllenden Systemfunktionen beispielsweise das Kühlen von Rechenzentren, der Gastransport in Gasnetzen, der Transport von chemischen Edukten in der Prozessindustrie usw.

Lange Rede kurzer Sinn: Betreiber, Planer und Komponentenlieferanten für Fluidarbeitssysteme, die die Funktionen Kühlen, Heizen, Fluidtransport usw. erfüllen, sind mehr und mehr aufgefordert Systeme kooperativ optimal auszuliegen und zu betreiben. Die Ingenieurwissenschaft hat gemeinsam mit den Nachbarwissenschaften, insbesondere der Mathematik, die Aufgabe Strukturierungswerkzeuge zur Verfügung zu stellen.

Nach dem heutigen Stand werden solche Werkzeuge noch nicht für die globaloptimale Strukturfindung von Planern eingesetzt. Vielmehr „finden“ diese die Struktur „aus dem Bauch heraus“. Dabei fehlt die Referenz: Laut Planer A ist dessen Lösung optimal. Besser ist jedoch das Ergebnis von Systemingenieur B. Auch Planer C behauptet, das Optimum erreicht zu haben. Hier fehlt eine sichere Aussage darüber, welches die globaloptimale Lösung ist und der Beweis, dass einer der Planer sie mit Sicherheit erreicht hat. Planer A, B und C kann allerdings durch den Einsatz von TOR-Methoden (TOR - Technical Operations Research) geholfen werden. TOR-Software liefert algorithmisch globaloptimale Lösungen von Strukturierungsproblemen. TOR ist eine Methode, die in den letzten Jahren gemeinsam an der Universität Siegen und der TU Darmstadt zur algorithmischen Strukturierung von Sys-

temen entstanden ist. Die Arbeitsgruppe an der Universität Siegen wird von Professor Lorenz geleitet, die Arbeitsgruppe an der TU Darmstadt durch Frau Doktor Altherr und meine Person. Neben Fluidsystemen wurde ein mechanisches Getriebe mittels TOR vom Algorithmus so konstruiert, dass die Komplexität, d.h. die Zahl der Synchronisationselemente erwiesenermaßen minimal ist. Das Ergebnis ist optimal in dem Sinne „Besser geht’s nicht“.

### *Forschungsfragen*

„Nichts ist so mächtig wie eine Idee, deren Zeit gekommen ist“, so Victor Hugo. Wenn Planer und Systemingenieure unterstützt werden, dann ist dies störend – Innovationen stören. Es ist Aufgabe zu zeigen, dass durch TOR Nutzen entsteht und der Nutzen den Aufwand zur Implementierung der Innovation rechtfertigt. Hierzu muss die Methode aber in Beispielsystemen ihr Potential gezeigt haben. Die Beispielsysteme sollten dabei zunehmend schwerer werden und ggf. auch analytische Lösungen beinhalten.

Dieser Aufgabe stellte sich Herr Philipp Betz in seiner Forschung. Er hat ein überschaubares System als Forschungsgegenstand herausgegriffen. Die Funktion ist die Druckerhöhung bei gegebenem Volumenstrom. Die Funktion wird bei Herrn Betz durch die Quadrupel Druck, Volumenstrom, Zeitannteil und Wahrscheinlichkeit als Lastkollektiv beschrieben. Das Ziel ist ein System, das minimalen Energieverbrauch oder minimale Lebenszykluskosten aufweist. Das Spielfeld besteht bei Herrn Betz aus drehzahlvariablen Kreiselpumpen. Deren Kennlinien sind durch die Physik gegeben nichtlinear. Zudem sind durch die Entscheidungen für oder gegen Komponenten Binärvariablen zur Modellierung des Problems nötig.

Zur algorithmischen Lösung des Optimierungsproblems stehen damit sowohl mathematische Optimierungsmethoden der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung (MILP) als auch der gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Programmierung zur Wahl. Im ersten Fall muss das Kennfeld stückweise linearisiert werden, wodurch neue diskrete Variablen im Optimierungsproblem auftauchen. Durch die stückweise Linearisierung können langjährig etablierte und optimierte Solver verwendet werden, was Vorteile bezüglich der Rechenzeit bieten kann. Da jedoch der Aufwand zum Lösen eines MILP stark abhängig von der Anzahl der ganzzahligen Variablen des Problems ist, muss in diesem Fall eine Abwägung zwischen Genauigkeit und Rechenzeit getroffen werden.

### *Methode und Ergebnisse*

Herr Betz geht vom Einfachen zum Schweren bzw. vom Trivialen zum Komplexen. So besteht sein Spielfeld im ersten Schritt zunächst nur aus einer Pumpe. In den folgenden Schritten gibt er dem Algorithmus zunehmend mehr

Pumpen zur Auswahl. Vorteilhaft für die Anwendung der TOR-Methodik ist, dass das System quasistationär ist. Wie die Arbeit von Frau Dr.-Ing. Altherr zeigte, ist die Behandlung von transienten Problemen mittels TOR deutlich aufwendiger.

Herr Betz vergleicht in seiner Arbeit die unterschiedlichen Modellierungsansätze (nichtlinear, linear) und zeigt exemplarisch auf, wie die Anzahl an Stützstellen die Rechenzeit und die Genauigkeit beeinflusst.

Zur Validierung seines Gesamtmodells nutzt er axiomatisch begründete Resultate (Groß, Pöttgen und Pelz; Analytical Approach for the Optimal Operation of Booster Systems, ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management, 2017), sowie experimentelle Ergebnisse. Der zitierte Artikel zeigt, dass baugleiche Pumpen energetisch dann im Parallelbetrieb optimal arbeiten, wenn sie mit gleicher Drehzahl arbeiten. Dieses Ergebnis nutzt Herr Betz zum einen als Referenz, zum anderen um mittels dieses domänenspezifischen Wissens Modelle zu aggregieren und damit das MILP zu vereinfachen. Insgesamt sind die Ergebnisse von Herrn Betz alle überaus überzeugend und man fragt sich, warum 20 Jahre nachdem die IBM-Maschine Deep Blue gegen Kasparow gewonnen hat, heute Planer und Systemingenieure und nicht Maschinen die Vorschläge machen. Zumindest für quasi-stationäre Strukturprobleme (Wasserversorgung, quasi-stationäre Heiz- und Kühlkreise, . . .) sollte es keine Ausrede mehr geben.

Darmstadt, im Mai 2017

Peter Pelz



*Gaudeamus igitur  
iuvenes dum sumus;  
post iucundam iuventutem,  
post molestam senectutem,  
nos habebit humus!*

nach Christian Wilhelm Kindleben, 1781



## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Die Optimierung technischer Systeme mithilfe der diskreten Optimierung war für mich ein neues Thema und Darmstadt eine neue Stadt. Rückblickend bin ich froh darüber, den Weg hierher gegangen zu sein, und es ist an der Zeit, denjenigen „danke“ zu sagen, die der Grund dafür sind:

Ihnen, lieber Herr Professor Pelz, danke ich für die Gelegenheit zur Promotion und alles, was dazu gehört: Das entgegengebrachte Vertrauen und Ihre Ideen und Impulse, sowie für die vielen inhaltlichen und gestalterischen Freiheiten gegen Ende meiner Zeit an Ihrem Institut.

Lieber Ulf, vielen Dank, dass Du als mein ehemaliger Gruppenleiter Deine Bereitschaft für die Mitberichterstattung erklärt hast. Die hilfreichen Diskussionen mit Dir und Deine Anregungen haben aus einem Mitberichterstatter einen zweiten Doktorvater gemacht.

Liebe (ehemalige) Kolleginnen und Kollegen, ohne Euch wäre die Arbeit in dieser Form wohl nicht möglich gewesen. Ich danke Euch für Konversation, Korrekturen, Kaffeepausen und Kneipenabende.

Mein letzter Dank gilt all denen, die das Leben so lebenswert machen: Liebe Familie, liebe Freunde, schön, dass es Euch gibt.

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

Darmstadt, im Januar 2017

Philipp Betz, geb. Pöttgen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Technical Operations Research . . . . .	2
1.2	Forschungsgegenstand . . . . .	3
1.3	Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Druckerhöhungsanlagen . . . . .	6
2.2	Verbrauch und Bewertung von Maschinen und Systemen . . . . .	7
2.3	Methoden des Operations Research . . . . .	10
2.3.1	Exakte Optimierungsverfahren und Heuristiken . . . . .	12
2.3.2	Graphentheorie . . . . .	14
2.3.3	Linearisierungsmethoden . . . . .	15
2.4	Methodische Planung und Optimierung von Fluidfördersystemen . . . . .	18
2.4.1	Herstellerwerkzeuge, Normung und Berechnung . . . . .	18
2.4.2	Optimierung von Fluidfördersystemen . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Strukturierte Modellbildung</b>	<b>22</b>
3.1	Grundlegende Eigenschaften von Optimierungsmodellen . . . . .	23
3.2	Abbildung von Fluidsystemen als Graphen . . . . .	24
3.3	Funktion des Systems . . . . .	26
3.4	Ziel der Optimierung . . . . .	28
3.5	Spielfeld der Optimierung . . . . .	30
3.6	Modellvereinfachungen für reine Parallelschaltungen . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Anwendung</b>	<b>38</b>
4.1	Minimalsysteme . . . . .	39
4.1.1	Betrieb einer drehzahlregelbaren Pumpe . . . . .	39
4.1.2	Stückweise Linearisierung aller Kennfelder . . . . .	42
4.1.3	Förderung mit zwei unterschiedlichen Pumpen . . . . .	45
4.1.4	Drehzahlgleichheit zweier baugleichen Pumpen . . . . .	47
4.1.5	Kaufentscheidung für genau eine Pumpe . . . . .	50
4.1.6	Zusammenfassung der Minimalsysteme . . . . .	52
4.2	Steuerung von Druckerhöhungsanlagen mit parallel geschalteten Pumpen . . . . .	53
4.2.1	Gleiche Pumpen . . . . .	54
4.2.2	Gleiche Pumpen unter unsicherer Last . . . . .	57
4.2.3	Unterschiedliche parallele Pumpen . . . . .	58
4.3	Minimierung der Kosten einer Druckerhöhungsanlage . . . . .	61

4.3.1	Ausschließlich parallel geschaltete Pumpen . . . . .	61
4.3.2	Optimale Steuerung für die gefundene Topologie . . . . .	66
4.3.3	Freigegebene Verschaltung . . . . .	67
4.4	Energy-Efficiency-Index: Bildung einer Referenz . . . . .	69
4.4.1	Aufbau des Prüfstands . . . . .	70
4.4.2	Bestimmung des Nenn-Betriebspunkts . . . . .	71
4.4.3	Minimierung der Eingangsleistung . . . . .	73
4.4.4	Experimenteller Vergleich der integrierten Regelung mit der optimalen Steuerung . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>77</b>
5.1	Strukturierte Erstellung eines Optimierungsmodells . . . . .	77
5.2	Praktischer Nutzen . . . . .	79
5.3	Ausblick . . . . .	81
5.3.1	SHEP: Intuitiv lesbare Problembeschreibung . . . . .	81
5.3.2	Product Approach und Systems Approach . . . . .	83
5.3.3	Optimierungsalgorithmen . . . . .	84
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>86</b>
	<b>A Pumpenkatalog</b>	<b>94</b>
	<b>B Detaillierte Ergebnisse</b>	<b>102</b>
B.1	Ergebnisse zur Auswahl einer Druckerhöhungsanlage . . . . .	102
B.2	Ergebnisse zum Energy-Efficiency-Index . . . . .	107
	<b>C Hardware und Software</b>	<b>110</b>
C.1	Hardware . . . . .	110
C.2	Optimierungssoftware . . . . .	110

## 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), Währung (C), Zeit (T) sowie, falls relevant, erforderliche Ganzzahligkeit (**Int**) oder binäre Entscheidung (**Bin**).

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Dimension</b>
$a$	Anzahl aktiver Pumpen	<b>Int</b>
$b$	Faktoren für Polynomfit	verschieden
$c$	Anzahl der Drehzahlstützstellen	1
$d$	Betriebsdauer einer Anlage	$T$
$e$	Zeitanteil oder Eintrittswahrscheinlichkeit	1
$g$	Erdbeschleunigung	$LT^{-2}$
$h_t$	Spezifische Totalenthalpie	$L^2T^{-2}$
$\dot{m}$	Massenstrom	$MT^{-1}$
$m$	Maximaler Grad eines Fitpolynoms	<b>Int</b>
$n$	Drehzahl	$T^{-1}$
$p$	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
$\Delta p$	Druckdifferenz	$ML^{-1}T^{-2}$
$r$	Relative quadratische Abweichung	1
$w$	Anzahl gekaufter Elemente	<b>Int</b>
$x$	Aktivität einer Kante	<b>Bin</b>
$y$	Vielfachnutzung einer Kante	<b>Int</b>
$z$	Kaufentscheidung	<b>Bin</b>
$H$	Förderhöhe	$L$
$K_E$	Energiekosten	$M^{-1}L^{-2}CT^2$
$K_I$	Investitionskosten	$C$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$ML^2T^{-3}$
$Q$	Volumenstrom	$L^3T^{-1}$
$P$	Eingangsleistung	$ML^2T^{-3}$
$P_{\text{fl}}$	Fluidleistung	$ML^2T^{-3}$
$P_{\text{ref,EEI}}$	Referenzleistung des EEI	$ML^2T^{-3}$
$P_S$	Wellenleistung	$ML^2T^{-3}$
$\eta$	Wirkungsgrad	1
$\mu_Q$	Erwartungswert des Volumenstroms	$L^3T^{-1}$
$\rho$	Konstant angenommene Dichte von Wasser	$L^{-3}M$
$\sigma_Q$	Standartabweichung des Volumenstroms	$L^3T^{-1}$

## Indices

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
avg	Mittlere Eingangsleistung zur EEI-Bestimmung
last	Vorgabe der Systemlast
lin	Ergebnis der linearen Rechnung
max	Maximalwert
min	Minimalwert
nlin	Ergebnis der nichtlinearen Rechnung
nom	Führungsgröße
opt	Im optimalen Betriebspunkt
ref	Auf der Referenzkennlinie
H	Förderhöhenkennlinie
M	Obere Grenze (Big-M)
P	Leistungskennlinie
100 %	Referenzpunkt der Anlage für die Ermittlung des EEI

## Mengen

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
$E$	Menge aller Kanten eines Graphen
$E_P$	Menge aller Pumpen eines Graphen
$G$	Graph
$T$	Menge aller Lastfälle
$V$	Menge aller Knoten eines Graphen
$V_q$	Menge aller Quellen eines Graphen
$V_s$	Menge aller Senken eines Graphen

## Laufvariablen / Elemente aus Mengen

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
$i, k, l$	Knoten
$(i, k), (k, l), (i, s)$	Kante als Knotenpaar
$j$	$j$ -ter Summand eines Polynoms
$q$	Quelle
$s$	Senke
$t$	Lastfall