

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

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 ausulegen 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

1	Einleitung	1
1.1	Technical Operations Research	2
1.2	Forschungsgegenstand	3
1.3	Vorgehensweise	4
2	Grundlagen	6
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
3	Strukturierte Modellbildung	22
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
4	Anwendung	38
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
5	Diskussion und Ausblick	77
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
	Zusammenfassung	85
	Literaturverzeichnis	86
A	Pumpenkatalog	94
B	Detaillierte Ergebnisse	102
B.1	Ergebnisse zur Auswahl einer Druckerhöhungsanlage	102
B.2	Ergebnisse zum Energy-Efficiency-Index	107
C	Hardware und Software	110
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**).

Symbol	Beschreibung	Dimension
a	Anzahl aktiver Pumpen	Int
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	Int
n	Drehzahl	T^{-1}
p	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
Δp	Druckdifferenz	$ML^{-1}T^{-2}$
r	Relative quadratische Abweichung	1
w	Anzahl gekaufter Elemente	Int
x	Aktivität einer Kante	Bin
y	Vielfachnutzung einer Kante	Int
z	Kaufentscheidung	Bin
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_{fi}	Fluidleistung	ML^2T^{-3}
$P_{ref,EEl}$	Referenzleistung des EEI	ML^2T^{-3}
P_S	Wellenleistung	ML^2T^{-3}
η	Wirkungsgrad	1
μ_Q	Erwartungswert des Volumenstroms	L^3T^{-1}
ϱ	Konstant angenommene Dichte von Wasser	$L^{-3}M$
σ_Q	Standartabweichung des Volumenstroms	L^3T^{-1}

Indices

Symbol	Beschreibung
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

Symbol	Beschreibung
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

Symbol	Beschreibung
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

Kapitel 1

Einleitung

Der Forschungsgegenstand „Optimierung“ ist im Maschinenbau und in der Mathematik gleichermaßen präsent, doch könnte das Verständnis vom Begriff der „Optimierung“ nicht unterschiedlicher sein. In der technischen Anwendung beschreibt Optimierung oft die Verbesserung des Ist-Zustands, oder bei sich in der Planung befindenden Systemen die Verbesserung des voraussichtlichen Zustands des Systems. Mathematische Optimierung hingegen ist die Minimierung oder Maximierung einer definierten Zielfunktion unter Einhaltung aller Randbedingungen. Exakte Optimierungsverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die letztgültige Lösung des Problems beweisbar global optimal ist. Jede Zwischenlösung besteht aus einer Variablenbelegung und einem Zielfunktionswert, dessen Dualitätslücke bekannt ist. Diese gibt an, wie weit sich die aktuelle Lösung nach dem bisherigen Kenntnisstand höchstens noch verbessern kann.

Pumpen und Pumpensysteme verbrauchen, auch aufgrund von nicht ausgeschöpftem Optimierungspotential, etwa ein Zehntel der in Europa erzeugten elektrischen Energie¹. Dieser Verbrauch ist nicht nur durch den Einsatz von effizienten Maschinen, sondern vor allem durch die problemspezifische Systemauslegung deutlich reduzierbar. Die Größe des Angebots und die Vielfalt der technologischen Lösungsmöglichkeiten erfordern die Unterstützung des Ingenieurs durch Entscheidungsalgorithmen. Die Anwendung exakter Verfahren für den Entwurf von Systemen bietet die Möglichkeit der Quantifizierung der Eignung des Systems für den vorgesehenen Einsatz.

¹ Details in Kapitel 2.2

1.1 Technical Operations Research

Technical Operations Research (TOR)² ist eine Methode zur Systemauslegung, die planerische, ingenieurwissenschaftliche Herangehensweisen mit mathematischer Optimierung verbindet. Ziel der Methode ist die Anwendung der diskreten Optimierung zur Planung von Fluidsystemen. Durch gezielte Fragen bereitet die Methode die Erstellung und Lösung des Optimierungsprogramms vor und strukturiert die Anwendung des Optimierungsergebnisses auf die Realität. Abbildung 1.1 zeigt schematisch den Ablauf der einzelnen Schritte der Methodik in Form einer Pyramide.

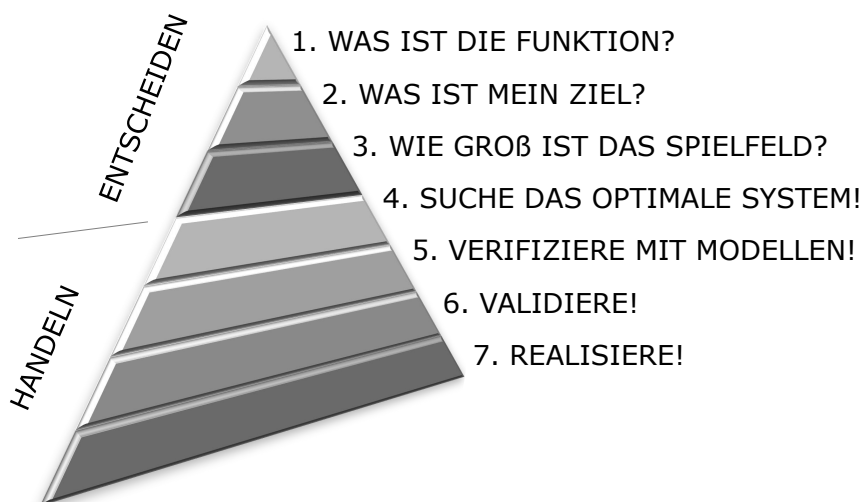


Abbildung 1.1: Ablauf der TOR-Methodik als Pyramide nach Pelz und Lorenz [57].

Die erste Frage der Systemauslegung ist die Frage nach der Funktion des Systems (1). Die Antwort hierauf muss quantitativer Natur sein, also die anliegende Last oder die zu erfüllende Aufgabe mit physikalischen Größen beschreiben. Anschließend (2) folgt die Klärung des Ziels der Optimierung. Dieses Ziel kann nur subjektiver Natur sein und erfordert vom Planer eine Positionierung des Projekts. Beispiele für bisherige Zielsetzungen bei der Anwendung des Technical Operations Research sind Minimierung des Energieverbrauchs oder der Energiekosten³, Minimierung der Gesamtkosten während

² PELZ, LORENZ UND LUDWIG, „Besser geht’s nicht. TOR plant das energetisch optimale Fluidsystem“, ([57], 2014)

³ PÖTTGEN, EDERER, ALTHERR, LORENZ UND PELZ, „Examination and Optimization of a Heating Circuit for Energy-Efficient Buildings“, ([62], 2015)

der Systemlaufzeit⁴ oder Maximierung der Verfügbarkeit des Systems⁵. Im nächsten Schritt (3) werden weitere begrenzende Regeln für die Systemkonzeption erstellt sowie die Auswahl der möglichen technischen Komponenten zusammengestellt.

Durch Abstraktion und Modellbildung wird ein Optimierungsprogramm zur Topologievariation erstellt (4). Zu Beginn der Anwendung des Technical Operations Research wurde zumeist auf die gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung zurückgegriffen. Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Techniken⁶ halten aber Einzug in die Methodik. Die Lösungen des Optimierungsprogramms werden physikalisch durch 0-dimensionale Modelle überprüft (5). Zur Validierung dienen aufwändigere Simulationen oder das Experiment bzw. der Feldversuch (6), bevor das System realisiert wird (7).

1.2 Forschungsgegenstand

„Essentially, all models are wrong, but some are useful.“

George Box, 1919–2013

Auf deutsch übersetzt bedeutet dieses Zitat „Im Wesentlichen sind alle Modelle falsch, aber manche sind wertvoll.“. Der Begriff „Modell“ wird in der Wissenschaftssprache heute meist „im Sinne einer vereinfachten, abstrahierten oder strukturieren Abbildung eines interessierenden Realitätsausschnitts“⁷ verwendet. Die Realität wird durch Vereinfachung und Abstraktion reduziert und so für menschliches Verständnis fassbar gemacht. Dadurch wird sie unvollständig und damit falsch abgebildet, in der Absicht einen Erkenntnisgewinn über die Realität herbeizuführen⁸ – und genau darin liegt der potentielle Wert eines Modells.

In den Ingenieurwissenschaften werden immer wieder Modelle eingesetzt, die sich in axiomatische und empirische oder datengetriebene Modelle sowie eine Vielzahl von Mischformen aufteilen lassen. Axiomatische Modelle entstehen

⁴ DÖRIG, EDERER, HEDRICH, LORENZ, PELZ UND PÖTTGEN, „Technical Operations Research (TOR) Exemplified by a Hydrostatic Power Transmission System“, ([15], 2014)

⁵ VERGÉ, PÖTTGEN, ALTHERR, EDERER UND PELZ, „Lebensdauer als Optimierungsziel - Algorithmische Struktursynthese am Beispiel eines hydrostatischen Getriebes“, ([80], 2016)

⁶ PÖTTGEN UND PELZ, „Evaluation of Different Approaches for the Optimization of Layout and Control of Booster Stations“, ([64], 2016)

⁷ KALLRATH, *Gemischt-ganzzahlige Optimierung : Modellierung in der Praxis*, ([36], 2002)

⁸ HERTZ, „Gesammelte Werke. Band III: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt“, ([29], 1894)

aus der Vereinfachung oder Anwendung der Axiome auf eine konkrete Fragestellung. Empirische Modelle beschreiben auf der Basis von Beobachtungen und Erfahrung ohne eine Begründung durch abstrakte Regeln zu liefern.

Die Erstellung eines nutzbringenden und lösbaren Optimierungsmodells ist Grundvoraussetzung für die Anwendung der TOR-Methodik. Die ersten drei Schritte der TOR-Methodik stellen die vollständige Beschreibung des Problems inklusive aller in Erwägung gezogenen Lösungsmöglichkeiten sicher. Erst die Modellierung der Realität in Variablen und Gleichungen erlaubt die Anwendung von Optimierungsverfahren. Die Strukturierung der Modellierung macht den Entwurfsprozess von Systemen zeiteffizient und wenig fehleranfällig, da konsequent identische Strukturen verwendet werden.

Das Anwendungsthema der Methode sind in der vorliegenden Arbeit Druckerhöhungsanlagen mit drehzahlregelbaren Pumpen. Die Anwendungsgebiete dieser Anlagen reichen von der Trinkwasserversorgung über Bewässerungssysteme bis zu Feuerlöschanlagen. Die Anlage, die ihre Funktion erfüllt und dabei ökonomisch oder ökologisch am effizientesten arbeitet, ist aufgrund der Vielfältigkeit des Angebots und der Kombinationsmöglichkeiten nicht sofort erkennbar. Die Reduktion des Energieverbrauchs von Pumpen und Pumpensystemen ist nicht nur für Betreiber relevant, sondern darüber hinaus im Fokus europäischer Marktregulierungsmaßnahmen und deshalb auch für die Hersteller der Aggregate ein Verkaufsargument.

Die resultierenden Forschungsfragen dieser Arbeit sind:

- Wie erfolgt die strukturierte Erstellung eines Optimierungsmodells aus der Beschreibung des Problems (Funktion, Ziel, Spielfeld)?
- Welchen praktischen Nutzen bringt die Anwendung exakter Optimierungsverfahren bei der Auslegung von Druckerhöhungsanlagen?

1.3 Vorgehensweise

Kapitel 2 fasst die Grundlagen der Forschung zusammen. Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird in Kapitel 3 die strukturierte Modellbildung für Fluidfördersysteme allgemein und Druckerhöhungsanlagen im Speziellen erarbeitet, begründet und beschrieben. Grundlage ist die Modellierung des Fluidsystems als Graph. Die Komponentenmodelle werden auf die Knoten und Kanten des Graphen abgebildet.

Die Antwort auf die zweite Forschungsfrage folgt aus der Anwendung der gefundenen Techniken. Kapitel 4 zeigt die Vielfalt der bearbeiteten Problemstellungen anhand praxisrelevanter Anwendungsbeispiele: Minimalbeispiele zur Demonstration der Methode und zur Untersuchung der Gültigkeit

des Modells, Planung von Steuerung und Topologie praxisrelevanter Anlagen sowie Nutzung der Modelle zur Bewertung von ausgeführten Anlagen. Die Praxisanwendung richtet sich an unterschiedliche potentielle Nutzergruppen: Die Minimalbeispiele zeigen dem interessierten Anwender und Entwickler die Funktionsweise der Methoden und Modelle auf. Die Steuerung von Anlagen ist relevant für Hersteller, weil diesen die optimalen Steuerungen als Grundlage für den Regelungsentwurf dienen. Die Planung der Topologie unterstützt Anlagenplaner und Anwender bei der Auswahl der richtigen Maschinen. Prüfer und Gesetzgeber profitieren von der Dualitätslücke der Lösung, die exakte Optimierungsverfahren immer liefern.

Auf die anschließende Diskussion der Forschungsfragen folgt die Darstellung des weiteren Forschungsbedarfs im Ausblick. Im Anhang finden sich die verwendete Datenbank, weiterführende Details der Ergebnisse sowie eine Übersicht über die genutzte Hardware und die als Methodenträger verwendete Optimierungssoftware.

Kapitel 2

Grundlagen

Dieses Kapitel fasst die technischen Grundlagen zu Druckerhöhungsanlagen kurz zusammen und erläutert die ökologische Relevanz des Themas. Die benötigten Grundlagen und Verfahren des Operations Research werden umrissen, um deren Anwendbarkeit auf Problemstellungen des Maschinenbau darzulegen.

2.1 Druckerhöhungsanlagen

Eine Druckerhöhungsanlage ist eine Pumpe oder eine Kombination aus Pumpen, die meist zur Wasserversorgung eingesetzt wird. Sofern eine Kombination von Pumpen vorliegt, zeichnet sich diese durch die parallele Anordnung baugleicher Pumpen in räumlicher Nähe zueinander aus. Die Pumpen fördern einen Volumenstrom Q . Abbildung 2.1 zeigt eine solche Topologie. Die Regelung einer Druckerhöhungsanlage erfolgt mit dem Ausgangsdruck oder der Förderhöhe H als Regelgröße. Die Förderhöhe ist ein Maß für die Druckdifferenz zwischen den anliegenden Drücken am Saug- und Druckstutzen. Die Führungsgröße H_{nom} kann dabei entweder konstant („ Δp - c -Regelung“¹) oder abhängig von einer Messung oder Schätzung des geförderten Volumenstroms („ Δp - v -Regelung“¹) sein¹. Die Stellgrößen der Regelung sind die Anzahl der eingeschalteten Pumpen a und – für Anlagen mit drehzahlregelbaren Pumpen – die Drehzahlen n dieser Pumpen².

¹ BABUSCH, EBERT, KÖNIG, MAKOSCHEY, MILLIES, ORASCHEWSKI UND RUDOL, *Grundlagen der Pumpentechnik*, ([6], 2009)

² HEINRICHS, KLEMENT UND RICKMANN, *Druckerhöhungsanlagen mit drehzahleregelten Pumpen: Kommentar zu DIN 1988-500*, ([27], 2011)

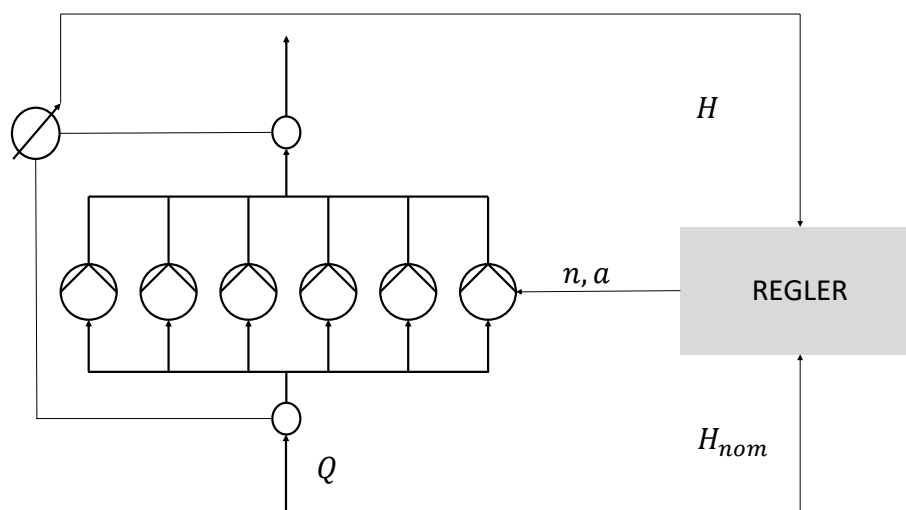


Abbildung 2.1: Druckerhöhungsanlage mit Signalfluss der Regelung.

2.2 Verbrauch und Bewertung von Maschinen und Systemen

Pumpen und Pumpensysteme haben einen erheblichen Anteil am europäischen Energieverbrauch. Die Europäische Kommission ermittelte bei der Vorbereitung der Einführung von Marktregulierungsmaßnahmen zur Senkung des Stromverbrauchs den Strombedarf von Pumpen: Allein Wasserpumpen in kommerziellen Gebäuden, zur Trinkwasserversorgung, in der Lebensmittelindustrie und in der Landwirtschaft verbrauchten schätzungsweise 169 TWh/a in den Ländern der EU 25 im Jahr 2000³. In einer Broschüre zur ecopump-Initiative wird der Energieverbrauch von allen Pumpen zusammen mit 300 TWh/a angegeben⁴ und das Einsparpotential mit 123 TWh/a abgeschätzt. Diesen Werten gegenüber steht eine Nettostromproduktion von 2777 TWh/a in den Staaten der EU 25 des Jahres 2000⁵: Etwa 10.8% der Nettostromerzeugung werden demnach in Pumpenantriebe gespeist.

Maßnahmen der Marktregulierung sind der „Product Approach“ (dt.: Produktansatz) und der „Extended Product Approach“ (dt.: Erweiterter Produktansatz). Mithilfe des Product Approach wird die Qualität der Umsetzung von mechanischer zu hydraulischer Energie bewertet. Im Extended Product Ap-

³ FALKNER, „EuP Lot 11: Water pumps (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture)“, ([20], 2007)

⁴ ecopump: European Pump Industry Energy Commitment, herausgegeben von Europump

⁵ EUROSTAT, ([19])

proach werden die Grenzen des Produkts um die elektrischen Komponenten Motor und Frequenzumrichter erweitert.

Bereits für den ersten Schritt, den Product Approach, erschien der Wirkungsgrad im Bestpunkt als unzureichende Bewertungsgrundlage, da Pumpen nur sehr selten allein in diesem einen Betriebspunkt laufen. Das „House of efficiency“ (dt.: Haus des Wirkungsgrads)⁶ bezieht zwei weitere Wirkungsgrade in die Bewertung einer Pumpe ein: Auf der Kennlinie der Nenndrehzahl werden die Wirkungsgrade für 50 % und 110 % des Volumenstroms im Bestpunkt ermittelt. Für alle drei Wirkungsgrade werden stetig verschärfte Mindestwerte vorgegeben, die als untere Grenze für im Markt befindliche Wasserpumpen⁷ zu verstehen sind⁸. Die Mindestwirkungsgrade sind abhängig von Nennvolumenstrom und spezifischer Drehzahl der Pumpe.

Die Europäische Kommission wendet den Extended Product Approach derzeit mit der Einführung und stetigen Verschärfung eines Energieeffizienzindex (EEI) für Heizungspumpen an. Der EEI ist ein Maßstab für die Bewertung eines Produkts anhand der zu erwartenden mittleren Eingangsleistung, nicht mehr anhand eines Wirkungsgrads⁹. Die prognostizierte Nutzung des Produkts beeinflusst die Bewertung. Für Heizungspumpen wird die Eingangsleistung P_t von vier Betriebspunkten mit dem erwarteten Zeitanteil e_t des Betriebspunkts gewichtet und so die mittlere Eingangsleistung P_{avg} berechnet:

$$P_{\text{avg}} = \sum_{t=1}^4 P_t e_t. \quad (2.1)$$

Zusätzlich wird ein maschinenabhängiger Referenzwert $P_{\text{ref,EEI}}$ gemäß der Richtlinie ermittelt. Der Quotient liefert:

$$EEI = \frac{P_{\text{avg}}}{P_{\text{ref,EEI}}}. \quad (2.2)$$

Die vier Betriebspunkte sind abhängig vom Punkt besten Wirkungsgrads der Pumpe. Jeder Betriebspunkt ist durch einen anteiligen Volumenstrom definiert, dem ein Zeitanteil zugewiesen wird. Die Förderhöhe folgt aus der

⁶ STOFFEL, „Ecopump work by Europump“, ([74], 2013)

⁷ Ausnahmen existieren für Spezialanwendungen, beispielsweise Bohrlochpumpen.

⁸ STOFFEL, „EU-Richtlinien und ihre Auswirkungen auf den Pumpenmarkt - Herausforderung Energieeffizienz“, ([73], 2012)

⁹ LANG, LUDWIG, PELZ UND STOFFEL, „General Methodologies of Determining the Energy-Efficiency-Index of Pump Units in the Frame of the Extended Product Approach“, ([42], 2013)

Druckkontrollkurve. In Abbildung 2.2 ist das entsprechende Lastprofil dargestellt.

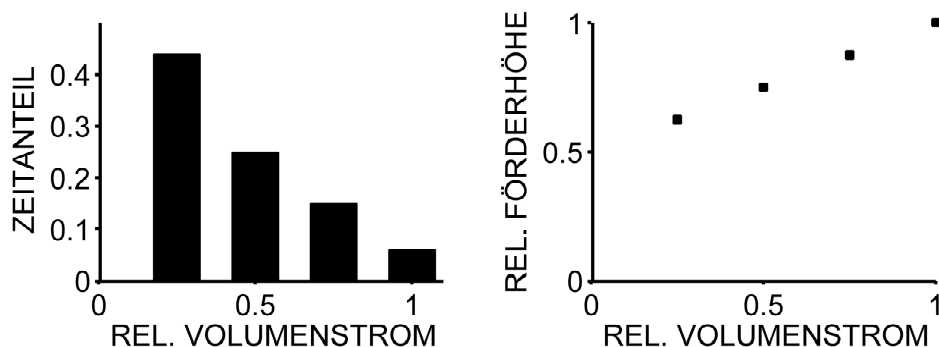


Abbildung 2.2: Referenzlastprofil für die Berechnung des Energieeffizienzindex von Heizungspumpen. Links: Zeitanteile der jeweiligen relativen Volumenströme; rechts: Druckkontrollkurve.

Für Druckerhöhungsanlagen ist eine ähnliche Bewertungsvorschrift in Planung¹⁰, die ein Lastprofil mit zehn Punkten zur Bewertung der Druckerhöhungsanlage vorsieht. Der Bezugspunkt des Lastprofils ist hier der Punkt der maximalen hydraulischen Leistung des Gesamtaggregats. Abbildung 2.3 zeigt das Lastprofil für die Bewertung von Druckerhöhungsanlagen¹¹.

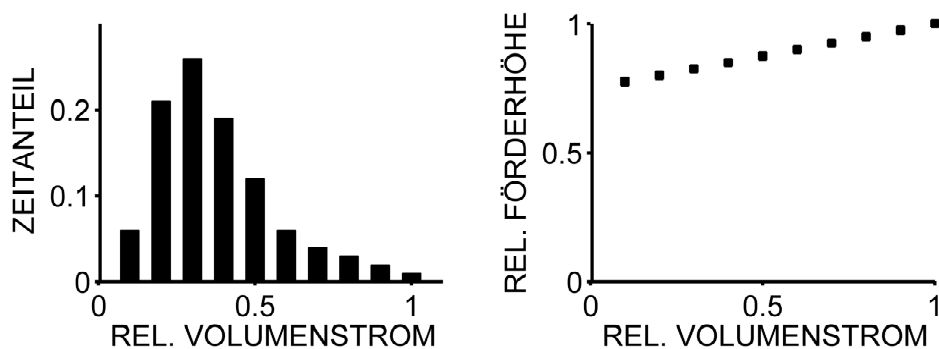


Abbildung 2.3: Vorgeschlagenenes Referenzlastprofil für die Berechnung des Energieeffizienzindex von Druckerhöhungsanlagen [30]. Links: Zeitanteile der jeweiligen relativen Volumenströme; rechts: Druckkontrollkurve.

¹⁰TAUBERT, STOFFEL, LUDWIG UND PELZ, „Development of a Standardized Approach to Assess the Energy Efficiency of Booster Pump Units in the Sense of an Extended Product“, ([77], 2016)

¹¹HIRSCHBERG, „Lastprofil und Regelkurve zur energetischen Bewertung von Druckerhöhungsanlagen (DEA)“, ([30], 2014)

Die dritte, geplante Stufe der Marktregulierungsmaßnahmen zur Energieeinsparung ist der „Systems Approach“¹² (dt.: Systemansatz)¹³. Dieser Ansatz wird sich auf das gesamte Pumpensystem konzentrieren, statt einzelne Maschinen oder Baugruppen zu bewerten. Das Ziel ist der Entwurf von bedarfsangepassten Systemen. In der genannten ecopump-Broschüre wurde knapp die Hälfte des Energieeinsparpotentials dem Systems Approach zugeschrieben.

Bis zur Einführung des Systems Approach schützen die Marktregulierungsmaßnahmen Anwender von Pumpensystemen nur vor dem Erwerb und Einsatz von ineffizienten, aber nicht vor unnötigen oder unpassenden Pumpenaggregaten. Für Anwender der Systeme, ganz gleich ob privat oder industriell, sind – neben eventueller ökokogischer Überzeugung – die notwendigen finanziellen Aufwendungen Treiber der Kaufentscheidung. Die maßgeblichen Posten der Lebenszykluskosten von Pumpensystemen sind die Anschaffungskosten, Energiekosten, Wartungs- und Ausfallkosten sowie Entsorgungskosten. Die Höhe der jeweiligen Anteile variiert extrem nach Pumpentyp, Nutzungsart und Studie^{14,15}.

Die Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing, LCC) verspricht erhebliche langfristige Ersparnisse gegenüber der bloßen Abwägung der Kaufentscheidung auf Basis der Anschaffungskosten. Auch für Pumpensysteme stützen Hersteller und Anlagenplaner die These, dass eine höhere Investition in effiziente Maschinen nach wenigen Jahren rentabel wird. Trotzdem wird LCC von vielen Unternehmen als zu aufwändig oder ungeeignet eingestuft¹⁶. Gerade wenn aber langfristige Kostenplanung von Unternehmen eingesetzt wird, muss Energieeinsparung wirtschaftlich rentabel sein.

2.3 Methoden des Operations Research

Optimierungsprogramme bestehen im Allgemeinen aus drei Teilen: (i) Die Zielfunktion gibt die Berechnungsvorschrift der Bewertungsgröße sowie deren Optimierungsrichtung (minimieren oder maximieren) an. (ii) Die Nebenbe-

¹²manchmal auch „System Approach“

¹³BIDSTRUP, TEEPE, BERGE UND LUDWIG, „Extended Product Approach for Pumps“, ([8], 2014)

¹⁴PAULY UND BRODERSEN, *TECHNIK KOMPAKT - aktuelles Fachwissen für die Praxis*, ([56], 2012)

¹⁵HERBORNER PUMPENTECHNIK GMBH & CO KG, *Lebenszykluskosten: Erläuterung und Berechnung*, ([28],)

¹⁶FRANZ, *Kostenmanagement: Wertsteigerung durch systematische Kostensteuerung*, ([21], 2002)

dingungen legen in Form von Gleichungen und Ungleichungen Beschränkungen des Suchraums fest. (iii) Der Definitionsbereich bestimmt die zulässigen Werte, die eine Variable annehmen darf. Im Unterschied zu den Nebenbedingungen wird mit dem Definitionsbereich auch angegeben, ob eine Variable nur ganzzahlige Werte annehmen darf.

Der Verwendung des Begriffs „mathematische Programmierung“ für klassische Optimierung mutet im Vergleich zur Programmierung von Software sonderbar an, hat sich aber historisch entwickelt. Gemeint ist die Maximierung oder Minimierung einer Zielfunktion unter der Einhaltung von Nebenbedingungen durch Veränderung der Entscheidungsvariablen¹⁷. Abhängig von der Form der Zielfunktion, der Nebenbedingungen und dem Definitionsbereich der Variablen wird zwischen Problemen der linearen (engl.: „Linear Program (LP)“), ganzzahligen (engl.: „Integer Program (IP)“), nichtlinearen, (engl.: „Nonlinear Program (NLP)“), gemischt-ganzzahligen linearen (engl.: „Mixed Integer Linear Program (MILP)“) und gemischt-ganzzahligen nichtlinearen (engl.: „Mixed Integer Nonlinear Program (MINLP)“) Optimierung unterschieden.

Optimierungsprogramme praxisrelevanter Größe können nur mit Computern gelöst werden. Der erste auf einem Computer implementierte Algorithmus zur Lösung eines linearen Programms ist der Simplex Algorithmus¹⁸. Davon ausgehend wurden unterschiedliche Algorithmen zur Lösung gemischt-ganzzahliger linearer Programme entwickelt und implementiert, deren Aufwand zur Berechnung im Allgemeinen deutlich über dem von rein linearen Programmen liegt, da der Lösungsraum nicht mehr zusammenhängend ist¹⁹. Für nichtlineare Programme ist der Lösungsraum nicht mehr allgemeingültig als konvex vorauszusetzen, daher nimmt auch für Nichtlinearitäten der Berechnungsaufwand zu²⁰. Suhl und Mellouli²¹ nennen darüber hinaus noch die Klasse der „netzwerkbasierten Optimierung“. Hier handelt es sich meist um gemischt-ganzzahlige Probleme, die aber mit speziellen Techniken der Netzwerkoptimierung erheblich effizienter gelöst werden können²².

Einem Optimierungsprogramm liegt immer ein Modell der Realität zugrun-

¹⁷SUHL UND MELLOULI, *Optimierungssysteme : Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*, ([76], 2013)

¹⁸DANTZIG, *Origins of the simplex method*, ([14], 1990)

¹⁹SCHRIJVER, *Theory of linear and integer programming*, ([70], 1998)

²⁰REINHARDT, HOFFMANN UND GERLACH, *Nichtlineare Optimierung: Theorie, Numerik und Experimente*, ([66], 2012)

²¹SUHL UND MELLOULI, *Optimierungssysteme : Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*, ([76], 2013)

²²AHUJA, MAGNANTI UND ORLIN, *Network flows: theory, algorithms, and applications*, ([1], 1993)

de, auf die die Lösung angewandt werden soll. Suhl und Mellouli beschreiben einen iterativen Modellbildungsprozess, welcher ein Modell anhand der Anwendbarkeit der gewonnenen Lösung auf die Realität bewertet. Darüber hinaus ist möglich, dass ein Modell zwar zutreffend ist, aber mit den Techniken des Operations Research nicht bearbeitet werden kann. Der Aufbau des Modells setzt also sowohl Kenntnisse der relevanten Realität als auch der Fähigkeiten und Grenzen des Operations Research voraus. Ein effizientes Modell ist immer von der Erfahrung des Modellentwicklers beeinflusst und wird deutlich geringere Berechnungsressourcen benötigen als das Modell eines Anfängers²³.

2.3.1 Exakte Optimierungsverfahren und Heuristiken

Die Lösung von Optimierungsproblemen erfordert den Einsatz von Algorithmen. Exakte Verfahren garantieren, dass nach ausreichend langer Laufzeit eine optimale Lösung gefunden und deren Optimalität auch nachgewiesen wird, sofern sie existiert. Im Gegensatz dazu stehen Heuristiken, die ebenso in der Lage sind, eine gute oder optimale Lösung zu finden, aber nie eine Aussage über deren Qualität machen können. Exakte Verfahren nutzen zusätzlich zur Suche nach immer besseren zulässigen Lösungen für die Problemstellung das Prinzip der oberen oder unteren (dualen) Schranke: Aus der Problemstellung werden Informationen gewonnen, wie gut der Zielfunktionswert höchstens sein kann. Ist die duale Schranke gleich der besten bisher gefundenen Lösung, wird die Suche beendet.

Effiziente exakte Verfahren für die gemischt-ganzzahlige Programmierung basieren auf dem Prinzip des Aufbaus eines Entscheidungsbaums, dem sogenannten „Branching“ (z.B. Branch and Bound²⁴, Branch and Cut²⁵, Branch and Reduce²⁶). Das gegebene Problem wird in jedem Knoten des Suchbaums in zwei Subprobleme aufgespalten, in denen alle Zwischenwerte zweier benachbarter ganzer Zahlen nicht mehr enthalten sind. In jedem Knoten wird ein relaxiertes Problem, in dem die Ganzzahligkeitsbedingungen weggelassen werden, mit einem Algorithmus zur Lösung kontinuierlicher Probleme gelöst. Da die Lösung der Relaxierung niemals schlechter ist als die Lösung des Ursprungsproblems, entsteht auf diesem Weg eine stärker werdende Schranke. Sind in der Lösung eines Subproblems alle Ganzzahligkeitsbedingungen er-

²³KALLRATH, *Gemischt-ganzzahlige Optimierung : Modellierung in der Praxis*, ([36], 2002)

²⁴LAND UND DOIG, „An automatic method of solving discrete programming problems“, ([41], 1960)

²⁵PADBERG UND RINALDI, „A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems“, ([55], 1991)

²⁶RYOO UND SAHINIDIS, „A branch-and-reduce approach to global optimization“, ([67], 1996)

füllt und die Variablenbelegung noch zulässig, entweder durch Zufall oder im letzten Blatt eines Asts deterministisch, ist eine Lösung des Ursprungsproblems gefunden. Vollenumeration ist in der Regel nicht notwendig, da (i) abgebrochen werden kann, wenn die stärkste Schranke und die gefundene Lösung gleich sind (siehe Abbildung 2.4²⁷) und da (ii) Äste nicht tiefer betrachtet werden, wenn ihre stärkste Schranke schlechter ist als die beste bisher gefundene Lösung. In der Praxis wird die Gleichheit nicht exakt gefordert, sondern ein geringer Abstand von Primallösung und dualer Schranke geduldet, um schneller eine Lösung zu erhalten. Moderne Solver setzen erfolgreich eine Kombination verschiedener exakter Verfahren und Heuristiken ein, um Probleme effizienter, d.h. schneller, zu lösen.

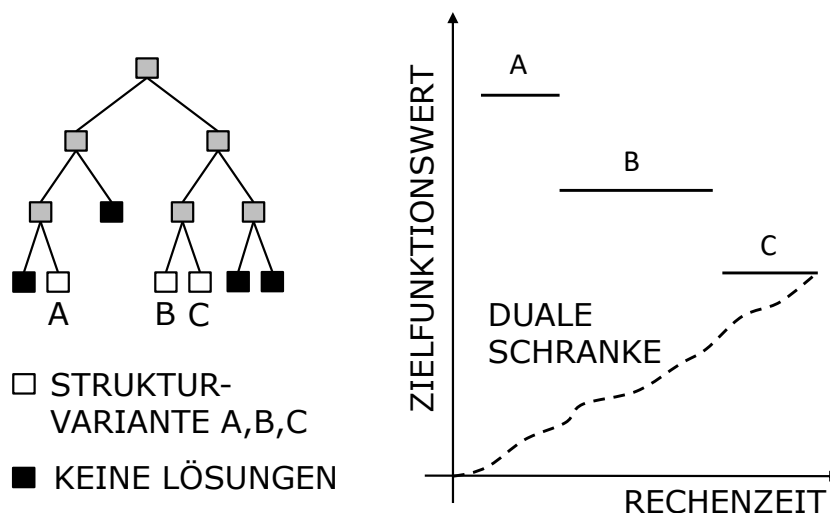


Abbildung 2.4: Entscheidungsbaum (links) und zeitliche Entwicklung (rechts) einer Optimierungsrechnung zur Minimierung eines Zielfunktionswerts [81].

Die Bildung einer dualen Schranke setzt voraus, dass der Solver auf alle Informationen des Modells zugreifen kann. Steht zur Auswertung der Qualität einer Variablenbelegung ein externes Simulationsmodell oder Experiment zur Verfügung, ist die Bildung einer dualen Schranke für keinen Algorithmus möglich. Optimiert werden kann dann nur heuristisch: Das Simulationsmodell oder Experiment fungiert in diesem Fall als Black Box, die den Zielfunktionswert aus einem Variablensatz ermittelt. Nach der Auswertung wird der Zielfunktionswert der Heuristik zurückgegeben, die das Ergebnis für die weitere Berechnung nutzt. Die Qualität der Lösung wird durch Ausprobieren

²⁷VERGÉ, PÖTTGEN UND PELZ, „Hilfe von TOR - Lebensdauer als Optimierungsziel im automatisierten Systementwurf“, ([81], 2014)

und Annähern abgeschätzt. Beispiele für Heuristiken dieser Art sind Evolutionäre Algorithmen²⁸ und neuronale Netze²⁹.

2.3.2 Graphentheorie

Ein Graph dient als Abbildung einer realen Struktur, eines Netzwerks oder Zusammenhangs. Abbildung 2.5 zeigt ein Beispiel für Graphen zur Abbildung einer Karte. Ein Graph G besteht aus einer Menge Knoten V sowie einer Menge Kanten E , welche jeweils zwei Knoten miteinander verbinden. Abhängig vom behandelten Problem werden den Knoten und Kanten des Graphen gegebenenfalls weitere problemspezifische Eigenschaften zugewiesen. Ein bekanntes Problem ohne weitere Eigenschaften für Knoten und Kanten ist das Königsberger Brückenproblem. Abbildung 2.5 zeigt eine Karte der Stadt Königsberg aus dem 17. Jahrhundert. Das Problem bestand in der Frage, ob es einen Weg durch die Stadt gebe, auf dem jede Brücke über den Fluss Pregnel genau einmal überschritten werde, und falls ja, ob dieser Weg ein Kreis sei.

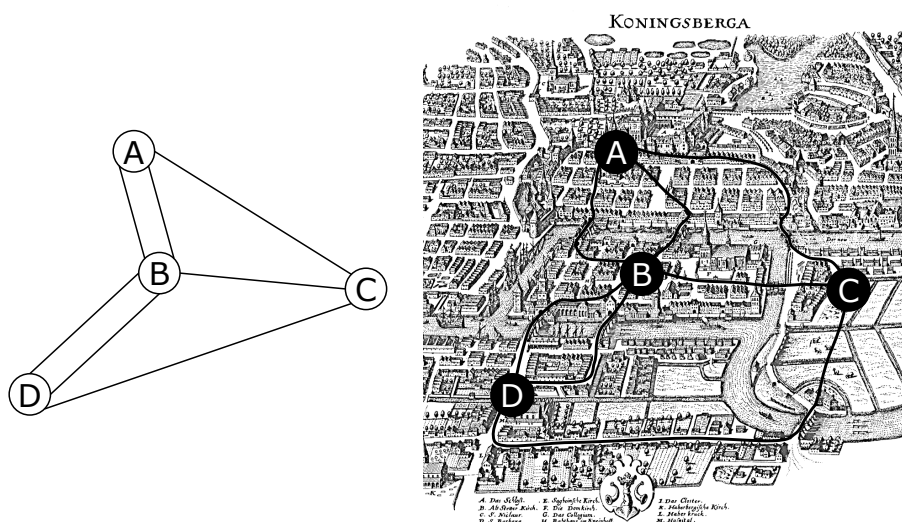


Abbildung 2.5: Königsberger Brückenproblem als Graph (links), sowie eingezeichnet in ein Bild der Stadt Königsberg (rechts, Stich nach Merian-Erben, 1652). Die Ufer des Flusses Pregnel werden als Knoten A, B, C, D modelliert, sodass die Wege über die Brücken dazwischen als Kanten abgebildet werden.

²⁸NISSEN, *Einführung in evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*, ([51], 2013)

²⁹KRÖSE, KROSE, SMAGT UND SMAGT, *An introduction to neural networks*, ([40], 1993)

Leonard Euler bewies 1736, dass es keinen solchen Weg gibt³⁰. Euler zeigte, dass in einem Graphen maximal zwei Knoten (Ufer) existieren dürfen, die eine ungerade Zahl angeschlossener Kanten (Brücken) haben. Diese Ufer sind dann Anfangs- und Endpunkt des Wegs. Ein Kreis ist nur dann möglich, wenn alle Ufer (Knoten) eine gerade Zahl angeschlossener Kanten haben.

Beim Königsberger Brückenproblem handelt es sich um ein rein topologisches Problem. Durch Hinzunahme von Flussgrößen als Variable entstehen Flussprobleme. Hier, z.B. für Logistik, Straßenverkehr, Wasser-, Öl- oder Gastransport, erleichtert die Abbildung eines komplexen Netzwerks oder einer unübersichtlichen Straßenkarte auf einen Graphen die formalisierte Darstellung des eigentlichen Problems.

2.3.3 Linearisierungsmethoden

Fällt ein Optimierungsproblem in die Klasse der nichtlinearen Programme, besteht neben der direkten Übergabe des Programms an einen nichtlinearen Solver immer die Alternative der Linearisierung und die Nutzung eines linearen Solvers. Dabei geht zwar die nichtlineare Zulässigkeit verloren – die Lösung wird ungenauer – der Gewinn besteht in einer potentiell schnelleren Lösung des Problems. Wenn einige nichtlineare Funktionen nicht im gesamten Definitionsbereich durch eine Gerade abgebildet werden können, weil der Genauigkeitsverlust zu groß wäre, erfolgt die Linearisierung stückweise. Weil dabei diskrete Variablen eingeführt werden, entsteht ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm. Techniken zur Linearisierung werden entweder direkt bei der Modellierung oder nach Fertigstellung des nichtlinearen Modells innerhalb eines Algorithmus, wie beispielsweise von Geißler et. al.³¹, angewandt. Vielma et. al. geben einen Überblick über verschiedene Techniken zur Linearisierung³² und vergleichen diese miteinander. Ausgangspunkt einer jeden Linearisierung sind die Stützstellen. Die nichtlineare Funktion wird diskretisiert ausgewertet und zwischen den Auswertungspunkten ein Netz aus Simplexe (Strecken zwischen zwei Punkten für univariante Funktionen, Dreiecke zwischen drei Punkten für bivariate Funktionen usw.) aufgespannt. Abbildung 2.6 zeigt zwei Beispiele für die Stützpunktgitter von bivalenten Funktionen.

³⁰EULER, „Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis“, ([18], 1741, Nachdruck [17])

³¹GEISSLER, MORSI UND SCHEWE, „A new algorithm for MINLP applied to gas transport energy cost minimization“, ([23], 2013)

³²VIELMA, AHMED UND NEMHAUSER, „Mixed-integer models for nonseparable piecewise-linear optimization: unifying framework and extensions“, ([82], 2010, Vielma et. al. fassen sich mitunter sehr kurz. Primärquellen: [11], [32], [34], [44], [46], [71], [13], [12], [22], [33], [38], [43], [50], [54], [86], [7])

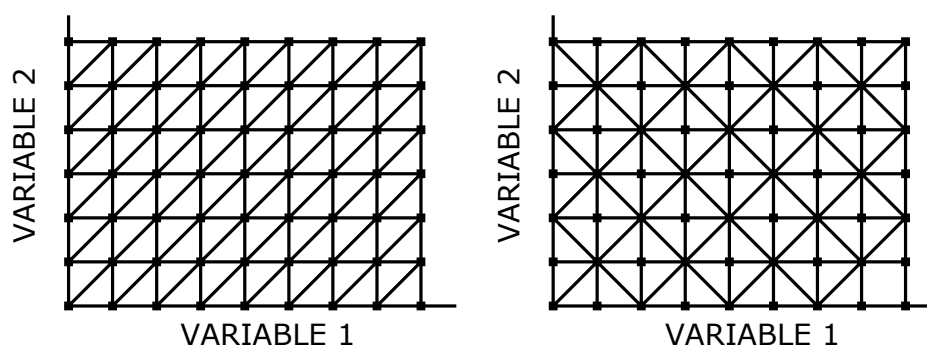


Abbildung 2.6: Uniformes (links) und „Union–Jack“ (rechts) Gitter zur Linearisierung einer bivariaten Funktion basierend auf Stützpunkten.

Disaggregierte Konvexkombination. Die disaggregierte Konvexkombination verwendet für jeden Simplex eine Binärvariable als Aktivitätsindex und für jede Stützstelle und jeden Simplex ein Stützstellengewicht im Intervall $[0, 1]$. Nur Stützstellen, die zu dem selben Simplex gehören dürfen gleichzeitig aktiv sein und ein Stützstellengewicht größer als null haben. Die Summe aller Stützstellengewichte ist gleich dem Aktivitätsindex des Simplex, ein Stützstellengewicht darf also nur dann größer als null sein, wenn der Simplex aktiv ist. Die Summe aller Stützstellengewichte multipliziert mit den Variablenwerten an den zugehörigen Stützstellen ergibt den Variablenvektor. Die Summe aus Stützstellengewichten multipliziert mit den Funktionsstützwerten liefert dann den Funktionswert. Für diese Formulierung wird für jeden Simplex eine binäre Hilfsvariable und für jeden Stützpunkt in jedem Simplex eine kontinuierliche Hilfsvariable benötigt.

Logarithmische disaggregierte Konvexkombination. Die logarithmische disaggregierte Konvexkombination versucht im Vergleich dazu die Anzahl der diskreten Hilfsvariablen zu reduzieren, indem statt der Aktivitätsindices ein Vektor von binären Hilfsvariablen zur Identifikation des aktiven Simplex genutzt wird^{33,34}. Die Unterscheidung der Simplexe im Linearisierungsgitter gelingt nur für spezielle Gitterstrukturen³⁵. Das in Abbildung 2.6 gezeigte uniforme Gitter erfüllt diese Eigenschaften nicht, die Union-Jack-Triangulierung³⁶ erfüllt sie. Die kontinuierlichen Hilfsvariablen bleiben

³³IBARAKI, „Integer programming formulation of combinatorial optimization problems“, ([31], 1976)

³⁴VIELMA UND NEMHAUSER, „Modeling disjunctive constraints with a logarithmic number of binary variables and constraints“, ([83], 2011)

³⁵AICHHOLZER, AURENHAMMER, HURTADO UND KRASSER, „Towards compatible triangulations“, ([2], 2003)

³⁶TODD, „Union jack triangulations“, ([79], 1977)

erhalten, ihre Summe muss kleiner als eins sein. Nur dann, wenn eine genaue Kombination der binären Hilfsvariablen eingestellt ist, dürfen die zum entsprechenden Simplex gehörenden Stützstellengewichte größer als null sein. Alle anderen Bedingungen bleiben gleich.

Aggregierte Konvexkombination. Die aggregierte Konvexkombination hat im Vergleich zur disaggregierten Konvexkombination weniger kontinuierliche Hilfsvariablen: Für jeden Simplex existiert eine Binärvariable als Aktivitätsindex und für jede Stützstelle ein Stützstellengewicht im Intervall $[0, 1]$. Die Summe aller Stützstellengewichte ist eins, ein Stützstellengewicht darf nur größer als null sein, wenn der zugehörige Simplex aktiv ist. Die Summe aller Stützstellengewichte multipliziert mit den Variablenwerten an den zugehörigen Stützstellen ergibt den Variablenvektor, die Summe aus Stützstellengewichten multipliziert mit den Funktionsstützwerten liefert dann den Funktionswert.

Logarithmische aggregierte Konvexkombination. Die logarithmische disaggregierte Konvexkombination wendet die Technik der Reduktion der Anzahl der binären Variablen auf die aggregierte Konvexkombination an.

Multiple Choice. Die Multiple-Choice dupliziert den Variablenvektor für jeden Simplex und ordnet ihm eine Aktivitätsstützstelle zu. Der Offset und die Richtungsvektoren der linearisierten Funktion sind für jeden Simplex durch die Stützstellen bekannt. Ein Satz von Ungleichungen beschreibt die Ränder eines jeden Simplex. Sind alle Ungleichungen eines Simplex erfüllt, ist dieser aktiv.

Inkrementelle Formulierung. Die inkrementelle Formulierung erfordert die Vorgabe einer Reihenfolge der Simplexe. Für univariante Funktionen folgt die Sortierung dem Funktionsverlauf. Für multivariante Funktionen muss eine Ordnung eingeführt werden. Der Funktionswert des ersten Punkts und die Richtungsvektoren innerhalb der Simplexe sind bekannt. Jeder Simplex der Linearisierung hat dann einen Eintrittspunkt und eine Aktivitätsvariable. Den Richtungsvektoren der Simplexe folgend wird die stückweise linearisierte Funktion „abgelaufen“.

Vielma et. al. zeigen durch einen empirischen Vergleich, dass die von Ihnen entwickelten Techniken zur Reduktion der Anzahl der Variablen tatsächlich einen Vorteil bringen. Für Probleme mit vielen Variablen sind die Rechenzeiten bei Anwendung der Logarithmischen Konvexkombinationen teilweise um Größenordnungen geringer.

2.4 Methodische Planung und Optimierung von Fluidfördersystemen

Die Planung und Optimierung von Systemen geschieht mit vielen Freiheitsgraden. Netzwerktopologie, Maschinenauswahl und Regelung werden entworfen und aufeinander abgestimmt. Dabei muss eine Vielzahl von Randbedingungen, beispielsweise technische Möglichkeiten, gesetzliche Rahmenbedingungen und Kundenwünsche, beachtet werden.

2.4.1 Herstellerwerkzeuge, Normung und Berechnung

Die Hersteller von Pumpen bieten in Katalogen ihre Produktpalette an. Meistens graphisch werden die Kennfelder der Drosselkurve und des Wirkungsgrads oder der Eingangsleistung basierend auf Messdaten angegeben. Darüber hinaus bietet jeder große Hersteller eine Software zur Auswahl einer Pumpe auf Basis des Anwendungsmediums und eines Nennbetriebspunkts an³⁷. Diese Tools ermöglichen mit einfachen Mitteln die Auswahl einer Pumpe, die im gegebenen Betriebspunkt die Erfüllung der Funktion sicherstellt. Darüber hinaus stellt mindestens ein Hersteller einen Service zur Verfügung³⁸, der die benötigten Pumpen durch Betrachtung mehrerer Lastpunkte anforderungsspezifischer auswählt.

Der verbindliche Stand der Technik zu Planung und Betrieb von Druckerhöhungsanlage für die Trinkwasserinstallation wird in der kommentierten DIN 1988-500 angegeben³⁹. Diese Vorschriften sind ausschließlich darauf ausgerichtet, den störungsfreien Betrieb der Anlagen sicherzustellen. Zu jedem Zeitpunkt des Betriebs muss gewährleistet werden, dass an jedem Anschluss im Gebäude ausreichend Druck zur Förderung des Trinkwassers bereitgestellt wird und das Wasser sauber bleibt. Die Norm hält fest, wie der Wasserbedarf der einzelnen Verbraucher abzuschätzen ist, macht Angaben zum Druckverlust in Leitungen, Armaturen und Messgeräten und gibt Hinweise zur Regelungsstrategie der Anlagen.

Bei der Regelung der Pumpen unterscheidet die Richtlinie zwischen Kaskadenregelung, Anlagen mit einer drehzahlgeregelten Pumpe und Anlagen mit ausschließlich drehzahlgeregelten Pumpen. Vor- und Nachteile der Regelungsarten in Bezug auf Anschaffungskosten und Druckschwankungen werden in der Norm diskutiert. Die Norm verfolgt konsequent die Regelungsstrategie,

³⁷KSB EasySelect oder Wilo-Select 4

³⁸KSB FluidFuture

³⁹HEINRICHS, KLEMENT UND RICKMANN, *Druckerhöhungsanlagen mit drehzahlgeregelten Pumpen: Kommentar zu DIN 1988-500*, ([27], 2011)

dass bei Erreichen der Maximallast der aktuellen Konfiguration weitere Pumpen zugeschaltet werden. Energetische Vorteile der Regelungsstrategien werden nicht erwähnt. Eine Richtlinie zur Auswahl der Pumpen enthält die Norm ebenfalls nicht.

Unterschiedliche Druckzonen werden in der Norm als „aus Gründen der Energieeinsparung [...] sinnvoll“ eingestuft, diese Bemerkung aber nicht quantifiziert. Die Höhe der Druckzonen wird so gewählt, dass überall der notwendige Versorgungsdruck bereitgestellt werden kann und möglichst wenige Druckminderer eingesetzt werden. Die einzelnen Druckerhöhungsanlagen werden mittelbar oder unmittelbar jeweils zu Beginn einer Druckzone in Reihenschaltung installiert.

Ist eine Berechnungsvorschrift, wie die genannte Norm, für die Installation nicht verfügbar oder die Berechnung zu aufwändig, wird zum Nachweis der Funktion eines Systems ein Simulationsprogramm eingesetzt. Speziell für Wassernetzwerke ist 1993 EPANET⁴⁰ veröffentlicht worden. Für Systeme mit Zeitentwicklung findet die Modellierungssprache Modelica⁴¹ in Kombination mit einem Solver für unterschiedlichste Fluide und Prozesse Anwendung.

2.4.2 Optimierung von Fluidfördersystemen

Unterschiedliche Fragestellungen zur Optimierung von Fluidfördersystemen wurden bisher mithilfe von Optimierungstechniken behandelt. Die Fragestellungen lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien unterteilen, die allerdings nicht immer scharf zu trennen sind: (i) Validierung der Funktion, (ii) Optimale Steuerung und (iii) Topologieplanung.

Validierung der Funktion. In stark verzweigten Netzwerken ist nicht mehr auf den ersten Blick ersichtlich, ob das Fluidfördersystem überhaupt in der Lage ist, die gewünschte Funktion zu erfüllen. Gasnetze haben viele Einspeise- und Entnahmestellen, Förderung in den Pipelines ist in beide Richtungen vorgesehen und erwünscht. Pfetsch et. al.⁴² berechnen, ob die Entnahme einer Gasmenge an einer gegebenen Stelle überhaupt möglich ist, indem sie durch Lösung gemischt-ganzzahliger Zulässigkeitsprobleme eine mögliche Konfiguration der Kompressorstationen und Armaturen im Netzwerk vorschlagen. Neben der Anwendung auf Gasnetzwerke liegt ein weiterer Fokus dieser Forschung auf der Entwicklung von Lösungsstrategien für

⁴⁰ORMSBEE, „The history of water distribution network analysis: The computer age“, ([52], 2006)

⁴¹TILLER, *Introduction to physical modeling with Modelica*, ([78], 2012)

⁴²PFETSCH, FÜGENSCHUH, GEISLER, GEISLER, GOLLMER, HILLER, HUMPOLA, KOCH, LEHMANN UND MARTIN, „Validation of nominations in gas network optimization: Models, methods, and solutions“, ([59], 2015)

MINLPs durch adaptive Linearisierung.

Optimale Steuerung. Morsi et. al.⁴³ wenden die entwickelten Techniken zur stückweisen Linearisierung an, um die Trinkwasserversorgung in kleinen Netzwerken kostenoptimal zu steuern. Kolb et. al.⁴⁴ verwenden die Kopplung von gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung und nichtlinearer Programmierung um Schaltentscheidungen für mittelgroße Trinkwassernetzwerke zu treffen, sodass die Wasserversorgung möglichst energieeffizient gesteuert werden kann. Davor haben in den 1990er Jahre Westerlund⁴⁵, Pettersson⁴⁶ et. al. das Problem des optimalen Betriebspunkts von mehreren Pumpen als MINLP formuliert und mit unterschiedlichen Algorithmen gelöst. Ormsbee und Lansey⁴⁷ vergleichen unterschiedliche Modellierungen und Optimierungsprogramme für Pumpensysteme. Burgschweiger et. al.⁴⁸ integrieren über die Planung der Steuerung eine Verbrauchsvorhersage in das Optimierungsprogramm und wenden ihre Methode auf das Netzwerk der Wasserversorgung von Berlin an.

Topologieplanung. Topologische Entscheidungen, wie Netzwerkplanung oder Pumpenauswahl, setzen immer die Anwendung diskreter Optimierung voraus: Fortschreitende Verbesserung der Algorithmen und Computertechnologie ermöglichten Arbeiten auf diesen Gebieten mit unterschiedlichem Schwerpunkt: Bieupoude et. al.⁴⁹ fokussieren sich auf die geometrische Planung des Netzwerks. Saleh et. al.⁵⁰ planen die Netzwerktopologie und treffen eine Rohrauswahl mit einem evolutionären Algorithmus. Narayanan et. al.⁵¹

⁴³MORSI, GEISSLER UND MARTIN, „Mixed integer optimization of water supply networks“, ([48], 2012)

⁴⁴KOLB, MORSI, LANG UND MARTIN, „Nonlinear and mixed integer linear programming“, ([39], 2012)

⁴⁵WESTERLUND, PETTERSSON UND GROSSMANN, „Optimization of pump configurations as a MINLP problem“, ([85], 1994)

⁴⁶PETTERSSON UND WESTERLUND, „Global optimization of pump configurations using binary separable programming“, ([58], 1997)

⁴⁷ORMSBEE UND LANSEY, „Optimal control of water supply pumping systems“, ([53], 1994)

⁴⁸BURGSCHWEIGER, GNÄDIG UND STEINBACH, „Optimization models for operative planning in drinking water networks“, ([10], 2009)

⁴⁹BIEUPOUDE, AZOUMAH UND NEVEU, „Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and constructal design“, ([9], 2012)

⁵⁰SALEH UND TANYIMBOH, „Coupled topology and pipe size optimization of water distribution systems“, ([68], 2013)

⁵¹NARAYANAN, SARANGAN, VASAN, SRINIVASAN, SIVASUBRAMANIAM, MURT UND NARASIMHAN, „Efficient booster pump placement in water networks using graph theoretic principles“, ([49], 2012)

und Planells Alandi et. al.⁵² schlagen Methoden zur Positionierung und Auswahl von Pumpen und Druckerhöhungsanlagen vor

⁵²PLANELLS ALANDI, CARRIÓN PÉREZ, ORTEGA ÁLVAREZ, MORENO HIDALGO UND TARJUELO MARTÍN-BENITO, „Pumping selection and regulation for water-distribution networks“, ([61], 2005)

Kapitel 3

Strukturierte Modellbildung

Die Antworten auf die drei Fragen der TOR-Methodik beschreiben das Optimierungsproblem vollständig. Um diese Informationen in einem Optimierungsprogramm zu codieren und mit einem Computer das optimale System zu finden, bedarf es weiterer modellierungstechnischer Überlegungen. Aufgrund der besonderen Anforderungen, die an ein Optimierungsprogramm gestellt werden, empfiehlt sich die Verwendung einer Modellhierarchie wie in Abbildung 3.1 gezeigt. Dieses Modellhierarchie sieht im Vergleich zum typischen Vorgehen im Operations Research¹ eine zusätzliche Modellebene vor.

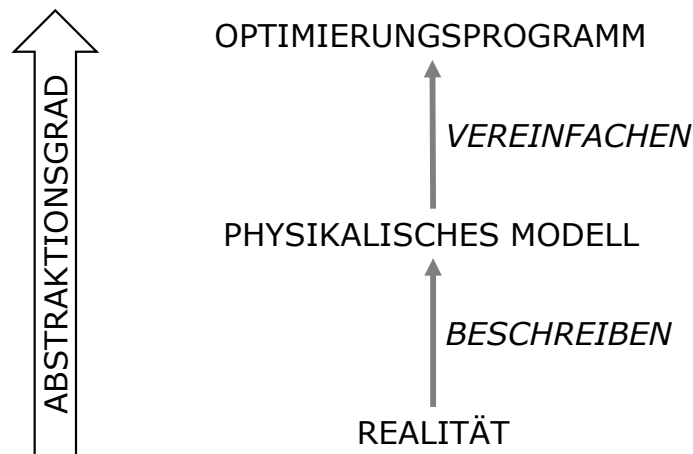


Abbildung 3.1: Modellhierarchie zur Erstellung eines Optimierungsprogramms.

¹ SUHL UND MELLOULI, *Optimierungssysteme : Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*, ([76], 2013)

Als erstes wird die Realität in einem physikalischen Modell beschrieben, bevor dieses wiederum entsprechend der besonderen Anforderungen an ein Optimierungsmodell vereinfacht wird. Der Abstraktionsgrad steigt dabei an. Sniegucki wendet in seiner unabhängig von dieser Arbeit entstandenen Dissertation² in einem anderen technischen Kontext Methoden des Operations Research an und nutzt eine ähnliche Hierarchie.

3.1 Grundlegende Eigenschaften von Optimierungsmodellen

Die Eigenschaften des Optimierungsprogramms werden aus dem Kontext der Problembeschreibung abgeleitet. Folgende weitere Fragen sind für die Klärung der Modelldetaillierung zielführend:

- Welche räumliche Auflösung benötigt das Modell?
- Kann ein stationäres Modell verwendet werden?
- Sind alle Optimierungsgrößen kontinuierlich variabel oder handelt es sich um diskrete Entscheidungen?
- Ist das Problem vollständig linear oder linearsierbar?

Das maßgebliche Kriterium für die räumliche Auflösung ist die Fragestellung der Optimierungsaufgabe. Die bisher mit der TOR-Methodik behandelten Optimierungsprobleme betrafen die Topologie oder Steuerung eines Fluidsystems. Hierfür wurden null- und eindimensionale physikalische oder kennfeldbasierte Modelle verwendet. Sollen hingegen Details von Fluidenergiemaschinen optimiert werden, ist deren Abbildung im Modell notwendig. Aus der Auflösung des Modells folgt direkt die Eingabelänge des Optimierungsprogramms und erlaubt so eine Abschätzung der Laufzeit des verwendeten Optimierungsalgorithmus. Jede räumliche Information vergrößert die Eingabelänge des Optimierungsprogramms, deshalb sind aus Sicht der Laufzeit des Programms räumlich null- oder eindimensionale Modelle dreidimensionalen vorzuziehen.

Ob ein stationäres oder instationäres Modell benötigt wird folgt aus den Eigenschaften des Komponentenkatalogs. Wenn die Funktion von System oder

² SNIUGUCKI, „Optimal Cylinder Commutation in Digital Hydraulic Pumps and Motors for Pulsation Minimization“, ([72], 2016)

Komponenten stationär und darüber hinaus auftretende instationäre Effekte vernachlässigbar sind³, wird ein stationäres Modell gewählt. Sind aber Komponenten mit instationärer Funktion oder instationärem Verhalten, beispielsweise Speicher aller Art⁴ oder Verschleiß in Form von Abnutzungerscheinungen⁵, im System enthalten, entsteht zwangsläufig ein instationäres Optimierungsprogramm.

Diskrete Entscheidungen erfordern den Einsatz von spezialisierten Lösungsverfahren und erschweren die Lösung eines Optimierungsprogramms, sind aber in der Topologieoptimierung elementar. Jede Kauf- oder Schaltentscheidung erfordert die Einführung einer diskreten Variable. Der Programmtyp ändert sich nicht mehr, wenn zusätzliche diskrete Variable eingeführt werden.

Physikalische Systeme sind in der Regel nicht gänzlich linear. Weil aber die lineare Optimierung oft effizienter ist, muss die Möglichkeit der Linearisierung von eigentlich nichtlinearen Problemen in Betracht gezogen werden. Stückweise Linearisierung ist nur möglich, wenn die Einführung diskreter Variabler erlaubt ist. Sind bereits diskrete Fragestellungen in der Optimierungsaufgabe enthalten, so ist die nachträgliche stückweise Linearisierung eines zunächst nichtlinearen Modells ohne Erweiterung des Lösungsverfahrens möglich.

3.2 Abbildung von Fluidsystemen als Graphen

Die nulldimensionale, stationäre Abbildung eines Fluidsystems als mathematischer Graph dient als Hilfestellung für die Modellierung und die Erstellung eines Optimierungsprogramms. Dieser Schritt ist nicht notwendig, hat sich aber in zahlreichen Forschungsarbeiten als nützlich erwiesen.

Der Graph $G(V, E)$ repräsentiert die Obermenge aller für die Rechnung in Erwägung gezogener Fluidsysteme. Die Knoten V und Kanten E des Graphen repräsentieren hierbei unterschiedliche Elemente des Fluidsystems. Die Knoten des Graphen dienen als Kopplungspunkte zwischen den Kanten, die als Abbildung der meisten technischen Komponenten dienen. In jedem Knoten des Netzwerks wird eindeutig der Druck bestimmt. Entgegen der Beschrei-

³ ALTHERR, EDERER, LORENZ, PELZ UND PÖTTGEN, „Experimental Validation of an Enhanced System Synthesis Approach“, ([4], 2016)

⁴ DÖRIG, EDERER, HEDRICH, LORENZ, PELZ UND PÖTTGEN, „Technical Operations Research (TOR) Exemplified by a Hydrostatic Power Transmission System“, ([15], 2014)

⁵ VERGÉ, PÖTTGEN UND PELZ, „Hilfe von TOR - Lebensdauer als Optimierungsziel im automatisierten Systementwurf“, ([81], 2014)

bung von Ahuja⁶ werden neben Leitungen auch Pumpen oder Pumpstationen und darüber hinaus Armaturen als Kanten modelliert. Zweifellos ist keines der beiden Modelle falsch, da der Graph nur als Hilfsmittel der Modellierung dient.

Die nulldimensionale Abbildung der Komponenteneigenschaften auf die Kanten erfolgt systematisiert: Pumpen, Armaturen und Rohrleitungen haben zwei räumlich getrennte Flansche, eine Druckänderung entlang der Komponente und genau einen Wert für den fließenden Massen- oder Volumenstrom. Prinzipiell werden alle Kanten als ungerichtet eingeführt und im physikalisch relevanten Fall zu gerichteten Kanten reduziert. Die Menge E_P aller Pumpenkanten repräsentiert alle Pumpen des Optimierungsproblems.

Komponenten mit nur einem Anschluss, wie beispielsweise Quellen oder Senken, werden im Fluidsystem als Knoten abgebildet. Die Mengen V_q und V_s repräsentieren alle Quellen und Senken des Systems. Das Element „Speicher“ ist aufgrund der instationären Funktion nur in zeitabhängigen Systemen sinnvoll. Je nach Hintergrund der Modellierung kann dieses Element auch als Schleife⁷ abgebildet werden, also als eine Kante, deren Start- und Zielknoten identisch ist.

Die Kontinuitätsgleichung ohne Quell- oder Senkenterm gilt für jeden Knoten des Netzwerks mit Ausnahme der Quellen und Senken:

$$\forall k \in V \setminus (V_q, V_s) : \sum_{(i,k) \in E} \dot{m}_{i,k} = \sum_{(k,l) \in E} \dot{m}_{k,l}. \quad (3.1)$$

Für die Annahme inkompressibler Medien kann diese zur Volumenstromerhaltung

$$\forall k \in V \setminus (V_q, V_s) : \sum_{(i,k) \in E} Q_{i,k} = \sum_{(k,l) \in E} Q_{k,l} \quad (3.2)$$

vereinfacht werden.

Innerhalb des Netzwerks gilt die Energiegleichung für jede Kante. Diese lautet für quasistationäre Systeme:

$$\Delta h_t = \frac{P_S}{\dot{m}} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}. \quad (3.3)$$

Hierin sind Δh_t die Totalenthalpiedifferenz, P_S die Wellenleistung einer Fluidenergiemaschine sowie \dot{Q} der zu- oder abgeführte Wärmestrom.

⁶ AHUJA, MAGNANTI UND ORLIN, *Network flows: theory, algorithms, and applications*, ([1], 1993)

⁷ PÖTTGEN, EDERER, ALTHERR, LORENZ UND PELZ, „Examination and Optimization of a Heating Circuit for Energy-Efficient Buildings“, ([62], 2015)

Für die quasistationäre Betrachtung inkompressibler Medien in einem Fluidfördersystem bildet Δp die gesamte daraus folgende Druckänderung entlang der Kante im Sinne einer nulldimensionalen Modellierung ab:

$$\forall (i, k) \in E : p_k - p_i = \Delta p_{i,k}. \quad (3.4)$$

Die Energiegleichung innerhalb des Graphen gilt nur, wenn die Komponente ausgewählt und aktiviert wird. Um eine Auswahl der Komponenten des Fluidnetzwerks zu treffen oder einzelne Komponenten an- oder auszuschalten, werden die entsprechenden Kanten deaktivierbar modelliert. Dazu wird ein Vektor binärer Variablen x zur Anzeige der Aktivität der Kanten eingeführt und die Big-M-Formulierung⁸ zur Deaktivierung der Kante verwendet. Die Gleichung wird in zwei Ungleichungen aufgespalten:

$$\forall (i, k) \in E : p_k - p_i \leq \Delta p_{i,k} + (1 - x_{i,k})p_M. \quad (3.5)$$

$$\forall (i, k) \in E : p_k - p_i \geq \Delta p_{i,k} - (1 - x_{i,k})p_M. \quad (3.6)$$

p_M ist dabei der größtmögliche auftretende Wert für $\Delta p_{i,k}$ im gesamten Problem. Die Big-M-Formulierung wird auch für topologische Entscheidungen genutzt. Die optionale Trennung oder Verbindung zweier direkt hintereinanderliegender Kanten wird mit Kanten modelliert, für die immer $\Delta p_{i,k} = 0$ gilt.

3.3 Funktion des Systems

Die qualitative Beschreibung der Funktion eines Fluidsystems ist in den meisten Fällen in einem Satz oder Schlagwort formulierbar. Für die Einordnung des Fluidsystems ist diese Beschreibung zwar ausreichend, als Grundlage für ein Optimierungsprogramm aber zu wenig. Die konkrete, mit Zahlen belegte Angabe der zu erwartenden Last ist zwingend notwendig, wenn auch nicht immer einfach: Eine Messung der Last ist nur bei Überarbeitung von Anlagen möglich, eine gänzliche Neuplanung erfordert immer eine Schätzung.

Für ein Fluidfördersystem erfolgt die Angabe der Last im Regelfall als Kombination von erforderlichem Volumenstrom $Q_{\text{last},s}$, der zum Ausgang oder zu den Ausgängen des Systems gefördert wird, sowie den an Ein- und Ausgang anliegenden Drücken $p_{\text{last},q}$ und $p_{\text{last},s}$. Die Aufbereitung der Daten zur Beschreibung der Funktion des Systems obliegt dem Planer. Hierbei sind Umsicht und ingenieurwissenschaftliches Verständnis dringend notwendig. Drei

⁸ KALLRATH, *Gemischt-ganzzahlige Optimierung : Modellierung in der Praxis*, ([36], 2002)

mögliche Erscheinungsformen der Funktionsbeschreibung werden aufgrund ihres Einflusses auf die Form des Optimierungsprogramms unterschieden: (i) Lastpunkt, (ii) Lastprofil, und (iii) Lasthistorie.

(i) Die Beschreibung der Last durch einen einzelnen Lastpunkt ist die einfachste Darstellung. Das resultierende Optimierungsergebnis kann demzufolge auch nur Informationen über ein optimales System für diesen einen Betriebspunkt geben. In Fällen eines bewusst gewollten an/aus-Betriebs einer Fluidförderanlage mit unveränderlicher Anlagenkennlinie ist dieses Vorgehen sinnvoll, allerdings erfüllen die wenigsten Anlagen diese Voraussetzung. Durchaus gängige Praxis ist dennoch die topologische Auslegung der Anlage auf den maximal zu erwartenden Lastpunkt und die Annahme der Funktionsfähigkeit der Anlage für alle anderen Lastpunkte⁹. Die Modellierung des Lastpunkts einer Fluidförderanlage erfolgt durch Aufnahme einer Nebenbedingung zur Angabe der erforderlichen Förderleistung in das Optimierungsprogramm. Gefordert wird der Transport eines Volumenstroms zur Senke des Systems.

$$\forall s \in V_s : \sum_{(i,s) \in E} Q_{i,s} = Q_{\text{last},s}. \quad (3.7)$$

Die Angabe der Drücke an den Quellen und Senken des Systems geht als weitere Randbedingung in die Modellierung ein:

$$\forall q \in V_q : p_{\text{last},q} = p_q, \quad (3.8)$$

$$\forall s \in V_s : p_{\text{last},s} = p_s. \quad (3.9)$$

(ii) Um die Funktion der Anlage über den gesamten zu erwartenden Betriebsbereich abzubilden, besteht die Möglichkeit der Hinzunahme weiterer, über den Betriebsbereich verteilter Lastpunkte, sodass die Menge aller Lastfälle T entsteht. Für jeden Lastfall t des Lastprofils T wird der Graph des Optimierungsprogramms mit allen Variablen einmal vervielfältigt. Der Lösungsalgorithmus findet eine Betriebsstrategie für die Anlage. Eine Kopplung der Lastfälle untereinander existiert nicht, da die Reihenfolge der einzelnen Lastfälle unerheblich für den Betrieb der Anlage ist. Die Gleichungen der Lastanforderung gelten nun in jedem Lastfall:

$$\forall s \in V_s, \forall t \in T : \sum_{(i,s) \in E} Q_{i,s,t} = Q_{\text{last},s,t}, \quad (3.10)$$

⁹ HEINRICHS, KLEMENT UND RICKMANN, *Druckerhöhungsanlagen mit drehzahlgeregelten Pumpen: Kommentar zu DIN 1988-500*, ([27], 2011)

$$\forall q \in V_q, \forall t \in T : p_{q,t} = p_{\text{last},q,t}, \quad (3.11)$$

$$\forall s \in V_s, \forall t \in T : p_{s,t} = p_{\text{last},s,t}. \quad (3.12)$$

Das Lastprofil wird zeitlich mit der Gesamtbetriebsdauer d und des jeweiligen Zeitanteils e eines Lastfalls beschrieben. In bisherigen Planungs- und Bewertungsschemata kommt eine Unterscheidung vom Lastpunkt zum Lastprofil nur im Kontext einer Bewertung, zum Beispiel Energieverbrauchslimitierung (vergleiche Kapitel 2.2), und damit eher im Sinne einer Zielbeschreibung zum Einsatz.

(iii) Für Systeme, deren aktueller Zustand von der Geschichte des System abhängt, ist die Angabe eine Lasthistorie notwendig¹⁰. Aufbauend auf dem Lastprofil kommt hinzu, dass die Lastfälle untereinander gekoppelt sind und deshalb deren zeitliche Abfolge relevant wird. Die Beschreibung der Abfolge der Lastfälle über die gesamte Lebensdauer ist dabei ebenso möglich wie die vielfache Wiederholung eines Lastzyklus.

3.4 Ziel der Optimierung

Das Ziel der Optimierung muss, ebenso wie die Funktion, quantitativ beschrieben werden. Diese quantitative Beschreibung besteht aus einem Maß in Form einer Funktion der im Optimierungsprogramm enthaltenen Variablen und einer Optimierungsrichtung (maximieren oder minimieren). Auch diese Funktion darf im Fall der linearen Optimierung nur eine Linearkombination der verwendeten Variablen sein. Ein naheliegendes Ziel für die Optimierung einer Fluidförderanlage mit einem Auslegungspunkt ist die Minimierung der gesamten Eingangsleistung

$$\min \sum_{(i,k) \in E_P} P_{i,k}. \quad (3.13)$$

Für eine Fluidförderanlage mit einem Lastprofil ist die Minimierung der mittleren Eingangsleistung eine sinnvolle Zielvorgabe:

$$\min \sum_{t \in T} \left(e_t \sum_{(i,k) \in E_P} P_{i,k,t} \right). \quad (3.14)$$

¹⁰ALTHERR, EDERER, LORENZ, PELZ UND PÖTTGEN, „Experimental Validation of an Enhanced System Synthesis Approach“, ([4], 2016)

Neben einer geringen Eingangsleistung sind niedrige Investitionskosten ein maßgebliches Kriterium beim Entwurf einer Druckerhöhungsanlage. Kaufentscheidungen für oder gegen Komponenten sind nicht zwangsläufig aufgrund der Funktionsbeschreibung im Optimierungsprogramm enthalten. Ist die Beschreibung der eigentlich gewünschten Zielfunktion mit den bislang im Optimierungsprogramm enthaltenen Variablen nicht möglich, wird das Modell um diese ergänzt. Aktivieren und Deaktivieren von Komponenten ist mit der Big-M-Formulierung möglich, aber im Falle der Nutzung eines Lastprofils nicht mit einer Kaufentscheidung gleichzusetzen. Wenn mehrere Instanzen einer Komponente im Baukasten enthalten sind und in allen Lastfällen höchstens eine davon gebraucht würde, könnte das Optimierungsprogramm trotzdem unterschiedliche Instanzen verwenden. Würde aus dem Optimierungsergebnis dann direkt eine Kaufentscheidung abgeleitet, so entstünden höhere Investitionskosten als notwendig.

Die Einführung eines binären Vektors z als Kaufentscheidung und deren Kopplung mit der Betriebsentscheidung x führt zu einem mehrstufigen Optimierungsprogramm: Die Bedingung

$$\forall (k, i) \in E, \forall t \in T : z_{k,i} \geq x_{k,i,t}. \quad (3.15)$$

drückt aus, dass die Kaufentscheidung einer Komponente getroffen werden muss, wenn die Komponente in mindestens einem Lastfall eingeschaltet wird. Die Zielfunktionen „Minimierung der Investitionskosten“ wird in Form von

$$\min \sum_{(i,k) \in E} z_{i,k} K_{I,i,k} \quad (3.16)$$

mit K_I als Investitionskosten der jeweiligen Kante im Optimierungsmodell formuliert.

Die Verwendung einer Linearkombination von Variablen als Zielfunktion ermöglicht die Berücksichtigung mehrerer Größen im Optimierungsziel. Hierbei handelt es sich nicht um multikriterielle Optimierung¹¹, da immernoch lediglich ein Wert als Gütekriterium des Systems angegeben wird. Die Wichtung der einzelnen Variablen kann vom Anwender bestimmt und durch weitere Randbedingungen gegeben werden. Zur Minimierung von Eingangsleistung und Investitionskosten bieten sich als Wichtungsfaktoren der Energiepreis K_E und die erwartete Laufzeit der Anlage d an:

$$\min \sum_{(i,k) \in E} z_{i,k} K_{I,i,k} + d K_E \sum_{t \in T} \left(e_t \sum_{(i,k) \in E_P} P_{i,k,t} \right). \quad (3.17)$$

¹¹EHRGOTT, *Multicriteria optimization*, ([16], 2013)

3.5 Spielfeld der Optimierung

Das „Spielfeld“ oder der „Baukasten“ der Optimierung beinhaltet die Beschreibung aller technischen Komponenten, die zur Erfüllung der technischen Aufgabenstellung zur Verfügung stehen. Als Beschreibung dienen Komponentenmodelle axiomatischer oder empirischer Natur. Art und Detaillierungsgrad der Modelle sind frei und sollten auch hier nach dem einsteinschen Grundsatz „So einfach wie möglich, aber nicht einfacher.“ gestaltet werden. Das Spielfeld der Optimierung von Druckerhöhungsanlagen besteht aus einer gegebenen Anzahl baugleicher oder unterschiedlicher Pumpen.

Eine Pumpe ist im abstrakten Modell des Flussgraphen eine Kante. Folglich werden alle Variablen, mit denen Betriebszustände der Pumpe abgebildet werden, der Pumpenkante zugeordnet. Diese sind: Volumenstrom Q , Förderhöhe H , Drehzahl n und Eingangsleistung P . Die Kante der Pumpe beginnt und endet in einem Knoten. Über diese Knoten interagiert die Kante mit ihrer Umgebung. Die eingeschaltete Pumpe fördert den Volumenstrom und erzeugt eine Druckerhöhung zwischen Ein- und Ausgangsknoten. Der geförderte Volumenstrom geht in die für alle Netzwerke geltende Kontinuitätsgleichung für jeden Knoten ein. Aus der Förderhöhe der Pumpe ergibt sich mit der konstant angenommenen Dichte von Wasser ρ und der Erdbeschleunigung g direkt die Druckänderung der Kante:

$$\forall (i, k) \in E_P : H_{i,k} = \frac{\Delta p_{i,k}}{\rho g}. \quad (3.18)$$

Zur Modellierung von Pumpen werden aus folgenden zwei Gründen Angaben aus den Herstellerkatalogen genutzt: (i) Für alle Pumpen sind diese schnell verfügbar. (ii) Die axiomatische oder semi-empirische Modellierung von Pumpenkennlinien nach dem Vorbild von Stoffel und Lauer¹² erfordert detaillierte Kenntnisse über die Geometrie und die Strömung der Pumpe.

Die Herstellerangaben für die Betriebscharakteristik einer Pumpe basieren auf Messdaten. Für eine konstante Drehzahl wird der Widerstand eines Prüfkreislauf verändert und so zusammengehörige Werte für Volumenstrom, Förderhöhe und Eingangsleistung messtechnisch ermittelt. Die Angabe dieser Werte erfolgt in der Regel ohne die Angabe der Messgenauigkeit. Durch Interpolation oder Fit entsteht die Kennlinie der Pumpe für die Referenzdrehzahl. Abbildung 3.2 zeigt Messpunkte einer Pumpenkennlinie sowie eine stückweise lineare Interpolation zwischen den Messpunkten und einen Fit mit einem Polynom des Grades m der Messpunkte.

¹²STOFFEL UND LAUER, „Theoretically attainable efficiency of centrifugal pumps“, ([75], 1994)

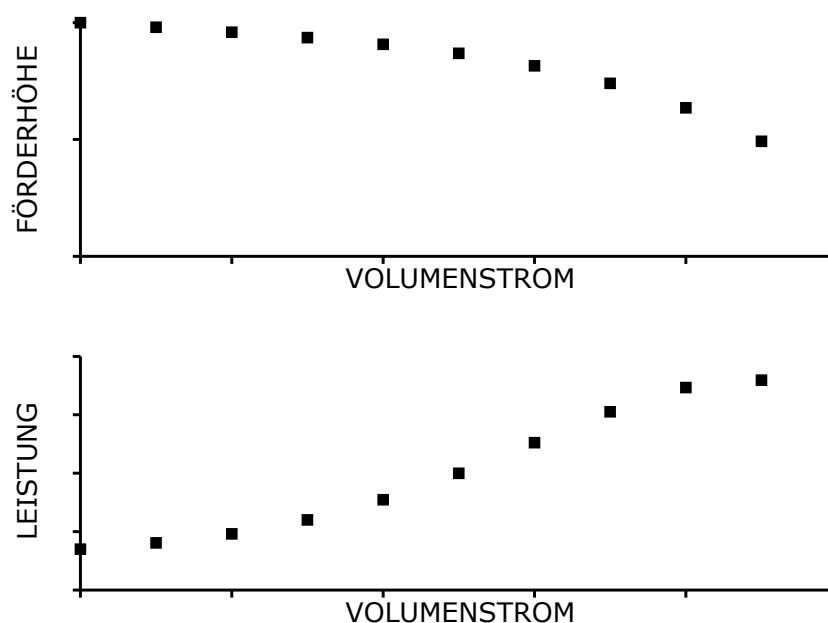


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Messdaten für eine Pumpenkennlinie.

Lineare Interpolation und Fit sind zwei Möglichkeiten der Erstellung einer Kennlinie aus Messpunkten, die jede für sich einen wesentlichen Vorteil für die Effizienz des eingesetzten Solvers haben: Lineare Interpolation nutzt die Einführung von diskreten und linearen Hilfsvariablen zur stückweisen Linearisierung der Pumpenkennlinie unter Verwendung ausschließlich linearer Gleichungen. Der Fit der Kennlinie ist zwar nichtlinear, vermeidet auf der anderen Seite aber die Einführung von zusätzlichen diskreten Hilfsvariablen. Beide Möglichkeiten bieten demnach abhängig von der Art des gewünschten mathematischen Programms mindestens einen wesentlichen Vorteil. Spline Interpolation beispielsweise würde zur Einführung von diskreten Hilfsvariablen und nichtlinearen Gleichungen führen und so weder den Einsatz linearer Solver ermöglichen noch die Anzahl der Variablen im Optimierungsprogramm reduzieren.

Zur Erzeugung des Kennfelds einer drehzahlgeregelten Pumpe im Drehzahlintervall $[n_{\min}, n_{\max}]$ aus der vom Hersteller gegebenen Punkteschar dienen die Skalierungsgleichungen mit Referenzgrößen $Q_{\text{ref}}, H_{\text{ref}}, n_{\text{ref}}$ und P_{ref} ¹³:

$$\frac{Q(n)}{Q_{\text{ref}}} = \frac{n}{n_{\text{ref}}}, \quad (3.19)$$

¹³KARASSIK, MESSINA, HEALD UND COOPER, *Pump handbook*, ([37], 1976)

$$\frac{H(n)}{H_{\text{ref}}} = \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^2, \quad (3.20)$$

$$\frac{P(n)}{P_{\text{ref}}} = \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^3. \quad (3.21)$$

Der Wirkungsgrad einer Pumpe ist nicht unabhängig von der Drehzahl, sondern verringert sich mit abnehmender Drehzahl¹⁴. Im industriellen Einsatz wird deshalb als Referenzdrehzahl die maximale Drehzahl der Pumpe $n_{\text{ref}} = n_{\text{max}}$ verwendet und die Skalierung der Leistung um einen Korrekturfaktor ergänzt, der zusätzlich vom Bestpunktwirkungsgrad η_{opt} abhängig ist:

$$\frac{P(n)}{P_{\text{ref}}} = \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^3 \frac{1 - (1 - \eta_{\text{opt}}) \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^{-0.1}}{\eta_{\text{opt}}}. \quad (3.22)$$

Die Mindestdrehzahl der Pumpen n_{min} als untere Grenze der Drehzahl n ist im Optimierungsprogramm echt größer als Null, um eine Division durch null in der Skalierung der Leistung zu vermeiden. Die Deaktivierung der Pumpe erfolgt über die Aktivitätsvariable und die Formulierung einer Big-M-Bedingung analog zu Gleichung 3.5 und 3.6.

Stückweise Linearisierung eines Kennfelds

Die Messpunkte des Herstellers liegen als Tupel von Referenzdrehzahl n_{ref} , Volumenstrom Q , Förderhöhe H , und Eingangsleistung P vor. Zur Modellierung des gesamten Kennfelds wird die Drehzahl variiert und im gesamten zulässigen Drehzahlintervall werden weitere Stützpunkte mit den Skalierungsgesetzen generiert. Abbildung 3.3 zeigt die Stützpunkte der Volumenstrom-Drehzahl Ebene des Kennfelds. Den Wertepaaren aus Volumenstrom und Drehzahl wird jeweils die Förderhöhe des Betriebspunkts zugeordnet. Abbildung 3.3 zeigt, dass die entstehende Verteilung der Stützpunkte in der Volumenstrom-Förderhöhe-Ebene nur im eigentlichen Betriebsbereich der Pumpe liegt, also zwischen der Ordinate links, der Maximalkennlinie oben und der Ursprungsparabel durch den Messpunkt mit dem Größten Volumenstrom unten. Abschließend wird jedem Betriebspunkt noch die Eingangsleistung zugeordnet.

Zur Linearisierung werden die einzelnen Stützstellen Simplexen zugeordnet. Dazu werden die Stützstellen für konstante Drehzahl in Richtung aufsteigenden Volumenstroms sowie jeweils die durch Skalierung erzeugten Abbilder

¹⁴PFLEIDERER, *Die Kreiselpumpen*, ([60], 2013)

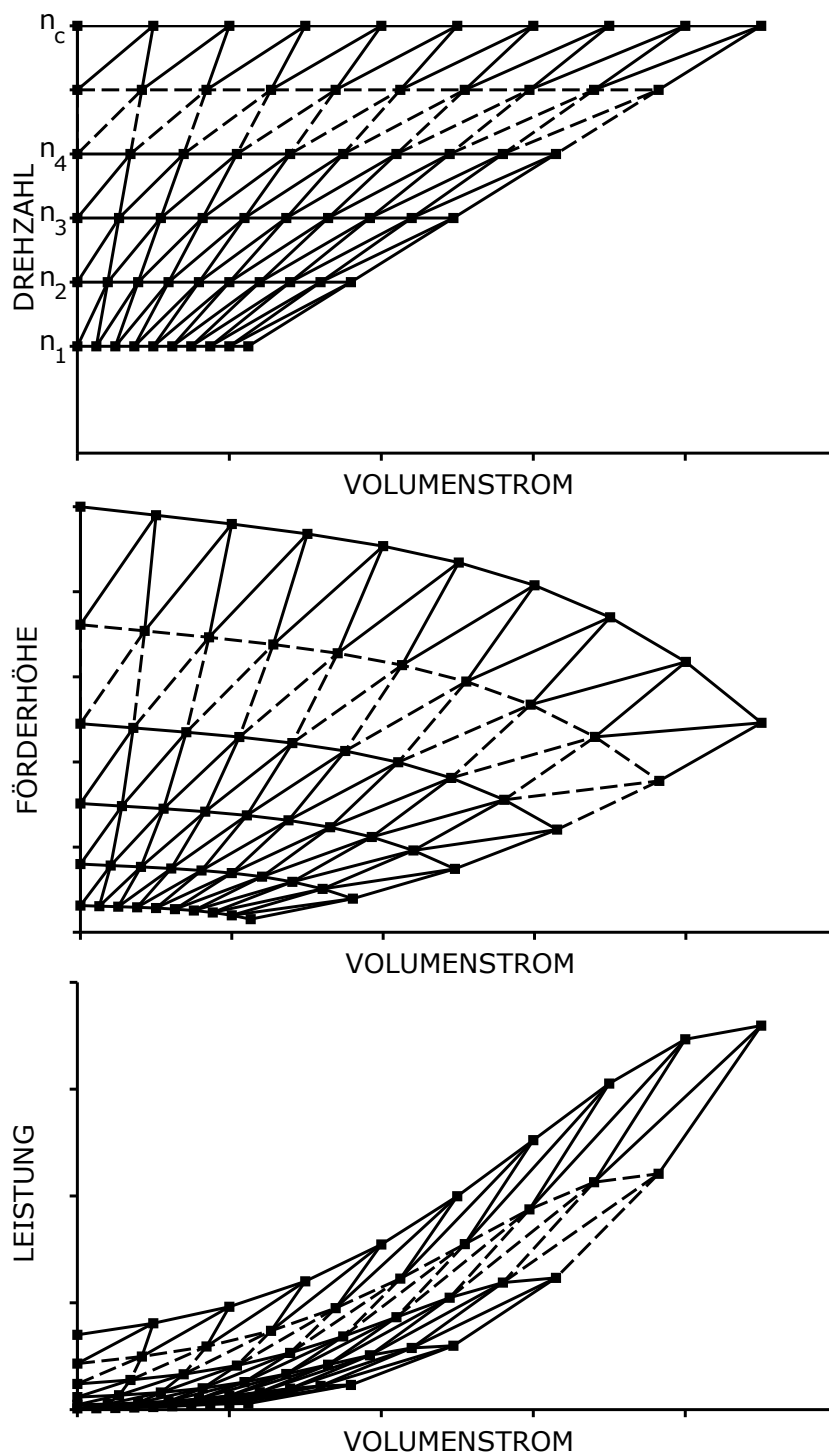


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der verwendeten Gitter und Stützwerte zur stückweisen Linearisierung eines Pumpenkennfelds.

des Punkts auf der Referenzkennlinie in Richtung steigender Drehzahl untereinander verbunden. Die entstehenden konvexen Vierecke werden noch durch Trennung entlang der Diagonalen von links unten nach rechts oben in Dreiecke aufgeteilt. Das entstehende Gitter hat gegenüber einem kartesischen den Vorteil, dass kein Simplex außerhalb des Betriebsbereichs der Pumpe liegt und darüber hinaus die Verteilung der Stützstellen bei stärkerer Krümmung der Kennlinie enger ist.

Die so systematisierte Erstellung der Linearisierungsgitter bringt Einschränkungen für die verwendete Linearisierungsmethode mit: Das erstellte Gitter erfüllt nicht mehr alle Anforderungen der logarithmischen Formulierungen, denn diese erfordern Gitter mit den Eigenschaften der „Union Jack“-Triangulierung. Das hier erstellte uniforme Gitter hat die benötigten Eigenschaften nicht. Auf die Anwendung der inkrementellen Formulierung wird ebenfalls verzichtet, da diese eine besondere Sortierung der Polytope erfordert und damit erhöhten Modellierungsaufwand und Fehleranfälligkeit verursacht. Die Multiple-Choice-Formulierung sowie die beiden nicht logarithmischen Konvexkombinationen haben keinerlei spezielle Anforderungen an die Form des Gitters, die Anzahl oder Werte der Stützpunkte oder die Sortierung der Polytope sodass diese beiden in Frage kommen. Die Wahl fällt auf die aggregierte Konvexkombination¹⁵, da diese für jeden Stützpunkt nur eine Variable als Stützstellengewicht verwendet und die Formulierung deshalb besonders anschaulich ist¹⁶. Die Überprüfung des Ergebnisses wird dadurch vereinfacht.

Nichtlineare Kennfeldmodellierung

Zur Erstellung eines nichtlinearen Kennfeldmodells eignet sich der Fit eines Polynoms durch die vom Hersteller angegebenen Messpunkte (Abbildung 3.4). Da die Drehzahl für alle Messpunkte konstant bei $n = n_{\text{ref}}$ ist, können die Messpunkte in Form von jeweils einer Funktionen in der $Q - H - Ebene$ und der $Q - P - Ebene$ abgebildet werden. Die allgemeine Darstellung der Kennlinien bei Referenzdrehzahl n_{ref} als Fit m-ter Ordnung lautet:

¹⁵VIELMA, AHMED UND NEMHAUSER, „Mixed-integer models for nonseparable piecewise-linear optimization: unifying framework and extensions“, ([82], 2010)

¹⁶Für die Anwendung der Beschreibungen von Vielma auf technische Problemstellungen ist zu beachten, dass in Vielmas Beispielen der Funktionswert der zu linearisierenden Funktion minimiert wird. Vielma nutzt deshalb eine größer-gleich-Bedingung zur Berechnung des Funktionswerts, die in der technischen Anwendung durch eine ist-gleich-Bedingung ersetzt wird.

$$H(Q, n_{\text{ref}}) = \sum_{j=0}^m b_{\text{H},j} (Q(n_{\text{ref}}))^j. \quad (3.23)$$

$$P(Q, n_{\text{ref}}) = \sum_{j=0}^m b_{\text{P},j} (Q(n_{\text{ref}}))^j. \quad (3.24)$$

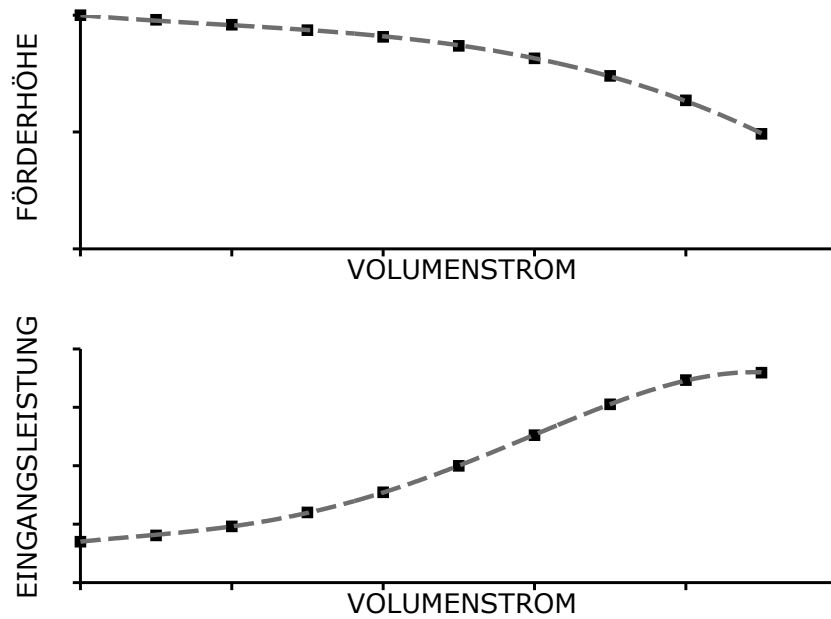


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines polynomiellen Fit der Messpunkte einer Kennlinie.

Für jeden Punkt der Referenzkennlinie und damit für jeden Punkt auf der Funktion des Fits sind die Skalierungsgesetze 3.19, 3.20 und 3.22 gültig. Die Gleichungen werden in die Fitfunktion eingesetzt, sodass bivariate Funktionen für die Änderung der Förderhöhe und Eingangsleistung in Abhängigkeit von Volumenstrom und Drehzahl entstehen:

$$H(Q, n) = \sum_{j=0}^m \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^{2-j} b_{\text{H},j} Q^j \quad (3.25)$$

und

$$P(Q, n) = \left(\sum_{j=0}^m \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^{3-j} b_{\text{P},j} Q^j \right) \frac{1 - (1 - \eta_{\text{opt}}) \left(\frac{n}{n_{\text{ref}}} \right)^{-0.1}}{\eta_{\text{opt}}}. \quad (3.26)$$

Die nichtlineare Skalierung der Drehzahlen bildet direkt die physikalischen Gesetze ab, während die stückweise Linearisierung diese nur modelliert. Die Abbildung der Referenzkennlinie als lineare Interpolation oder Fit ist in beiden Fällen eine empirische Modellierung der Wirklichkeit.

3.6 Modellvereinfachungen für reine Parallelschaltungen

Dem aktuellen Stand der Technik folgend bestehen Druckerhöhungsanlagen aus einer Anzahl parallel geschalteter Pumpen mit einem Ein- und einem Ausgang. Das bedeutet natürlich auch, dass alle Pumpenkanten parallel zueinander sind. Das System hat jeweils eine Quelle und eine Senke. Im Graphen existiert kein Knoten, der mehr als zwei angeschlossene Kanten hat und für den gleichzeitig die Kontinuitätsgleichung gilt.

Für den Graphen gilt stets:

1. Die Summe aller Volumenströme über alle Pumpenkanten ist gleich dem Gesamtvolumenstrom der Anlage.
2. Die Druckerhöhung jeder einzelnen Pumpenkante ist gleich der Druckerhöhung der Anlage.

Darüber hinaus zeigen Groß et. al.¹⁷ analytisch, dass baugleiche Pumpen in Parallelschaltung immer mit derselben Drehzahl laufen müssen, um die Eingangsleistung des Systems zu minimieren.

Die Nutzung dieser Bedingungen ermöglicht die vereinfachte Modellierung der allgemeinen Optimierungsaufgabe: Der Graph wird um Quelle, Senke und alle Verbindungskanten reduziert, sodass nur noch die Pumpenkanten übrig bleiben. Ein- und Ausgangsknoten einer jeden Pumpe fungieren als Quelle und Senke dieser Kante. Aus der Anforderung für den Quellen- und den Senkendruck ergibt sich direkt die Anforderung für die Förderhöhe $H_{\text{last},t}$ der Pumpen:

$$\forall s \in V_s, \forall q \in V_q, \forall t \in T : \frac{p_{\text{last},s,t} - p_{\text{last},q,t}}{\rho g} = H_{\text{last},t} \quad (3.27)$$

Der erforderliche Förderstrom der Anlage wird nicht mehr als Volumenstrom zur Senke, sondern als Volumenstromsumme über alle Pumpenkanten formuliert.

¹⁷GROSS, PÖTTGEN UND PELZ, „An Analytical Approach for the Optimal Operation of Pumps in Booster Systems“, ([24], 2017)

$$\forall t \in T : \sum_{(i,k) \in E} Q_{i,k,t} = Q_{\text{last},t}. \quad (3.28)$$

Im nichtlinearen Programm wird der Umstand, dass baugleiche Pumpen für minimalen Gesamtenergiebedarf mit gleicher Drehzahl laufen, für eine weitere Vereinfachung genutzt: Parallele Kanten baugleicher Pumpen können zu einer Kante zusammengefasst werden. Mit ganzzahligen, positiven Variablen y wird die Förderung von einem ganzzahligen Vielfachen des Volumenstroms der Einzelpumpe modelliert:

$$\forall t \in T : \sum_{(i,k) \in E} y_{i,k,t} Q_{i,k,t} = Q_{\text{last},t}. \quad (3.29)$$

Für die Berechnung der Investitionskosten wird mittels der Nebenbedingung

$$\forall (i, k) \in E, \forall t \in T : w_{i,k} \geq y_{i,k,t} \quad (3.30)$$

dann die maximale Anzahl benutzter Pumpen in einem Lastszenario $w_{i,k}$ bestimmt, die der Anzahl zu kaufender Pumpen entspricht. Die Zielfunktion für die Minimierung der Summe aus Investitions- und Energiekosten lautet dann

$$\min \sum_{(i,k) \in E} w_{i,k} K_{I,i,k} + dK_E \sum_{t \in T} \left(e_t \sum_{(i,k) \in E_P} y_{i,k,t} P_{i,k,t} \right). \quad (3.31)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Nullförderhöhe jeder Einzelpumpe der Parallelschaltung größer ist als die erforderliche Druckerhöhung kann mit dieser Zielformulierung auf die binäre Variable zur Deaktivierung der Pumpe verzichtet werden. Im Optimierungsprogramm wird dann ein Betriebspunkt für die Pumpe berechnet, für den Fall $y_{i,k} = 0$ trägt die Pumpe aber nicht zur Funktionserfüllung bei und die berechnete Eingangsleistung geht nicht in den Zielfunktionswert ein. Alle Pumpen dieses Typs sind automatisch deaktiviert.

Kapitel 4

Anwendung

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3 beschriebenen Modellierungssystematik für Fluidsysteme auf Druckerhöhungsanlagen angewandt. Anhand von Untersuchungen von Minimalsystemen wird das Zusammenspiel zwischen physikalischem Modell, Optimierungsprogramm und Lösungssoftware evaluiert. Darauf aufbauend werden Steuerung von Topologie von Praxisanwendungen optimiert. Hierfür steht ein Datenkatalog mit 226 Pumpen zur Verfügung (Anhang A). Die Nennvolumenströme der Pumpen reichen von $2 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $125 \text{ m}^3/\text{h}$, die maximale Förderhöhe beträgt etwa 240 mWS. Die in diesem Kapitel behandelten Problemstellungen umfassen:

- Minimalsysteme mit einer und zwei Pumpen
- Energetisch optimale Steuerung von Druckerhöhungsanlagen
- Optimierung der Energie- und Anschaffungskosten einer Druckerhöhungsanlage
- Berechnung des Energy-Efficiency-Index einer Druckerhöhungsanlage mittels diskreter Optimierung und Vergleich des Ergebnisses mit dem Experiment

Für alle Optimierungsprobleme werden gemäß der TOR-Methode „Funktion“, „Ziel“ und „Spielfeld“ beschrieben. Die Übersetzung der Beschreibung in ein „Optimierungsprogramm“ erfolgt gemäß der in Kapitel 3 beschriebenen Systematik. Die Lösung des Optimierungsprogramms erfordert eine ingenieurwissenschaftliche Interpretation zur Projektion des „Optimierungsergebnisses“ auf die reale Anwendung. Im Anschluss erfolgt statt der Neuplanung die Bewertung einer als Prüfstand ausgeführten Anlage anhand des Energy Efficiency Index durch den Einsatz von Optimierungsmethoden.

Die effiziente Nutzung von Berechnungsressourcen ist nicht Hauptgegenstand der vorliegenden Untersuchung, darf aber bei keiner Berechnungsarbeit außer Acht gelassen werden. Alle Berechnungen wurden auf einer Workstation durchgeführt, Anhang C gibt einen Überblick über die verwendete Hard- und Software. Die angegebenen Rechenzeiten dienen nicht als Benchmark für die Qualität eines Solvers oder Algorithmus, sondern helfen dem Leser, eine Einschätzung zum notwendigen Rechenaufwand bei der Reproduktion der Ergebnisse zu gewinnen. In den Vorüberlegungen zur notwendigen Diskretisierungsgenauigkeit sowie für die maximale Systemgröße spielt die Rechenzeit aber sehr wohl eine Rolle, da die gezeigten Beispiele reproduzierbar und deshalb in vertretbarer Zeit rechenbar bleiben müssen. Darüber hinaus repräsentieren die gezeigten Rechenzeiten die Leistungsfähigkeit von heute verfügbarer Standardsoftware.

4.1 Minimalsysteme

In den ersten Beispielen werden die Steuerungen einzelner Maschinen und einfacher Verschaltungen energetisch optimiert, danach wird mit einem Optimierungsmodell eine Pumpe hinsichtlich eines Lastprofils ausgewählt. Innerhalb der Modelle existieren keine oder wenige Freiheitsgrade. Alle Minimalsysteme werden sowohl mit dem nichtlinearen als auch mit dem stückweise linearisierten Modell abgebildet. Gegenstand der Voruntersuchungen sind:

- Plausibilisierung der Optimierungsmodelle.
- Numerische Genauigkeit der Ergebnisse.

Zur Plausibilisierung der Optimierungsmodelle werden die optimalen Lösungen für Ein- und Zwei-Pumpen-Systeme jeweils mit einem stückweise linearisierten und einem nichtlinearen Optimierungsprogramm berechnet, verglichen und begutachtet. Die numerische Genauigkeit der Ergebnisse ist für das stückweise linearisierte Optimierungsprogramm von besonderem Interesse, da dieses alle nichtlinearen Gleichungen nur nachbildet. Die notwendige Diskretisierung der stückweisen Linearisierung sowie die Quantifizierung der Ergebnisgenauigkeit sind notwendige Voraussetzungen für die Anwendung des Ergebnisses auf reale Probleme.

4.1.1 Betrieb einer drehzahlregelbaren Pumpe

Der Betrieb einer drehzahlregelbaren Pumpe in einem Lastpunkt ist ein Zulässigkeitsproblem. Für gegebenen Volumenstrom und gegebene Förderhöhe

existiert nur eine mögliche Drehzahl. Der Energieverbrauch der Maschine steht damit ebenfalls fest, das System hat keinen Freiheitsgrad, das Optimierungsproblem degeneriert zu einem Zulässigkeitsproblem

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Der Lastpunkt der Pumpe wird mit Förderhöhe

$$H_{\text{last}} = 90 \text{ mWS}$$

und Volumenstrom

$$Q_{\text{last}} = 3.25 \text{ m}^3/\text{h}$$

angegeben.

Ziel. Die Formulierung einer Zielfunktion ist nicht notwendig, da das System keinen Freiheitsgrad besitzt. Da in den meisten Fällen die Optimierungssoftware aber ohne explizite Angabe einer Zielfunktion nicht mit der Rechnung beginnt, wird die Minimierung der gesamten Eingangsleistung

$$\min \sum_{(i,k) \in E_P} P_{i,k}. \quad (4.1)$$

vorgegeben.

Spielfeld. Das Spielfeld der Optimierung besteht aus einer Pumpe der Bauart 'Typ34'¹. Das Kennfeld der Pumpe ist bekannt und die Referenzkennlinie in Tabelle A.5 angegeben.

Nichtlineares Optimierungsmodell. Die Ein-Pumpen-Anlage wird nicht-linear modelliert. Die gültigen Gleichungen werden für den angegebenen Fall parametrisiert. Der gesamte Graph besteht aus lediglich einer Kante zur Abbildung der Pumpe. Die Referenzkennlinie der Pumpe wird mit zwei Polynomen modelliert. Zur Modellierung der Fördercharakteristik (Gleichung 3.25) wird der Fit-Grad $m_H = 3$, zur Modellierung der Leistungscharakteristik (Gleichung 3.26) wird $m_P = 4$ gewählt und jeweils der Ordinatenabschnitt mit Messwerten für den Betriebspunkt der Nullförderhöhe festgesetzt. Für die anderen Parameter wird ein Fit mithilfe der kleinste-Quadrate-Methode² durchgeführt. Tabelle A.5 gibt das Ergebnis dieses Fits an. Aus der Referenzkennlinie entsteht dann durch Anwendung der Skalierungsgleichungen das Kennfeld.

Optimierungsergebnis des nichtlinearen Programms. Das Optimierungsprogramm wird zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems verwendet und gibt als Lösung die Drehzahl $n = 91.73 \text{ min}^{-1}$ und eine Ein-

¹ Die Auswahl dieses Typs ist zufällig.

² MATLAB, *version 8.3.0.532 (R2014a)*, ([45], 2014)

gangsleistung von $P = 1.336 \text{ kW}$ aus. Aufgrund der geringen Modellgröße und der nicht vorhandenen Freiheitsgrade beträgt die Rechenzeit lediglich 0.078 s .

Stückweise linearisiertes Optimierungsmodell. Zum Vergleich wird ein stückweise linearisiertes Optimierungsmodell implementiert. Die stückweise Linearisierung ist nur für das Kennfeld der Pumpe notwendig, alle anderen Gleichungen sind linear. Während die Diskretisierung der Referenzkennlinie durch die Anzahl der Messpunkte vorgegeben ist, ist die Anzahl der Stützpunkte für die Linearisierung der Skalierung zunächst offen. Um einen ersten Eindruck vom Einfluss der Diskretisierung auf das Ergebnis zu bekommen werden Rechnungen für $c = \{6, 11, 21, 51, 101\}$ Stützstellen der Drehzahl durchgeführt.

Optimierungsergebnis des stückweise linearisierten Programms. Die Lösungen und Lösungszeiten des linearen Optimierungsprogramms sind in Tabelle 4.1 angegeben. Jede der Lösungen weicht in den numerischen Werten von der nichtlinearen Lösung ab. Für den betrachteten Betriebspunkt scheinen die Abweichungen für alle Genauigkeiten klein, ein Rückschluss auf andere Betriebspunkte ist aber nicht möglich. Die Rechenzeit steigt erwartungsgemäß mit der Anzahl der Drehzahlstützstellen und damit mit der Anzahl der Variablen an.

Tabelle 4.1: Optimale Lösungen des stückweise linearisierten Optimierungsmodells für die Bestimmung des Betriebspunkts einer Pumpe abhängig von der Anzahl der verwendeten Drehzahlstützstellen im Vergleich mit den Lösungen des nichtlinearen Modells.

Drehzahlstützstellen	Drehzahl in min^{-1}	Eingangsleistung in kW	Rechenzeit in s
nichtlinear	91.73	1.336	0.078
6	91.45	1.369	<0.001
11	91.76	1.340	<0.001
21	91.79	1.338	0.031
51	91.79	1.335	0.406
101	91.79	1.335	1.5

Der Vergleich des nichtlinearen Programms mit den stückweise linearisierten Darstellungen erlaubt die erste Plausibilierung beider Modelle. Die Ergebnisse sind sehr ähnlich, die Abweichungen voneinander durch die numerisch verschiedenen Eingangsdaten begründet. Detaillierte Untersuchungen zum notwendigen Inkrement der Drehzahl zur Linearisierung und dessen Einfluss auf die Genauigkeit des Optimierungsergebnisses sind notwendig.

Diskretisierung des Kennfelds. Die Ableitung der notwendigen Linearisierungsgenauigkeit kann nur durch Vergleich des stückweise linearisierten Programms mit dem nichtlinearen Programm erfolgen. Dies ist darin begründet, dass die einzigen verfügbaren experimentellen Daten die Messdaten des Herstellers für die Referenzkennlinie sind und diese vollständig als Eingangsdaten dienen.

Die Optimierungsechnung aus Kapitel 4.1.1 wird für 120 Lastpunkte durchgeführt. Als Sollvorgaben dienen die zwölf Werte für die Förderhöhe

$$H_{\text{last}} = \{10, 20, 30, \dots, 120\} \text{mWS}$$

und zehn Werte für den Volumenstrom

$$Q_{\text{last}} = \{0.65, 1.3, 1.95, \dots, 6.5\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}.$$

Für jeweils 78 der 120 Lastpunkte existiert eine Lösung für beide Optimierungsprogramme, die übrigen 42 liegen außerhalb des Betriebsbereichs der Pumpe. Für alle zulässigen Betriebspunkte werden die Lösungen weiter ausgewertet: Als Maß für die Übereinstimmung der Lösungen dient die relative quadratische Abweichung r der Zielfunktionswerte des linearen $P_{\text{tot,lin}}$ und nichtlinearen $P_{\text{tot,nlin}}$ Programms sowie die quadratische Abweichung der Drehzahleinstellung voneinander:

$$r_{\text{P}} = \left(\frac{P_{\text{tot,lin}} - P_{\text{tot,nlin}}}{P_{\text{tot,nlin}}} \right)^2. \quad (4.2)$$

$$r_{\text{n}} = \left(\frac{n_{\text{lin}} - n_{\text{nlin}}}{n_{\text{nlin}}} \right)^2. \quad (4.3)$$

Tabelle 4.2 zeigt die Mittel- und Maximalwerte der Abweichungen von nicht-linearem und stückweise linearisiertem Programm für alle Betriebspunkte und die jeweilige Diskretisierungsgenauigkeit. Die Maximalwerte liegen immer in den Randbereichen des Kennfelds. Bis zu einer Diskretisierungsgenauigkeit von 21 Stützstellen liegt die summierte Rechenzeit der stückweise linearisierten Programme unter der des nichtlinearen Programms (7.392 s), während sich die Abweichung bei weiterer Erhöhung der Genauigkeit nicht mehr deutlich verkleinert. Die Implikation von 21 Stützstellen als ausreichende Diskretisierungsgenauigkeit des Pumpenkennfelds wird festgehalten.

4.1.2 Stückweise Linearisierung aller Kennfelder

Ein Katalog aus 226 unterschiedlichen Pumpen wird als Baukasten verwendet. Für Topologieentscheidungen mit vielen Freiheitsgraden in Form diskre-

Tabelle 4.2: Relative quadratische Abweichung der Berechnungsergebnisse des nichtlinearen und stückweise linearisierten Programms voneinander, abhängig von der Anzahl der verwendeten Drehzahlstützstellen mit Angabe der summierten Rechenzeit.

	Eingangsleistung		Drehzahl		Zeit
	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	
6	4.220×10^{-2}	3.500×10^{-4}	1.033×10^{-3}	3.062×10^{-5}	0.375 s
11	9.242×10^{-3}	6.914×10^{-5}	7.733×10^{-5}	1.701×10^{-6}	0.594 s
21	1.270×10^{-3}	2.619×10^{-5}	5.794×10^{-6}	9.626×10^{-7}	1.924 s
51	1.173×10^{-3}	2.051×10^{-5}	6.198×10^{-6}	1.119×10^{-6}	25.563 s
101	9.874×10^{-4}	1.778×10^{-5}	6.361×10^{-6}	1.117×10^{-6}	93.828 s

ter Entscheidungen versprechen linearisierte Optimierungsprogramme deutliche Laufzeitvorteile. Für den gesamten Baukasten wird untersucht, ob zur Linearisierung der Pumpenkennfelder 21 Drehzahlstützstellen ausreichend sind. Dazu werden die beiden vorgestellten Modellierungen der Pumpenkennfelder (vergleiche Kapitel 3.5) miteinander verglichen, indem für gegebenen Volumenstrom und gegebene Drehzahl jeweils die aus der Modellierung resultierende Förderhöhe und Eingangsleistung berechnet wird.

Als Referenzwert der Übereinstimmung von exakter nichtlinearer Skalierung der Pumpenkennfelder und stückweiser Linearisierung dient die Übereinstimmung von Fit und linearer Interpolation der Referenzkennlinien. Für die Referenzdrehzahl $n = n_{\text{ref}}$ wird die Übereinstimmung von Linearisierung und Fit eines Polynome 3-ten Grades für die Förderhöhencharakteristiken sowie eines Polynoms 4-ten Grades für die Leistungscharakteristiken aller Pumpen numerisch berechnet und die quadratische Abweichung festgehalten. Die Anzahl der Abtaststellen entlang der Kennlinien wird dabei sukzessive erhöht. Tabelle 4.3 zeigt das Ergebnis. Der Mittelwert ist dabei das arithmetische Mittel über alle Abtastpunkte und Kennlinien, das Maximum der größte auftretende Wert für den gesamten Baukasten.

Für jede Pumpe des Baukastens wird über das Linearisierungsgitter ein in der $Q - n - Ebene$ liegendes kartesisches Gitter aus 1000 Abtastpunkten gelegt und die zugehörigen Werte für Förderhöhe und Eingangsleistung mit einem nichtlinearen sowie einem linearisierten Optimierungsprogramm bestimmt. Abbildung 4.1 stellt die Lage der Punkte zueinander schematisch dar. Für alle Kennfelder werde die Mittelwerte der quadratischen Abweichungen zwischen den Ergebnissen ausgewertet und in Tabelle 4.4 aufgetragen. Die Maxima der Abweichungen treten hier für alle Pumpen bei der Kombination kleinster Drehzahl und kleinstem Volumenstrom, also am linken unteren

Tabelle 4.3: Relative quadratische Abweichung der stückweise linearisierten Referenzkennlinie vom polynomiellen Fit in Abhängigkeit der Anzahl der Abtastpunkte für alle Pumpen des Baukastens.

Abtastpunkte	Förderhöhe		Eingangsleistung	
	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
20	2.874×10^{-3}	2.097×10^{-5}	8.430×10^{-3}	9.940×10^{-5}
50	2.875×10^{-3}	2.103×10^{-5}	8.452×10^{-3}	1.028×10^{-4}
100	2.875×10^{-3}	2.113×10^{-5}	8.448×10^{-3}	1.038×10^{-4}
1000	2.875×10^{-3}	2.121×10^{-5}	8.453×10^{-3}	1.048×10^{-4}

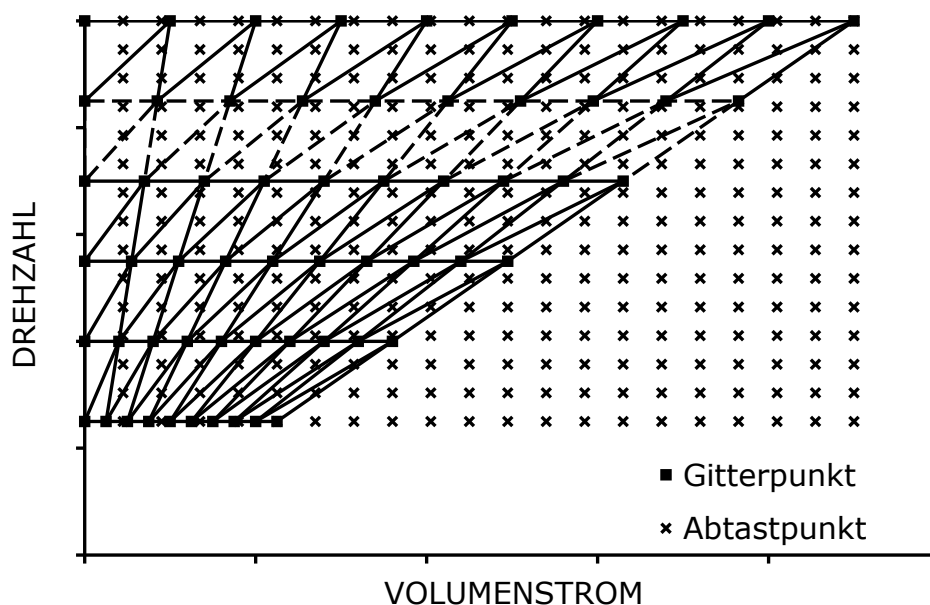


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Linearisierungsstützstellen und der Abtastpunkte zur Überprüfung der Linearisierungsgüte.

Tabelle 4.4: Relative quadratische Abweichung der Förderhöhe und Eingangsleistung für die Abtastpunkte in allen stückweise linearisierten bzw. polynomiell skalierten Kennfeldern voneinander.

Förderhöhe		Eingangsleistung	
Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
2.879×10^{-5}	2.997×10^{-4}	0.013	0.146

Rand des Kennfelds, auf. Abseits der Ränder des Kennfelds, im hauptsächlichen Betriebsbereich der Pumpe, sind die Abweichungen erheblich kleiner. Die Diskretisierung ist ausreichend genau.

4.1.3 Förderung mit zwei unterschiedlichen Pumpen

Die Förderung mit zwei Pumpen ist ein Optimierungsproblem mit diskreten und kontinuierlichen Freiheitsgraden. Die Topologie der Förderanlage steht als Parallelschaltung fest, die Freiheitsgrade sind durch die Steuerung der Anlage gegeben: Der Betrieb von nur einer oder von beiden Pumpen ist möglich. Im Fall des Betriebs beider Pumpen existiert mit dem Verhältnis der Drehzahlen ein weiterer Freiheitsgrad. Für das zulässige Kennfeld der Parallelschaltung werden die Steuerungseinstellungen optimal bestimmt.

Der Vergleich vom nichtlinearem mit dem stückweise linearisierten Optimierungsprogramm prüft, ob diese Freiheitsgrade in den Optimierungsprogrammen abgebildet werden. Der Einfluss des Linearisierungsfehlers auf das Optimierungsergebnis wird untersucht.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Das Kennfeld wird anhand von diskreten Punkten abgebildet. Für alle Kombinationen aus den Werten der Förderhöhe

$$H_{\text{last}} = \{5, 10, 15, \dots, 120\} \text{mWS}$$

und des Volumenstroms

$$Q_{\text{last}} = \{0.5, 1, 1.5, \dots, 9\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$$

wird der Betrieb der Anlage für den jeweiligen Lastpunkt optimiert.

Ziel. Das Ziel der Optimierung ist in jedem Betriebspunkt die Minimierung der gesamten Eingangsleistung.

Spielfeld. Das Spielfeld der Optimierung besteht aus einer Pumpe mit kleinerer Nennleistung ('Typ14') und einer Pumpe mit größerer Nennleistung ('Typ34'). Die Parallelschaltung ist vorgegeben, die Steuerung ist freigegeben.

Optimierungsprogramme. Für dieses Steuerungsproblem werden für jeden Lastpunkt zwei Optimierungsprogramme (nichtlinear und stückweise linearisiert) erstellt. Die in Kapitel 3.6 beschriebenen Vereinfachungen für Druckerhöhungsanlagen werden alle angewandt.

Optimierungsergebnis. Für 311 der 432 Lastpunkte existiert mindestens eine zulässige Lösung. Für alle diese Lastpunkte wird das Programm optimal gelöst, alle anderen sind mit dem gegebenen System nicht erfüllbar. Das Ergebnis zeigt, dass die jeweiligen Solver lastfallabhängig die Entscheidung

für eine Kombination aktiver Pumpen treffen (Abbildung 4.2). In der Nähe der Ordinate liegt der Bereich, in dem die Pumpe mit kleinerer Nennleistung ('Typ14') eingeschaltet wird. Dieser Bereich ist umgeben vom Betriebsbereich der Pumpe mit größerer Nennleistung ('Typ34'), die Pumpe 'Typ14' wird für steigende Volumenströme bei gleicher Förderhöhe also zunächst ein- und dann zugunsten der Pumpe 'Typ34' wieder ausgeschaltet. Im Bereich großer Volumenströme sind beide Pumpen in Betrieb.

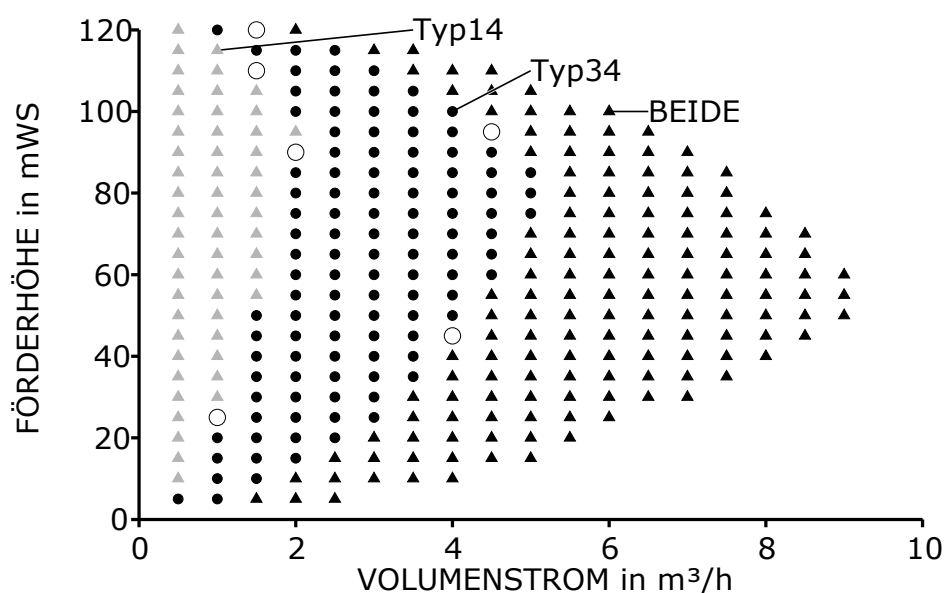


Abbildung 4.2: Vergleich der diskreten Entscheidung für den Betrieb der beiden Pumpen 'Typ14' und 'Typ34'. Leere Kreise zeigen Unterschiede zwischen nichtlinearem und stückweise-linearisiertem Optimierungsprogramm.

In den meisten Fällen ist die getroffene diskrete Entscheidung für den Typ der Pumpe identisch. Abbildung 4.2 zeigt, dass an sechs der 432 untersuchten Lastpunkte die diskrete Schaltentscheidung von den verschiedenen Optimierungsprogrammen unterschiedlich getroffen wird.

Tabelle 4.5 zeigt diese Unterschiede im Detail: Für kleine Förderhöhen liegen die Zielfunktionswerte der Optimierungsrechnungen nahe beieinander. Je nach Modellierung ergibt sich für die eine oder andere Entscheidung ein minimal besserer Zielfunktionswert. Für große Förderhöhen unterscheiden sich die Zielfunktionswerte deutlich: Der untersuchte Betriebspunkt liegt am Rand des zulässigen Funktionsbereichs einer Einzelpumpe. Die nichtlineare Beschreibung der Referenzkennlinie der Förderhöhe schließt diese Betriebspunkte gerade noch ein, die stückweise linearisierte Formulierung nicht mehr, der Wechsel zu einer Anlagenkonfiguration mit größerer Eingangsleistung wird

zur Funktionserfüllung notwendig. Aus Sicht der Anwendung betrachtet ist die diskrete Entscheidung für Punkte in den Randgebieten aufgrund der Regelhysterese ohnehin unerheblich.

Tabelle 4.5: Vergleich der Betriebspunkte, für die im stückweise linearisierten und nichtlinearen Optimierungsprogramm unterschiedliche Entscheidungen für den Betrieb der Pumpen getroffen wurden.

Betriebspunkt		Pumpenauswahl		Zielfunktionswert	
in mWS	und m ³ /h	nichtlinear	linearisiert	nichtlinear in kW	linearisiert in kW
25	1	Typ34	Typ14	0.1350	0.1362
45	4	Typ34	beide	0.8623	0.8644
90	2	Typ34	Typ14	0.9153	0.9202
95	4.5	Typ34	beide	1.95	2.0705
110	1.5	Typ14	Typ34	0.8761	0.9658
120	1.5	Typ34	beide	1.062	1.4809

Für den Betrieb beider Pumpen sind die Drehzahlen der Pumpen frei einstellbar, sofern die Funktionserfüllung gewährleistet bleibt. Abbildung 4.3 zeigt den Vergleich der Optimierungsergebnisse für die Drehzahl über dem Volumenstrom bei einer konstanten Förderhöhe von 60 mWS. Von links nach rechts steigt die Drehzahl der Pumpe 'Typ14' jeweils progressiv an, bevor deutlich vor Erreichen der Maximaldrehzahl diese Pumpe ausgeschaltet und die Pumpe 'Typ34' eingeschaltet wird. Ebenfalls deutlich vor Erreichen der Maximaldrehzahl dieser Maschine wird die kleine Pumpe wieder zugeschaltet. Ab hier werden die Unterschiede in den Ergebnissen deutlich: Im linearisierten Programm ist der Anstieg der Drehzahlen unregelmäßiger als im nichtlinearen Programm, wobei der Zielfunktionswert ähnlich bleibt.

4.1.4 Drehzahlgleichheit zweier baugleichen Pumpen

Für den Betrieb gleicher Pumpen gilt die energetisch optimale und regelungstechnisch einfache Lösung: Der Betrieb der Pumpen mit gleicher Drehzahl. Wie gut dieser analytisch bewiesene Zusammenhang³ trotz des Linearisierungsfehlers abgebildet werden kann, ist aufgrund der Ergebnisse aus 4.1.3 offen. Die Vorgabe kann als Nebenbedingung im Optimierungsprogramm integriert werden. Obwohl nicht damit zu rechnen ist, dass die Werte der Ein-

³ GROSS, PÖTTGEN UND PELZ, „An Analytical Approach for the Optimal Operation of Pumps in Booster Systems“, ([24], 2017)

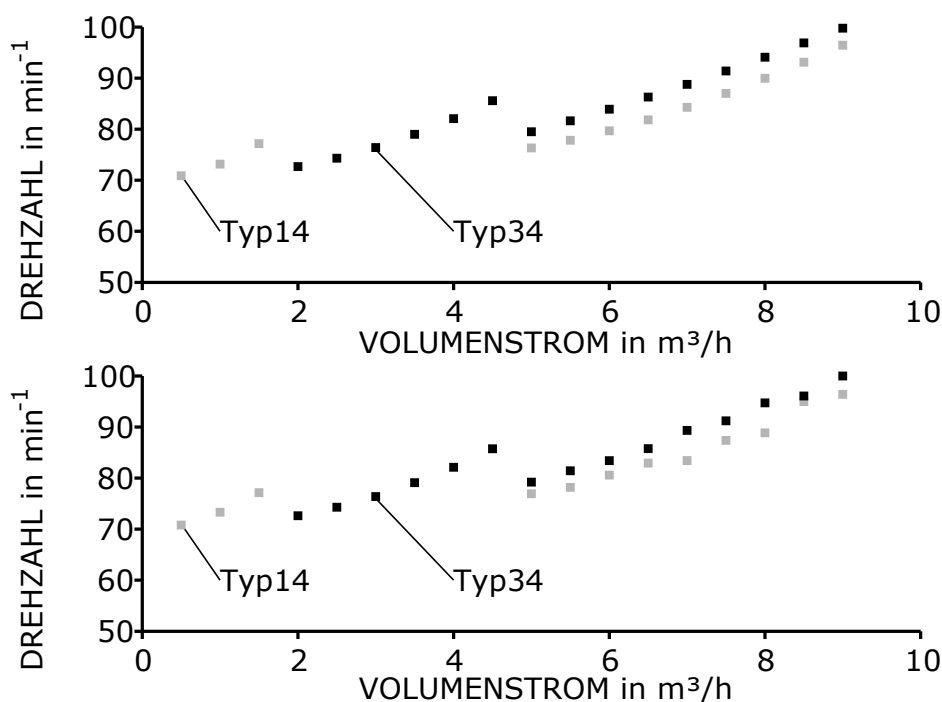


Abbildung 4.3: Optimierungsergebnis der Drehzahleinstellungen der Pumpen. Oben: Nichtlineares Optimierungsprogramm; unten: Stückweise linearisiertes Programm.

gangsleistung des Systems ohne diese Nebenbedingung stark verändert würden, wird gegebenenfalls die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität vereinfacht.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Für alle Kombinationen aus den Werten der Förderhöhe

$$H_{\text{last}} = \{5, 10, \dots, 120\} \text{mWS}$$

und des Volumenstroms

$$Q_{\text{last}} = \{0.65, 1.3, 1.95, \dots, 13\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$$

wird der Betrieb der Anlage für einen Lastpunkt optimiert.

Ziel. Das Ziel der Optimierung ist in jedem Betriebspunkt die Minimierung der gesamten Eingangsleistung.

Spielfeld. Das Spielfeld der Optimierung besteht aus zwei Pumpen der Bauart 'Typ34'. Die Parallelschaltung ist vorgegeben, die Steuerung des Betriebs und der Drehzahl ist freigegeben.

Optimierungsprogramm. Für dieses Steuerungsproblem werden zwei linearisierte Optimierungsprogramme erstellt. Die in Kapitel 3.6 beschriebenen Vereinfachungen für Druckerhöhungsanlagen werden angewandt. Die beiden Optimierungsprogramme unterscheiden sich nur durch eine Bedingung für die Drehzahlgleichheit baugleicher Pumpen, die im ersten Fall deaktiviert, im zweiten Fall aktiviert ist. Das Problem wird durch die aktivierte Bedingung um einen Freiheitsgrad reduziert. Mit dem Vergleich werden signifikante Unterschiede im Lösungsverhalten des Optimierungsprogramms aufgezeigt.

Optimierungsergebnis. Der Solver trifft lastfallabhängig die Entscheidung für eine oder zwei aktive Pumpen. Die Entscheidung, welche Kante aktiviert wird – oder physikalisch: welche Instanz des Pumpentyps eingeschaltet wird – ist nicht vorhersehbar. Die jeweiligen Entscheidungen führen zu redundanten Ergebnissen. Ausschlaggebend für die Nutzung des Ergebnisses ist die Anzahl der eingeschalteten Pumpen, nicht welche Instanz des Pumpentyps eingeschaltet wurde. Die Anzahl der aktiven Pumpen ist in allen Betriebspunkten für beide Optimierungsprogramme gleich (Abbildung 4.4). Die summierten Rechenzeiten für alle Betriebspunkte mit zulässiger Lösung unterscheiden sich mit 49.02s (mit zusätzlicher Nebenbedingung) und 54.80s (ohne) nur wenig.

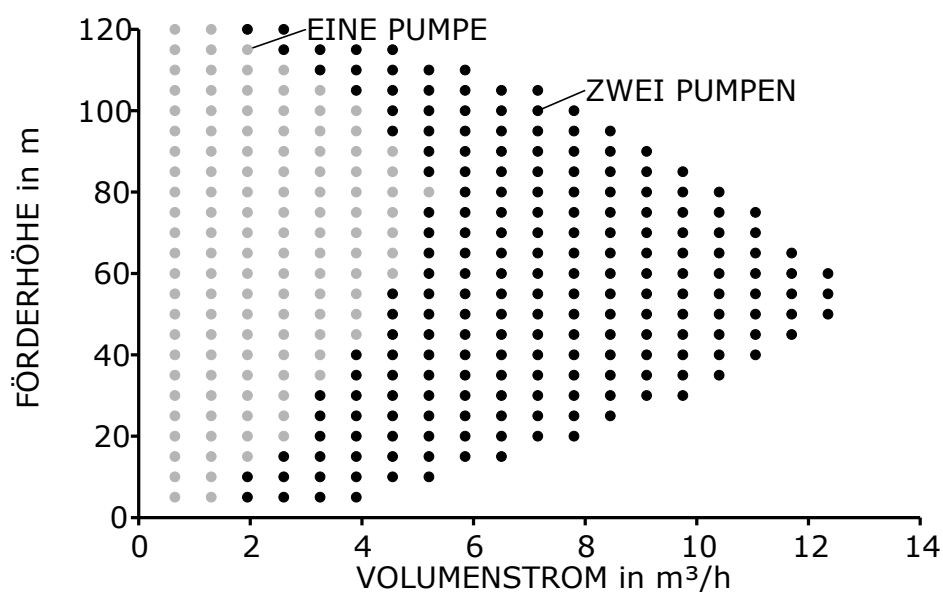


Abbildung 4.4: Ergebnis der Optimierung für die Förderung mit zwei baugleichen Pumpen. Grau: Eine Pumpe aktiv, schwarz: Zwei Pumpen aktiv

Die Ergebnisse beider Optimierungsprogramme zeigen darüber hinaus, dass die Drehzahlgleichheit für gleiche Pumpen nicht zwangsläufig vom Optimie-

rungsprogramm gefunden wird. Tabelle 4.6 zeigt am Beispiel des Betriebspunkts 75 mWS, 10.4 m³/h den Vergleich zweier Optimierungsergebnisse. Die Ergebnisse beider Programme weisen Abweichungen in den Zahlenwerten für Drehzahl und Eingangsleistung der Pumpen auf. Diese Abweichungen sind auf den Linearisierungsfehler zurückzuführen und führen in einigen Fällen zu verbesserten Zielfunktionswerten, was der analytischen Lösung aber widerspricht. Eine zusätzliche Nebenbedingung für die Drehzahlgleichheit baugleicher Pumpen verbessert die numerische Ergebnisqualität des Optimierungsprogramms.

Tabelle 4.6: Vergleich der Optimierungsergebnisse für den Betrieb zweier parallel geschalteter, baugleicher Pumpen am Beispiel des Betriebspunkts 75 mWS, 10.4 m³/h.

	Eingangsleistung in kW	Drehzahlen in min ⁻¹	
Ohne zusätzliche NB	3.702	95.25	99.07
Mit zusätzlicher NB	3.704	97.17	97.17

4.1.5 Kaufentscheidung für genau eine Pumpe

Die Auswahl von Pumpen aus einem Katalog ist ein Optimierungsproblem mit einander überlagerten Freiheitsgraden. Der Betrieb einer Pumpe ist nur möglich, wenn diese auch gekauft wird. Die entsprechenden Variablen sind gekoppelt, das Programm ist mehrstufig.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Die Lastprofile sind dem Profil zur Bewertung von Heizungspumpen nachempfunden, wobei das Lastprofil durch unterschiedliche Maximallastfälle variiert und so der Einfluss der Last auf die Auswahl untersucht wird. Die Zusammenstellung der Lastfälle ist in Tabelle 4.7 gegeben.

Ziel. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der zu erwartenden Summe aus Anschaffungs- und Energiekosten. Für die zu erwartenden Energiekosten wird ein Zeitraum von drei Jahren ununterbrochenen Betriebs bei einem Energiepreis von 0.2 €/kWh zugrunde gelegt.

Spielfeld. Aus dem vollständigen Katalog darf eine Pumpe eines beliebigen Typs ausgewählt werden. Diese Pumpe wird lastabhängig gesteuert, sodass jeder Lastfall erfüllt wird.

Optimierungsprogramme. Stückweise linearisierte und nichtlineare Modellierung werden für die Erstellung der jeweiligen Optimierungsprogramme

Tabelle 4.7: Lastprofile für die Auswahl einer Pumpe.

Lastprofil	Zeitanteil in %	Förderhöhe in mWS	Volumenstrom in m ³ /h
A (1)	44	37.5	7.5
A (2)	35	45	15
A (3)	15	52.5	22.5
A (4)	6	60	30
B (1)	44	37.5	25
B (2)	35	45	50
B (3)	15	52.5	75
B (4)	6	60	100
C (1)	44	75	7.5
C (2)	35	90	15
C (3)	15	105	22.5
C (4)	6	120	30
D (1)	44	75	25
D (2)	35	90	50
D (3)	15	105	75
D (4)	6	120	100

verwendet und die Ergebnisse später verglichen. Weil maximal eine Pumpe aus dem Baukasten ausgewählt werden darf, besteht für den Betrieb der ausgewählten Pumpe kein Freiheitsgrad mehr. Da eine Pumpe aber anhand ihrer Betriebseigenschaften bewertet wird, muss trotzdem die Betriebsstrategie berechnet werden.

Optimierungsergebnis. Die Ergebnisse der Rechnungen sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst dargestellt. Für drei Lastprofile wurde eine Pumpe aus dem Katalog ausgewählt, sodass die zu erwartende Summe aus Anschaffungs- und Betriebskosten minimal wird. Im vierten Lastprofil konnte nach der angegebenen Rechenzeit nachgewiesen werden, dass im gesamten Baukasten keine Pumpe existiert, mit der alle Lastfälle abgedeckt werden können. Für das lineare und das nichtlineare Modell ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Modellierung leichte Abweichungen in den Gesamtkosten. Diese liegen aber unter 1 % des Werts, sodass die Ergebnisse die Modelle gegeneinander plausibilisieren. Die mittels der unterschiedlichen Programme ausgewählte Pumpe ist jeweils dieselbe.

Für alle Lastprofile hat Lastfall (2) den größten Einfluss auf die Energiekosten (siehe Tabelle 4.9). Der Wirkungsgrad, mit dem die jeweils ausgewählte Pumpe diesen Lastfall bedient ist entsprechend hoch. Lastfall (1) hat auf-

Tabelle 4.8: Optimierungsergebnis für Auswahl der optimalen Pumpe für die Erfüllung eines Lastprofils mit Angabe des Zielfunktionswerts und der erforderlichen Berechnungszeit.

Profil	Pumpe	linearisiertes Modell		nichtlineares Modell	
		Gesamtkosten in €	Zeit in s	Gesamtkosten in €	Zeit in s
A	Typ137	16 519	437	16 458	186
B	Typ207	51 165	203	50 975	497
C	Typ149	31 265	143	31 129	249
D	keine		51		16

grund seiner geringen Anforderungen trotz der hohen Eintrittswahrscheinlichkeit geringere Energiekosten. Darüber hinaus muss die Pumpe so gewählt werden, dass sie alle Lastfälle bedienen kann. Die Drehzahl wird in Lastfall (1) also reduziert und entsprechend sinkt der Wirkungsgrad.

Tabelle 4.9: Einfluss der einzelnen Lastfälle auf das Optimierungsergebnis (nichtlineare Rechnung).

Lastprofil	Eingangsleistung in kW	Wirkungsgrad in %	Energiekosten in €
A (1)	1.415	54.15	3273
A (2)	2.628	69.99	4834
A (3)	4.363	73.78	3440
A (4)	6.710	73.10	2116
B (1)	4.104	62.26	9490
B (2)	7.867	77.93	14 473
B (3)	13.82	77.63	10 897
B (4)	22.56	72.47	7115
C (1)	2.783	55.07	6436
C (2)	5.182	70.99	9533
C (3)	8.633	74.58	6805
C (4)	13.34	73.53	4207

4.1.6 Zusammenfassung der Minimalsysteme

Nach Abschluss der Voruntersuchungen können folgende Ergebnisse für die Optimierung praxisrelevanter Problemstellungen festgehalten werden:

- Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen sind plausibel.
- Für die stückweise Linearisierung des Pumpenkennfelds wird die Drehzahl zwischen Minimal- und Maximalwert für alle Pumpen des Baukastens mit 21 Stützstellen in 20 Intervalle unterteilt.
- Ob die nichtlineare oder die stückweise linearisierte Modellierung schneller zu einem Optimierungsergebnis führt, wird mit den Minimalsystemen nicht eindeutig gezeigt. Für eine größere Anzahl diskreter Entscheidungen ist aber weiter zu erwarten, dass die stückweise Linearisierung zu effizienterer Ausnutzung der Rechenkapazität führt.
- Die diskrete Entscheidung für oder gegen den Kauf oder die Aktivierung einer Pumpen ist mit beiden Optimierungsmodellen zuverlässig möglich.
- Die exakte Bestimmung der Drehzahl einer Pumpe ist im stückweise linearisierten Modell vor allem im Teil- und Überlastbereich nicht zuverlässig möglich. Für Pumpen gleichen Typs in einer Parallelschaltung kann dies durch die Voraussetzung der Drehzahlgleichheit für alle aktiven Pumpen korrigiert werden. Die Drehzahl wird in der Anwendung ohnehin von einem Regler eingestellt, sodass eine exakte Prognose nicht notwendig ist. In allen anderen Fällen ist die nichtlineare Korrektur notwendig, wenn die Drehzahleinstellung für das weitere Vorgehen relevant ist.

4.2 Steuerung von Druckerhöhungsanlagen mit parallel geschalteten Pumpen

Druckerhöhungsanlagen mit mehreren Pumpen kommen immer dann zum Einsatz, wenn der geforderte Volumenstrom der Anlage starken Schwankungen unterworfen ist. Die Anlagen sind über einen breiten Betriebsbereich effizient. Die Einstellung des Betriebspunkts der Anlage geschieht durch eine Regelung, in der meist der Differenzdruck oder Ausgangsdruck als Sollwert verwendet wird. Zur Regelung des Betriebspunkts der Anlage stehen zwei Steuergrößen zur Verfügung: Die Anzahl der in Betrieb befindlichen Pumpen sowie die Drehzahl der Pumpen. In den meisten Betriebspunkten gibt es mehr als eine zulässige Kombination für die Drehzahl und die Anzahl der Pumpen, gewünscht ist die Kombination der Steuergrößen mit der niedrigsten Eingangsleistung. Während die Drehzahl der Pumpen kontinuierlich verändert wird, ist die Anzahl der eingeschalteten Pumpen immer ganzzahlig. Die

diskrete Optimierung unterstützt die Planung mit einer Steuerungsstrategie als Grundlage für den Regelungsentwurf.

4.2.1 Gleiche Pumpen

Der konventionelle Ansatz sieht die Parallelschaltung baugleicher Pumpen vor. Der Vorteil dieser Anlagen ist der Betrieb aller aktiven Pumpen mit gleicher Drehzahl.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Zur Erstellung der Steuerungsstrategie wird der Betrieb der Anlage in ihrem gesamten Kennfeld untersucht. Das Kennfeld wird zu diesem Zweck mit einzelnen Lastpunkten für die Förderhöhen

$$H_{\text{last}} = \{5, 10, \dots, 120\} \text{mWS}$$

und den Volumenströme

$$Q_{\text{last}} = \{1, 2, 3, \dots, 32\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$$

diskretisiert abgebildet.

Ziel. Die Zielfunktion ist die Minimierung der gesamten Eingangsleistung aller Pumpen der Druckerhöhungsanlage im jeweiligen Betriebspunkt.

Spielfeld. Das Spielfeld der Optimierung besteht aus den Steuerungsparametern von fünf Pumpen der Bauart 'Typ34'. Die Parallelschaltung der Pumpen ist als Nebenbedingung vorgegeben. Das Kennfeld der Pumpe ist bekannt und in Tabelle A.5 gegeben. Die Steuerung der Anlage ist freigegeben.

Optimierungsmodell. Zur Optimierung der Steuerung von Druckerhöhungsanlagen wird ein nichtlineares Optimierungsprogramm verwendet. Die einzige diskrete Variable im Optimierungsprogramm ist die Anzahl der aktiven Pumpen, daher ist auch im nichtlinearen Programm eine Rechenzeit in der Größenordnung einer Sekunde pro Betriebspunkt zu erwarten und nichtlineare Zulässigkeit gegeben. Für jeden Lastpunkt wird ein Optimierungsprogramm erstellt und gelöst.

Optimierungsergebnis. Für 540 der 768 Diskretisierungspunkte existiert eine Lösung. Für jeden untersuchten Punkt gibt die Lösung des Optimierungsprogramms die Anzahl der aktiven Pumpen und deren Drehzahl an. Von besonderem Interesse ist hier die diskrete Entscheidung für die Anzahl der aktiven Pumpen. Abbildung 4.5 zeigt das Optimierungsergebnis dieser Variable für alle untersuchten Lastpunkte. Das Ergebnis zeigt die Bereiche für den Betrieb von einer, zwei, drei, vier, oder fünf Pumpen. Diese Bereiche können mit jeweils zwei Linientypen voneinander getrennt werden: Für große

Förderhöhen werden die Bereiche von den Drosselkurven maximaler Drehzahl voneinander separiert, für kleine Förderhöhen trennt eine Ursprungsparabel die Bereiche.

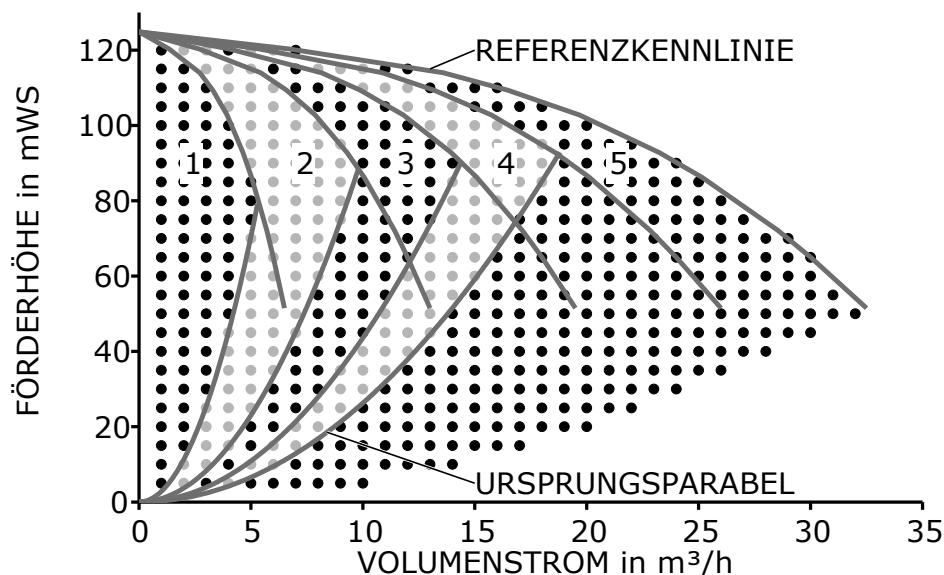


Abbildung 4.5: Optimale Betriebsentscheidung für die Anzahl aktiver Pumpen zur Minimierung der Eingangsleistung.

Die Wahl einer Ursprungsparabel als Trennung der Bereiche ist physikalisch motiviert: Die Skalierung des Bestpunkts einer Pumpe mit der Drehzahl folgt in der Volumenstrom-Förderhöhe-Ebene, unter Vernachlässigung der Abwertung, ebenfalls einer Ursprungsparabel. Dasselbe gilt für alle Punkte konstanten Wirkungsgrads. Der Zuschaltzeitpunkt für eine weitere Pumpe liegt da, wo eine Anlage mit einer weiteren Pumpe eine geringere Energieaufnahme und damit höhere Effizienz hat als die aktuelle Konfiguration.

Zur Berechnung der Öffnungsfaktoren der Ursprungsparabeln wird das Optimierungsergebnis weiter ausgewertet. Für alle Förderhöhen werden benachbarte Punkte mit unterschiedlicher Anzahl aktiver Pumpen gesucht. Falls das Wertepaar das Kriterium monotoner Steigung in Förderhöhe und Volumenstrom erfüllt, wird deren Mittelwert und die Förderhöhe als Wertepaar gespeichert. Für alle Wertepaare wird ein Fit⁴ durchgeführt und so der Öffnungsfaktor ermittelt. Tabelle 4.10 zeigt die Ergebnisse dieser Fits.

Der Verlauf des Wirkungsgrads für eine Förderhöhe von 60 mWS (Abbildung 4.6) zeigt einen wellenförmigen Verlauf. Im Wellental wird jeweils eine

⁴ MATLAB, *version 8.3.0.532 (R2014a)*, ([45], 2014)

Tabelle 4.10: Werte der berechneten Öffnungsfaktoren sowie obere und untere Grenze der 95 %-Konfidenzintervalle.

Wechsel	Öffnungsfaktor in $\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$	Konfidenzintervall
eins nach zwei	2.821	[2.643,2.999]
zwei nach drei	0.921	[0.8839,0.9581]
drei nach vier	0.4358	[0.4257,0.4459]
vier nach fünf	0.2629	[0.2579,0.2679]

Pumpe zugeschaltet, da sich der Betriebspunkt der Anlage bereits im Überlastbereich hinsichtlich des Bestpunkts befindet und ein weiterer Anstieg des Volumenstroms den Systemwirkungsgrad nur verschlechtern würde. Für große Förderhöhen (beispielhaft 110 mWS) verändert sich der qualitative Verlauf des Wirkungsgrads zu einem Sägezahnmuster. Der Systemwirkungsgrad steigt für eine festgehaltene Anzahl aktiver Pumpen mit steigendem Volumenstrom an, bis alle Pumpen bei voller Drehzahl laufen. Für eine weitere Steigerung des Volumenstroms muss dann eine zusätzliche Pumpe aktiviert werden, damit die Funktion weiter erfüllt wird. Der Systemwirkungsgrad fällt drastisch ab. Der Verlauf des Wirkungsgrads für 85 mWS zeigt ein gemischtes Bild: Der Wechsel von einer auf zwei Pumpen erfolgt funktionsbedingt, alle weiteren Wechsel sind mit geringerer Eingangsleistung zu begründen.

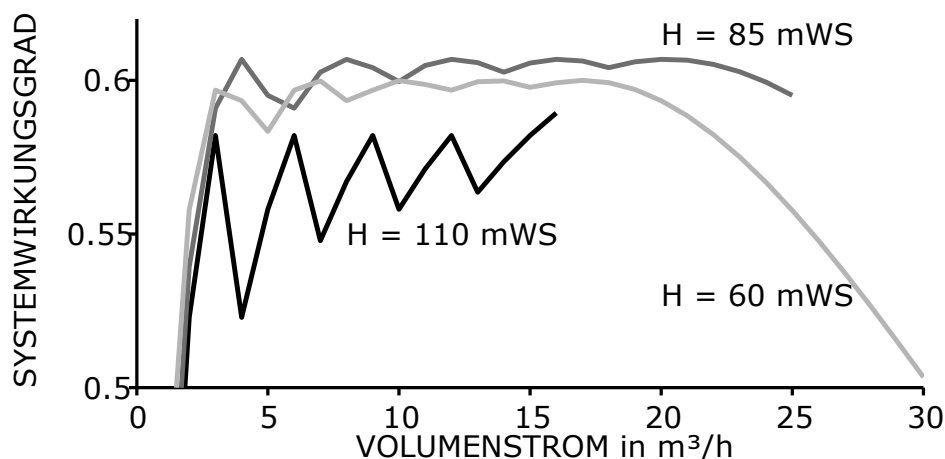


Abbildung 4.6: Systemwirkungsgrad über dem Volumenstrom einer Druckerhöhungsanlage mit fünf Pumpen für drei konstant gehaltene Förderhöhen.

4.2.2 Gleiche Pumpen unter unsicherer Last

Voraussetzung für die Berechnung der optimalen Steuerung einer Druckerhöhungsanlage ist nach Kapitel 4.2.1 die genaue Kenntnis der anliegenden Last. Während der Differenzdruck der Anlage einfach gemessen werden kann, ist der Kostenaufwand zur Messung des Volumenstroms hoch und daher Volumenstrommessung an Druckerhöhungsanlagen nicht ausgeführt. Stattdessen wird mithilfe von Beobachtern aus den Regelungseinstellungen und einfachen Messgrößen die Schätzung des Volumenstroms vorgenommen⁵. Bei der Schätzung ist mit einem erheblich größeren Fehler als bei direkter Messung zu rechnen, der auch bei der Optimierung Berücksichtigung finden muss. Anhand des gezeigten Optimierungsproblems und einer Annahme zur Abweichung der Schätzung wird die Optimierung der Steuerung einer Druckerhöhungsanlage exemplarisch demonstriert⁶. Aus der Optimierung unter Unsicherheit resultiert die Schaltentscheidung für die Anzahl aktiver Pumpen zur Erstellung der Regelungsstrategie. Die Drehzahl wird in der Anwendung vom Regler eingestellt.

Das Problem, das eine Optimierung unter Unsicherheit notwendig macht, resultiert aus der nicht exakten Bestimmung des Volumenstroms. Für die Genauigkeit der Schätzung des Volumenstroms gelten folgende Annahmen: Die Normalverteilung wird zugrunde gelegt, systematische Fehler bei der Schätzung existieren nicht. Der wahre Wert des Volumenstroms liegt in der Umgebung des Schätzwerts μ_Q . Die Standardabweichung σ_Q entspricht 3% des geschätzten Werts.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Die Strategie zur Diskretisierung des Kennfelds aus Kapitel 4.2.1 wird wiederverwendet. Jeder Diskretisierungspunkt entspricht einem Schätzwert μ_Q des Volumenstroms. Ergänzend wird für jeden Diskretisierungspunkt die Unsicherheit der Schätzung nach Miller und Rice⁷ momentenerhaltend diskretisiert: Zur Abbildung der Unsicherheit werden für jeden Diskretisierungspunkt weitere Lastpunkte in dessen Umgebung in die Optimierung aufgenommen. Aus der Funktionsbeschreibung in Form eines Lastpunkts wird für die Optimierung unter Unsicherheit ein Lastprofil. Tabelle 4.11 gibt das Lastprofil für jeden Diskretisierungspunkt an.

Ziel. Die Zielfunktion ist die Minimierung des Erwartungswerts der Eingangsleistung aller Pumpen der Druckerhöhungsanlage im jeweiligen Betrieb-

⁵ KSB PumpMeter, Wilo IR-Monitor, Grundfos GO

⁶ PÖTTGEN, EDERER, ALTHERR UND PELZ, „Developing a Control Strategy for Booster Stations under Uncertain Load“, ([63], 2015)

⁷ MILLER III UND RICE, „Discrete approximations of probability distributions“, ([47], 1983)

Tabelle 4.11: Lastprofil für jeden Diskretisierungspunkt des Kennfelds der Druckerhöhungsanlage.

Volumenstrom	$0.9143\mu_Q$	$0.9593\mu_Q$	$1\mu_Q$	$1.0407\mu_Q$	$1.0857\mu_Q$
Wahrscheinlichkeit	0.0113	0.2221	0.5333	0.2221	0.0113

spunkt. Diese entspricht in ihrer Darstellung der mittleren Eingangsleistung einer Druckerhöhungsanlage für ein Lastprofil nach Gleichung 3.14.

Spielfeld. Die Topologie der Anlage ist unverändert. Die Abweichungen des wahren Werts des Volumenstroms vom Schätzwert dürfen nur von einer Anpassung der Drehzahl ausgeglichen werden, sodass eine zulässige Lösung gefunden wird. Die getroffene Schaltentscheidung für die Anzahl der aktiven Pumpen ist für alle Lastfälle gleich. Die einzelnen Szenarien des Profils sind damit untereinander gekoppelt.

Optimierungsmodell. Ein nichtlineares Optimierungsprogramm wird auch für die Optimierung der Steuerung von Druckerhöhungsanlagen unter Unsicherheit verwendet.

Optimierungsergebnis. Für 496 der der 768 Diskretisierungspunkte existiert eine Lösung. Jede Lösung des Optimierungsprogramms gibt für den jeweiligen Lastpunkt die Anzahl der aktiven Pumpen und deren Drehzahl an. Das Ergebnis der Optimierungsrechnungen im Kennfeld (Abbildung 4.7) zeigt zwei bemerkenswerte Ergebnisse: (i) Die Unsicherheit der Volumenstrombestimmung hat keinen Einfluss auf die Öffnungsfaktoren der Regelparabeln. Die Werte der ermittelten Parabelsteigungen (Tabelle 4.12) liegen in der Nähe der zuvor ohne Unsicherheit berechneten Werte. (ii) Im oberen Bereich des Kennfelds ist das Zuschalten einer weitere Pumpe im Vergleich zur Optimierung ohne Unsicherheit bereits bei kleineren Werten für den Volumenstrom notwendig. Durch die Unsicherheit bei der Schätzung des Volumenstroms ist die funktionsbedingte Aktivierung einer weitere Pumpe bereits notwendig, wenn der maximal zu erwartende Volumenstrom die Referenzkennlinie überschreitet. In einer geregelten Anlage würde dieser Umschaltzeitpunkt nicht durch eine Schätzung des Volumenstroms, sondern durch Erreichen der maximalen Drehzahl aller aktiven Pumpen detektiert.

4.2.3 Unterschiedliche parallele Pumpen

Die Untersuchung der Steuerung einer Druckerhöhungsanlage mit unterschiedlichen Pumpen verfolgt zwei Fragestellungen: Zum einen, ob es überhaupt möglich ist, mit einer kleineren Pumpe schlechteren Bestpunktwirkungsgrads eine bestehende Anlage energetisch zu verbessern. Zum anderen ist offen, wie

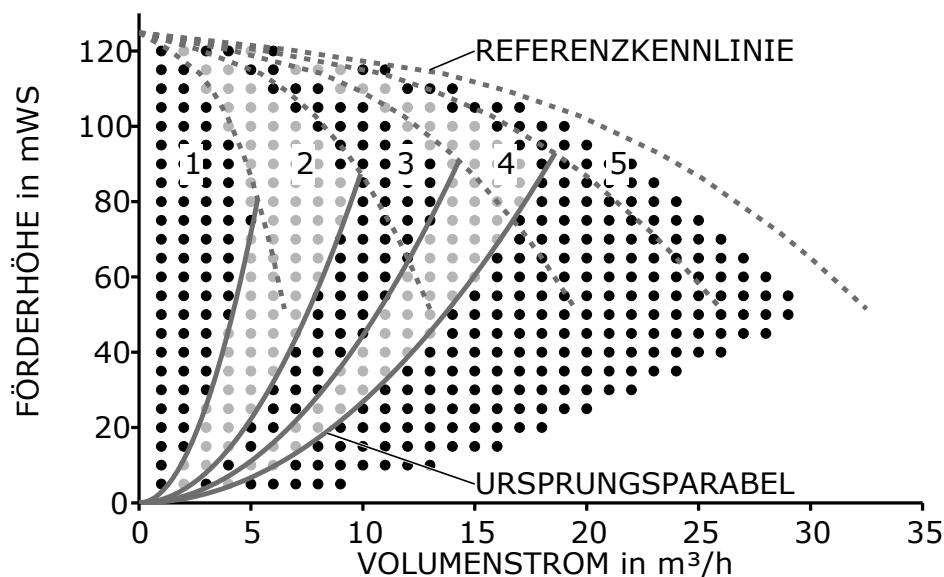


Abbildung 4.7: Optimale Betriebsentscheidung für die Anzahl aktiver Pumpen zur Minimierung der Eingangsleistung unter Unsicherheit.

Tabelle 4.12: Werte der berechneten Öffnungsfaktoren sowie deren 95%-Konfidenzintervalle für die Optimierung unter Unsicherheit.

Wechsel	Öffnungsfaktor	Konfidenzintervall
	in mWS(m ³ /h) ⁻²	
eins nach zwei	2.868	[2.64,3.095]
zwei nach drei	0.8908	[0.8609,0.9207]
drei nach vier	0.4444	[0.4306,0.4581]
vier nach fünf	0.2687	[0.262,0.2754]

eine Steuerung einer Anlage aus zwei verschiedenen Pumpentypen qualitativ aussehen kann. Diese optimale Steuerung bildet im Fall der Umsetzung die Grundlage der Regelung der Anlage.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Zur Erstellung der Steuerungsstrategie wird der Betrieb der Anlage in ihrem gesamten Kennfeld untersucht. Das Kennfeld wird zu diesem Zweck mit einzelnen Lastpunkten für die Förderhöhen

$$H_{\text{last}} = \{5, 10, \dots, 120\} \text{mWS}$$

und Volumenströme

$$Q_{\text{last}} = \{1, 2, 3, \dots, 35\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$$

diskretisiert abgebildet.

Ziel. Die Zielfunktion ist in jedem Lastpunkt die Minimierung der gesamten Eingangsleistung des Systems.

Spielfeld. Die Anlage besteht aus einer Parallelschaltung von 5 Pumpen der Bauart 'Typ34' und einer Pumpe der Bauart 'Typ14'. Der Wirkungsgrad im Bestpunkt der Pumpe 'Typ14' ist mit etwa 53% verglichen mit einem Wirkungsgrad von etwa 61% im Bestpunkt von 'Typ34' deutlich geringer. Diese Pumpen werden in Parallelschaltung betrieben und können deaktiviert werden. Alle Steuerungsvariablen sind freigegeben.

Optimierungsmodell. Zur Beantwortung der Optimierungsfragestellung wird ein linearisiertes Modell⁸ verwendet. Die Vereinfachungen aus 3.6 und die Erkenntnisse 4.1.2 werden angewandt. Die Variablenbelegungen der Optimalsteuerung für die einzelnen Diskretisierungspunkte des Kennfelds werden in einzelnen Optimierungsprogrammen nacheinander berechnet, da die Punkte voneinander unabhängig sind.

Optimierungsergebnis. Obwohl die Bauart 'Typ14' einen geringeren Bestpunktwirkungsgrad hat als 'Typ34', ermöglicht der Einsatz des Pumpentyps die Reduktion der gesamten Eingangsleistung in einigen Teilen des Betriebsbereichs. Im Bereich nahe der y-Achse des Kennfelds (Abbildung 4.8), in dem die größere Pumpe bei starker Teillast arbeiten würde, führt der Einsatz der kleineren Pumpe zu Energieeinsparungen. Darüber hinaus kommt die Pumpe 'Typ14' in der Nähe der ursprünglichen Umschaltlinien zum Einsatz. Am rechten Rand wird die kleine Pumpe eingesetzt, weil die Anlage aus fünf gleichen Maschinen schon stark im Überlastbereich läuft und eine weitere Pumpe hier die Eingangsleistung verringert. Eine weitere Pumpe 'Typ34' würde zu größeren Reduktionen der Eingangsleistung führen.

⁸ Die Nutzung eines nichtlinearen Optimierungsmodells wäre auch in diesem Fall naheliegend – die eingesetzte Software zur Lösung nichtlinearer Probleme versagt aber bei der Festsetzung der Integer-Variablen für die Anzahl der eingesetzten Pumpen. Der nichtlineare Solver gibt für einige der Diskretisierungspunkte suboptimale Lösungen aus. Von seiten der Supportabteilung des Herstellers liegt die Bestätigung vor, dass es sich um einen Bug in der Optimierungssoftware handelt. Weitere Ausführungen dazu sind in Anhang C zu finden.

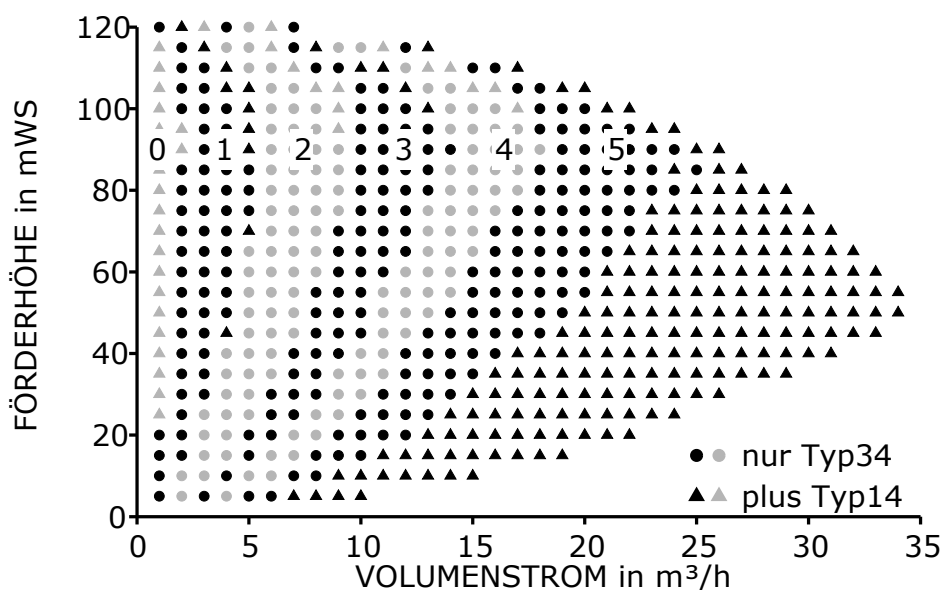


Abbildung 4.8: Optimierungsergebnis für die Steuerung einer Druckerhöhungsanlage aus fünf Pumpen 'Typ34' und einer Pumpe 'Typ14'. Die Zahlen im Diagramm bezeichnen die Anzahl der aktiven Pumpen 'Typ34'.

4.3 Minimierung der Kosten einer Druckerhöhungsanlage

Die wesentliche Aufgabe bei der Neuplanung von Anlagen ist die Auswahl geeigneter Maschinen. Die Auswahl der Pumpen aus einem großen Katalog stellt dabei den Planer vor eine Herausforderung. Auch für erfolgreich geplante Systeme, die der Erfüllung ihrer Funktion nachkommen, wird immer offen bleiben, ob basierend auf dem Katalog verfügbarer Maschinen eine bessere – in der Hauptsache günstigere – Lösung verfügbar gewesen wäre. Anhand technisch relevanter Lastprofile werden im Folgenden Anlagen mit Maschinen aus einem Pumpenkatalog mit dem Computer geplant.

4.3.1 Ausschließlich parallel geschaltete Pumpen

Anlagen aus rein parallel geschalteten Pumpen bieten neben technischen Vorteilen auch im Sinne effizienter Optimierung Vorteile: Der Graph zur Auswahl ist erheblich kleiner. Ob diese Anlagen aus baugleichen Pumpen bestehen sollten oder aus ökonomischen Gesichtspunkten besser unterschiedliche Pumpen verwendet werden sollten wird mithilfe der diskreten Optimierung beantwortet.

Funktion. Die Funktion der betrachteten Anwendungsfälle ist „Druckerhöhung“, „Boilerfeed“ und „Kühlung“. Für diese drei Anwendungsfälle liegt der Zeitanteil der anteiligen Volumenströme aus Feldstudien vor⁹. Darauf aufbauend sind drei Lastprofile erstellt worden. Die Lastprofile wurden um Annahmen für den Verlauf der Druckkontrollkurve entsprechend der Anwendung ergänzt:

Druckerhöhung:

$$\frac{H_{\text{last},t}}{H_{\text{last,max}}} = 0.75 + 0.25 \frac{Q_{\text{last},t}}{Q_{\text{last,max}}} \quad (4.4)$$

Boilerfeed:

$$\frac{H_{\text{last},t}}{H_{\text{last,max}}} = 0.25 + 0.5 \frac{Q_{\text{last},t}}{Q_{\text{last,max}}} + 0.25 \left(\frac{Q_{\text{last},t}}{Q_{\text{last,max}}} \right)^2 \quad (4.5)$$

Kühlung:

$$\frac{H_{\text{last},t}}{H_{\text{last,max}}} = 0.5 + 0.5 \frac{Q_{\text{last},t}}{Q_{\text{last,max}}} \quad (4.6)$$

Die zeitlichen Verteilungen der anteiligen Volumenströme in den drei verwendeten Lastprofile unterscheiden sich grundlegend (Abbildung 4.9): Im Lastprofil „Druckerhöhung“ ist die Verteilung unregelmäßig mit Zeitanteilen bis zu 20 %. Die zeitliche Verteilung des Lastprofils „Boilerfeed“ hat ein ausgeprägtes Maximum für einen Teilvolumenstrom von 20 % des Nennwerts und fällt nach außen ab. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Maximalwerts des Volumenstroms ist dabei $e(Q = Q_{\text{max}}) = 0$. Der Lastfall kommt im Normalbetrieb nicht vor, ist aber beispielsweise im Störfall für die schnellere Wärmeabfuhr relevant und muss deshalb im Betriebsbereich der Anlage liegen. Das Lastprofil „Kühlung“ hat hingegen eine ausgeprägt hohe Eintrittswahrscheinlichkeit für den Maximalvolumenstrom bei sonst relativ gleichmäßiger Verteilung.

Als Maximalwerte für Volumenstrom und Förderhöhe dienen

$$H_{\text{last,max}} = \{60, 200\} \text{mWS}$$

und

$$Q_{\text{last,max}} = \{30, 200\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}.$$

⁹ HAMKINS, *Entwicklung hocheffizienter Pumpensysteme, Zwischenbericht 2. HJ 2015*, ([25], 2016)

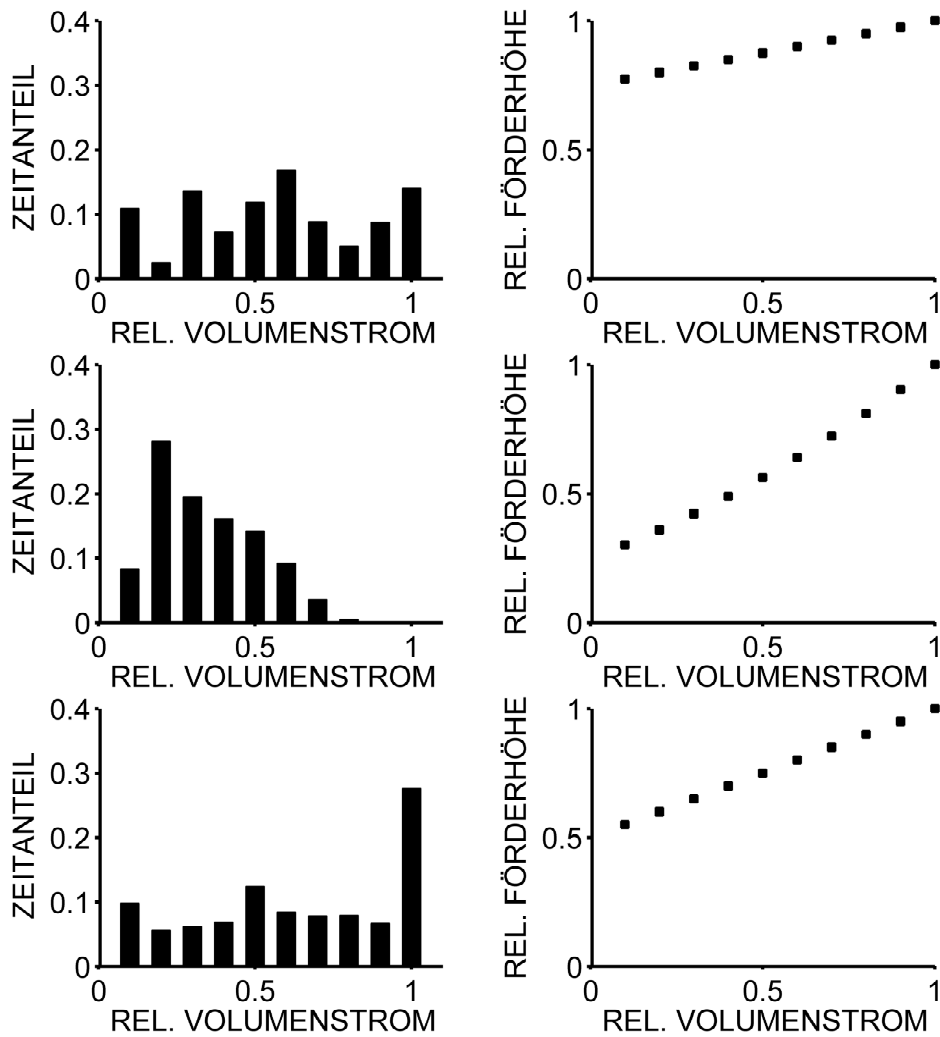


Abbildung 4.9: Lastprofile für die Minimierung der Lebenszykluskosten einer Druckerhöhungsanlage. Oben: Druckerhöhung; mitte: Boilerfeed; unten: Kühlung

Für alle Kombinationen aus Lastprofil, maximalem Volumenstrom und der maximaler Förderhöhe ergeben sich so zwölf Lastprofile, für die jeweils die optimale Anlagenkonfiguration gesucht ist¹⁰.

Ziel. Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Summe aus Anschaffungs- und Energiekosten während des Betriebs der Anlage. Für den Energiepreis werden 0.2 €/kWh angenommen. Der Betrachtungszeitraum beträgt drei Betriebsjahre. Für die Lastprofile der Funktion „Boilerfeed“ hat der Maximallastfall keinen Einfluss auf den Zielfunktionswert der Optimierung, sondern muss nur mit dem gefundenen System erfüllbar sein.

Spielfeld. Das Spielfeld der Optimierung besteht aus dem gesamten Pumpenkatalog. Aus diesem Katalog dürfen maximal drei Pumpen, auch baugleiche, ausgewählt werden. Die Steuerung aller Pumpen ist freigegeben und vom Optimierungsprogramm wählbar.

Optimierungsprogramm. Die Vielzahl der diskreten Entscheidungen (allein 678 Kaufentscheidungen) und deren Überlagerung mit den Betriebsentscheidungen legt die Nutzung eines linearisierten Optimierungsprogramms nahe. Die maximale Laufzeit der Rechnung wird auf einen Tag limitiert.

Optimierungsergebnis. Für neun der zwölf Optimierungsprobleme existiert eine zulässige Lösung, für sechs davon wird deren globale Optimalität nachgewiesen. Für die übrigen drei wird nachgewiesen, dass im Suchraum keine Kombination aus drei Pumpen in der Lage ist, die Last zu decken. Wenn eine Lösung existiert, besteht das Ergebnis aus der Auswahl einer Kombination von Pumpen, für die die optimale Steuerung für minimalen Energieverbrauch in den Lastfällen des Profils berechnet wird. Tabelle 4.13 zeigt die neun gefundenen zulässigen Lösungen sowie deren Zielfunktionswerte und duale Schranken, falls die Optimalität der gefundenen Lösung noch nicht nachgewiesen ist.

Mit Ausnahme der Optimierungsprobleme mit der Funktion „Boilerfeed“ konnte für alle Ergebnisse deren Optimalität nachgewiesen werden: Im gesamten Katalog gibt es keine drei Pumpen, mit denen die Funktion bei geringeren Gesamtkosten erfüllt werden kann. Eine mögliche Erklärung für die langen Rechenzeit und die verbliebene Gap zwischen gefundener Lösung und dualer Schranke für die „Boilerfeed“-Probleme ist der Maximallastfall: Dieser hat keinen Einfluss auf den Zielfunktionswert, sondern muss lediglich erfüllt werden können. Der Solver kann also durch Veränderung der Steuerung im Maximallastfall den Zielfunktionswert nicht beeinflussen, es existieren sehr wahrscheinlich unendlich viele Lösungen gleichen Zielfunktionswerts. Die Gaps sind in allen Fällen klein, sodass die gefundenen Lösungen zumin-

¹⁰In Anhang B sind alle Daten aller Lastprofile sowie die relevanten Daten der Optimierungsergebnisse als Zahlenwerte angegeben.

Tabelle 4.13: Optimierungsergebnis für die Auswahl der optimalen Druckerhöhungsanlage mit maximal drei Pumpen.

Profil	Primallösung		duale Schranke
	ausgewählte Pumpen	Gesamtkosten in €	Gesamtkosten in €
DE1	Typ27, Typ137	22 776	optimal
DE2	Typ94, Typ182	133 077	optimal
DE3	Typ21, Typ59, Typ151	72 358	optimal
BF1	Typ12, Typ51, Typ111	10 543	8769
BF2	Typ94, Typ156	54 817	54 814
BF3	Typ21, Typ59, Typ151	29 034	27 960
KU1	Typ137	23 549	optimal
KU2	Typ94, Typ182	142 028	optimal
KU3	Typ21, Typ59, Typ151	76 258	optimal

dest sehr gute Lösungen sind.

Der Einfluss der Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Lastfälle auf die Topologie wird am Vergleich der Lastprofile DE1 und KU1 deutlich: Obwohl in DE1 die Investitionskosten durch den Kauf einer zusätzlichen Pumpe höher sind, sind die Gesamtkosten geringer. Die Deckung der deutlich stärker gewichteten Teillast erfolgt mit der zusätzlichen Pumpe erheblich effizienter. Als Vergleichswert für die Optimierungsergebnisse wird händisch eine Druckerhöhungsanlage aus baugleichen Pumpen aus dem Katalog ausgewählt: Die günstigste Parallelschaltung aus drei gleichen Pumpen, die in der Lage ist die Funktionserfüllung in vollem Umfang zu gewährleisten ist die Referenzanlage. Für diese wird die Summe aus Investitions- und Energiekosten berechnet. Für die Lastfälle DE1, BF1 und KU1 wird dazu die Pumpe 'Typ75' ausgewählt sowie für DE2, BF2 und KU2 'Typ221'. Für die Lastprofile 'DE3', 'BF3' und 'KU3' trifft diese Anforderung auf 'Typ127' zu. Eine Anlage aus drei parallelen Pumpen dieses Typs ist allerdings bereits so stark überdimensioniert, dass zwei Pumpen den Maximallastfall decken. Eine dritte Pumpe wird also nicht benötigt. Für diese festgelegten Topologien werden zu den Anschaffungskosten die Energiekosten der Optimalsteuerung für alle Lastfälle addiert und die Ergebnisse in Tabelle 4.14 den Optimierungsergebnissen gegenübergestellt.

Die Ersparnisse durch die Optimierung liegen für die meisten Lastprofile im Bereich von etwa 10%. Für den Lastfall BF3 liefert die konventionelle Auslegung ein besseres Ergebnis als die nicht vollständig konvergierte Optimierungsrechnung. Zusätzlich zum Optimierungsergebnis ist in Tabelle 4.14

der Anteil der Anschaffungskosten an den Gesamtkosten dargestellt: Dieser liegt für die händisch ausgelegten Systeme oft deutlich über dem Ergebnis der Optimierung.

Tabelle 4.14: Vergleich des Optimierungsergebnisses mit händisch zusammengestellter Topologie.

Profil	Optimierungsergebnis		Vergleichstopologie	
	Gesamt- kosten in €	Anschaffungs- kosten in %	Gesamt- kosten in €	Anschaffungs- kosten in %
DE1	22 776	14.42	24 781	17.12
DE2	133 077	12.04	146 727	15.94
DE3	72 358	8.86	74 754	8.27
BF1	10 543	30.15	11 246	37.73
BF2	54 817	27.04	64 900	36.03
BF3	29 034	22.07	28 945	21.37
KU1	23 549	11.87	26 332	16.11
KU2	142 028	11.28	155 249	15.06
KU3	76 258	8.40	79 413	7.79

4.3.2 Optimale Steuerung für die gefundene Topologie

Die getroffene Auswahl unterschiedlicher Pumpen für die Parallelschaltung wirft die Frage auf, ob die optimale Steuerung der Anlage den Aufbau einer Regelung zulässt. Die Kombination der Pumpen 'Typ21', 'Typ59' und 'Typ151' ist die häufigste ausgewählte Topologie. Analog zum Vorgehen in Kapitel 4.2.3 wird eine Regelungsstrategie ermittelt.

Funktion. Die Funktion der Anlage ist die Förderung von Wasser. Das Kennfeld wird mit einzelnen Lastpunkte für die Förderhöhen

$$H_{\text{last}} = \{10, 20, \dots, 250\} \text{mWS}$$

und den Volumenströme

$$Q_{\text{last}} = \{1, 2, 3, \dots, 50\} \text{m}^3 \text{h}^{-1}$$

diskretisiert abgebildet.

Ziel. Die Zielfunktion ist in jedem Lastpunkt die Minimierung der gesamten Eingangsleistung des Systems.

Spielfeld. Die Anlage besteht aus einer Parallelschaltung der Pumpen 'Typ21', 'Typ59' und 'Typ151'. Alle Steuerungsvariablen sind freigegeben.

Optimierungsmodell. Analog zum Vorgehen in Kapitel 4.2.3 wird ein Optimierungsmodell erstellt

Optimierungsergebnis. Die Steuerungsstrategie ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Das Kennfeld weist keine Lücken auf. Für konstante Förderhöhe und steigenden Volumenstrom werden die Pumpen der Größe nach eingeschaltet. Wird die nächstgrößere Pumpe eingeschaltet, wird die laufende Pumpe ausgeschaltet. Zur Förderung der Spitzenlasten werden Kombinationen aus mehreren aktiven Pumpen benötigt.

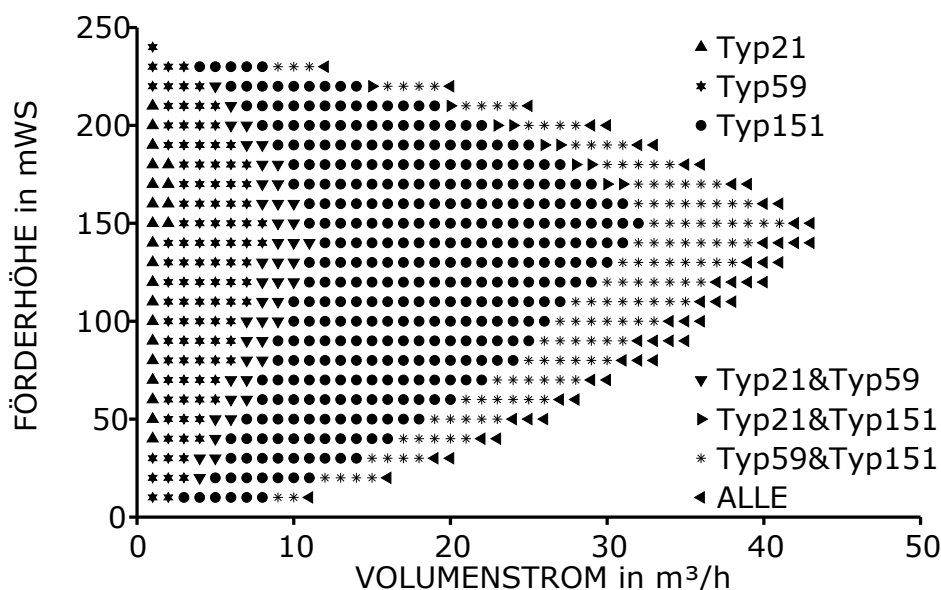


Abbildung 4.10: Optimale Steuerung der diskreten Betriebsentscheidung für die gefundene Topologie.

4.3.3 Freigegebene Verschaltung

Die Anzahl der möglichen Systeme aus dem vorhandenen Baukasten wird durch die Erwägung von Reihenschaltungen als topologische Option deutlich erweitert. In Einzelfällen ergeben sich durch die Reihenschaltung von Pumpen aus einem verhältnismäßig kleinen Baukasten energetische Vorteile. Beispiele für ökonomisch rentable Reihenschaltung hat beispielsweise Weber¹¹ dargestellt. Reihenschaltung von baugleichen Pumpen scheint immer bei starker Teillast sinnvoll. Die Pumpen können dann bei sehr geringer Drehzahl laufen, fördern aber trotzdem den vollen Volumenstrom bei geringerer Druckerhöhung. Dimensionslos betrachtet wird die Teillast so kleiner.

¹¹WEBER, „Optimierung von Druckerhöhungsanlagen“, ([84], 2016)

Reihenschaltungen von Pumpen oder in der Topologie veränderbare Pumpensysteme werden gegenwärtig aus mehreren Gründen technisch selten umgesetzt:

- Fällt eine Pumpe der Reihenschaltung aus, sind alle Pumpen der Reihe für die Funktionserfüllung unbrauchbar, sofern die Topologie fest ist.
- Ist die Topologie nicht festgelegt sondern variabel, ist der Komponentenaufwand durch zusätzliche Armaturen erheblich höher. Der Ausfall einer Armatur kann zum Ausfall des Systems führen.
- Der Entwurf einer Regelungsstrategie für Pumpen in Reihenschaltung ist schwierig.
- Umschalten zwischen verschiedenen Topologien für Pumpensysteme führt zu starken Druckgradienten im System. Zu häufiges Umschalten führt zusätzlich zu einer Überhitzung des Motors durch den Anlaufstrom, daher sollte die Schalthäufigkeit für Pumpen 30 Schaltungen/h nicht überschreiten¹².
- Die Auslegung einer Regelungsstrategie für die Topologieänderung ist von diskreten Entscheidungen geprägt und deshalb schwierig zu implementieren.

Alle genannten Nachteile werden von einem ökonomischen oder ökologischen Vorteil des Systems aufgewogen – sofern dieser groß genug ist.

Funktion. Die Lastprofile aus Kapitel 4.3.1 der Anwendung „Druckerhöhung“ werden wieder genutzt. Der Sollvolumenstrom bleibt gleich, die Förderhöhe muss als Anforderung an die Quelle $q1$ und Senke $s1$ der Anlage formuliert werden:

$$p_{\text{last},q1,t} = 0, \quad (4.7)$$

$$p_{\text{last},s1,t} = \rho g H_{\text{last},t}. \quad (4.8)$$

Ziel. Das Ziel bleibt wie in Kapitel 4.3.1.

Spielfeld. Der vollständige Katalog aus 226 Pumpen steht als Baukasten zur Verfügung. Die Anzahl der gekauften Pumpen ist auf drei beschränkt. Die Topologie der Pumpen ist freigegeben und darf sich auch von Lastfall zu Lastfall unterscheiden.

¹²ARBEITSKREIS DER PROFESSOREN FÜR REGELUNGSTECHNIK IN DER VERSORGUNGSTECHNIK, *Regelungs- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik*, ([5], 2010)

Optimierungsprogramm. Die Vereinfachungen für Druckerhöhungsanlagen aus parallelen Pumpen (Kapitel 3.6) greifen für die Modellierung des gegebenen Problems nicht. Von der Quelle zu jedem Eingangsknoten einer Pumpenkante, von jedem Ausgangsknoten einer Pumpenkante zu jedem Eingangsknoten aller anderen Pumpenkanten und von jedem Ausgangsknoten einer Pumpenkante zur Senke wird eine Kante als verlustfreie Verbindung gesetzt. Die Vielzahl der diskreten Entscheidungen für die Aktivierung und Deaktivierung der Kanten legt die Nutzung eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsprogramms nahe. Insgesamt gibt es 678 Pumpenkanten, je genauso viele Verbindungen zu Quelle und Senke und 459 006 Verbindungen der Pumpenkanten untereinander. Die Aktivität jeder dieser Verbindungen wird mit einer binären Variable modelliert.

Optimierungsergebnis. Keines der Optimierungsprogramme wird in der gegebenen Zeit von einem Tag optimal gelöst. Für jedes Problem wird eine duale Schranke größer als Null angegeben (Tabelle 4.15). Für eines der Optimierungsprobleme wird innerhalb der zur Verfügung stehenden Ressourcen eine zulässige Lösung gefunden. In dieser Lösung wird nur eine Pumpe verwendet, sodass die Topologie für jeden Lastfall gleich bleibt. Ob in einem der gegebenen Lastfälle eine Reihenschaltung sinnvoll wäre, wird damit nicht abschließend geklärt.

Tabelle 4.15: Berechnungsergebnis für die Auswahl einer optimalen Druckerhöhungsanlage bei freigegebener Topologie.

Profil	Primallösung ausgewählte Pumpen	Gesamtkosten in €	duale Schranke Gesamtkosten in €
DE1	Typ226	38 161	2467
DE2	–	–	27 419
DE3	–	–	2538
DE4	–	–	29 864

4.4 Energy-Efficiency-Index: Bildung einer Referenz

Werden Grenzwerte für den Energy-Efficiency-Index (Kapitel 2.2) flächendeckend eingeführt, muss für jede Druckerhöhungsanlage nachgewiesen werden, dass diese den gesetzlichen Anforderungen genügt. Zur Bestimmung des EEI

wird die maximale Fluidleistung der Anlage sowie die über das Lastprofil gemittelte Eingangsleistung benötigt. Die Bestimmung dieser Größen kann messtechnisch oder auf Basis eines semianalytischen Modells¹³ geschehen. Die Bestimmung des Punkts maximaler Fluidleistung geschieht bei diesen Verfahren durch Auswahl aus den Messpunkten des Kennfelds.

Für eine Druckerhöhungsanlage aus drei drehzahlregelbaren Pumpen wird im Folgenden ein alternatives Verfahren vorgeschlagen¹⁴ und im Versuchsfeld angewandt: Auf Basis der vorgestellten Methodiken und Optimierungstechniken werden die benötigten Eingangsdaten für die Berechnung des EEI allein aus dem Kennfeld des verwendeten Pumpentyps errechnet¹⁵. Die Optimierung liefert die ideale Steuerung der Druckerhöhungsanlage für die jeweiligen Betriebspunkte und berechnet deshalb gleichzeitig ein Referenzwert für die Regelung. Für die messtechnische Ermittlung der mittleren Eingangsleistung wird eine anlageninterne Regelung verwendet, die auch für den Normalbetrieb der Druckerhöhungsanlage genutzt wird. Ist die messtechnisch ermittelte Eingangsleistung deutlich größer als errechnet, muss die Regelung der Anlage überarbeitet werden.

4.4.1 Aufbau des Prüfstands

Aus den Untersuchungen von Taubert et. al.¹⁶ steht der in Abbildung 4.11 gezeigte Prüfstand zur Verfügung¹⁷. Der Prüfstand besteht aus einem geschlossenen Wasserkreislauf mit einer Druckerhöhungsanlage: Aus einem Tank fördern drei Pumpen Wasser durch einen Volumenstromsensor und ein Drosselventil zurück in den Tank. Die Förderhöhe der Druckerhöhungsanlage sowie die Eingangsleistung werden laufend messtechnisch erfasst. Alle drei Pumpen sind unabhängig voneinander drehzahlregelbar sowie zu- und abschaltbar. Über das Drosselventil kann der Widerstand der Anlage verändert werden. Eine optionale Regelung ermöglicht den Betrieb der Anlage entlang der

¹³LANG, LUDWIG, PELZ UND STOFFEL, „General Methodologies of Determining the Energy-Efficiency-Index of Pump Units in the Frame of the Extended Product Approach“, ([42], 2013)

¹⁴PÖTTGEN UND PELZ, „The best attainable EEI for Booster Stations derived by Global Optimization“, ([65], 2016)

¹⁵Auf die Berechnung des EEI wird verzichtet, weil die Norm und damit die Berechnungsvorschrift der Referenzleistung noch nicht in ihrer finalen Form vorliegt.

¹⁶TAUBERT, STOFFEL, LUDWIG UND PELZ, „Development of a Standardized Approach to Assess the Energy Efficiency of Booster Pump Units in the Sense of an Extended Product“, ([77], 2016)

¹⁷Details zum Aufbau des Prüfstands sowie zur Ermittlung der systematischen und stochastischen Messfehler können den Arbeiten von Taubert et. al. entnommen werden. Der Prüfstand wird in dieser Arbeit zur Demonstration des Verfahrens eingesetzt.

Druckkontrollkurve des Lastprofils zur Bestimmung des EEI.

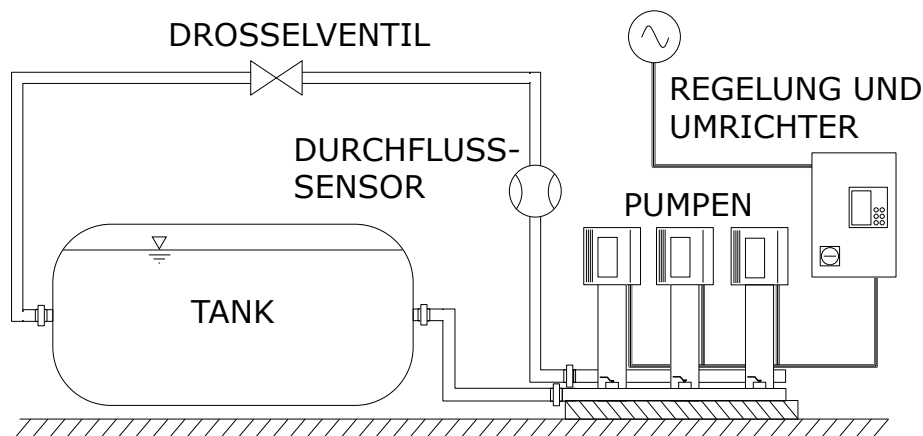


Abbildung 4.11: Prüfstands Aufbau im Schnittbild.

Die Kennlinie der Pumpen wird messtechnisch ermittelt. Dazu werden alle drei Pumpen bei voller Drehzahl betrieben und das Drosselventil stufenweise geschlossen. Volumenstrom, Förderhöhe und Eingangsleistung werden aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Messung sind in Anhang B.2, die resultierende Kennlinie der Pumpen in Abbildung 4.12 dargestellt. Ein Polynomfit nach dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Verfahren dient zur nichtlinearen Darstellung der Kennlinie.

4.4.2 Bestimmung des Nenn-Betriebspunkts

Zwei wichtige Eingangsgrößen für die Berechnung des EEI sind der Volumenstrom $Q_{100\%}$ und die Förderhöhe $H_{100\%}$ bei maximaler Fluidleistung der Anlage. Diese werden sowohl zur Definition des Lastprofils wie auch zur Berechnung des EEI benötigt und können mithilfe eines Optimierungsprogramms bestimmt werden.

Funktion. Die Funktion ist die Förderung von Wasser. Der Betriebspunkt der Druckerhöhungsanlage wird nicht vorgegeben.

Ziel. Das Ziel ist die Maximierung der Fluidleistung der Druckerhöhungsanlage, die der Summe über die Fluidleistung aller Pumpen entspricht

$$P_{\text{fl}} = \varrho g \sum_{(i,k) \in E} Q_{i,k} H_{i,k}. \quad (4.9)$$

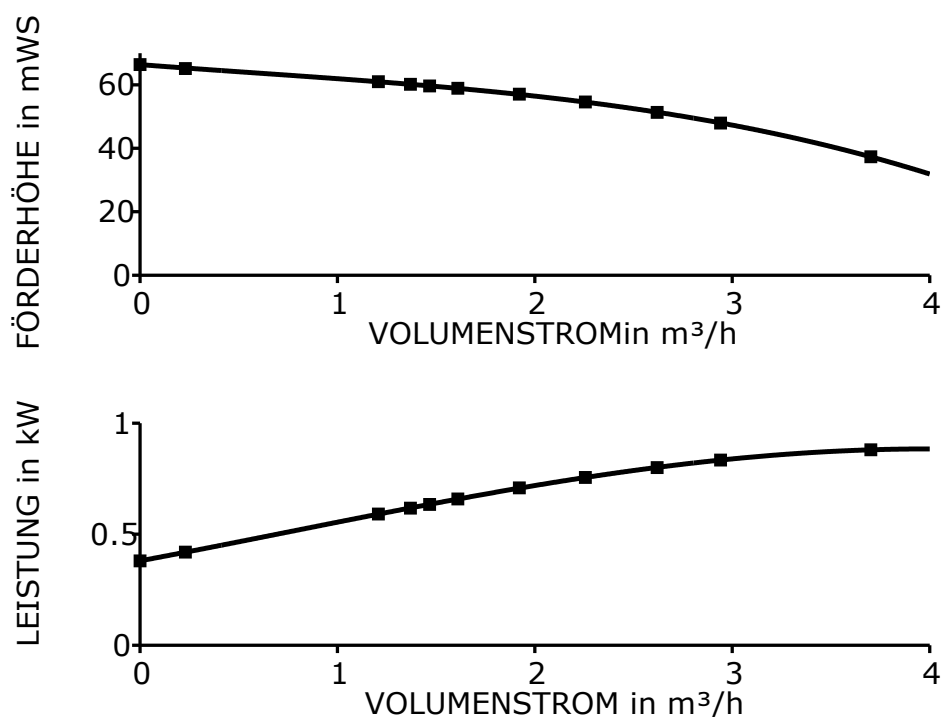


Abbildung 4.12: Kennlinie der im Experiment verwendeten Pumpe.

Die Förderhöhe $H_{i,k}$ aller aktiven Pumpen wird dabei vom Optimierungsprogramm gleich eingestellt, ohne dass die Nebenbedingung explizit vorgegeben wird.

Spielfeld. Die Topologie der Druckerhöhungsanlage ist durch den Prüfstand gegeben. Das Kennfeld der Pumpe ist auf Basis der Messdaten bekannt und wird mit Polynomfunktionen und Skalierungsgleichungen modelliert. Alle Betriebsgrößen sind variabel, die Kopplungsbedingungen zwischen den Betriebsgrößen der Druckerhöhungsanlage gelten.

Optimierungsprogramm. Im Vergleich zu allen bisher behandelten Optimierungsprogrammen für die Steuerung von Druckerhöhungsanlagen ändert sich die Form der Zielfunktion. Sie ist nun die Multiplikation zweier Variabler die nur in einem nichtlinearen Programm exakt dargestellt werden kann. Zur Optimierung wird deshalb ein gemischt-ganzzahliges nichtlineares Programm genutzt. Die Nebenbedingung zur Vorgabe des Betriebspunkts oder des Lastprofils entfällt.

Optimierungsergebnis. Der Zielfunktionswert selbst ist für das weitere Vorgehen nicht von Interesse, sondern die Variablenbelegung der Lösung: Für eine Drehzahl von $n = 100 \text{ min}^{-1}$, einen Volumenstrom von

$$\sum_{(i,k) \in E} Q_{i,k} = Q_{100\%} = 9.768 \text{ m}^3/\text{h}$$

sowie eine Förderhöhe von

$$\forall (i, k) \in E : H_{i,k} = H_{100\%} = 44.06 \text{ mWS}$$

wird die Fluidleistung maximal. Das ist der Nenn-Betriebspunkt des EEI.

4.4.3 Minimierung der Eingangsleistung

Die Ermittlung der minimal möglichen mittleren Eingangsleistung erfolgt anhand eines Optimierungsprogramms. Die mittlere Eingangsleistung wird nach

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,k) \in E} \left(e_t \sum_{(i,k) \in E_P} P_{i,k,t} \right). \quad (4.10)$$

berechnet. Die Lastfälle sind untereinander nicht gekoppelt und werden deshalb konsekutiv optimiert.

Funktion. Durch den Punkt maximaler Fluidleistung sind auch alle anderen Lastpunkte zur Bestimmung der mittleren Eingangsleistung in Tabelle 4.16 gegeben¹⁸.

Ziel. Das Ziel ist die Minimierung der Eingangsleistung für jeden Lastpunkt des Profils.

Spielfeld. Die Topologie der Druckerhöhungsanlage steht fest wie im Versuchsaufbau beschrieben, die Steuerung ist freigegeben.

Optimierungsprogramm. Der Referenzpunkt des Lastprofils ist mit einem nichtlinearen Optimierungsprogramm bestimmt worden. Auch für die Optimierung der Betriebsparameter wird deshalb ein nichtlineares Optimierungsprogramm verwendet. Die zehn Lastpunkte des Profils werden nacheinander als Nebenbedingung vorgegeben und das Optimierungsprogramm gelöst.

Optimierungsergebnis. Das Ergebnis beinhaltet neben der Eingangsleistung als Zielfunktionswert die Vorgaben für die Steuerung der Druckerhöhungsanlage. Die detaillierten Ergebnisse für das gesamte Lastprofil sind in Abbildung 4.13 und Tabelle B.12 dargestellt. Die mittlere Eingangsleistung beträgt 0.8616 kW.

¹⁸HIRSCHBERG, „Lastprofil und Regelkurve zur energetischen Bewertung von Druckerhöhungsanlagen (DEA)“, ([30], 2014)

Tabelle 4.16: Lastprofile für die Ermittlung des Energy Efficiency Index, angewandt auf den Nenn-Betriebspunkt der Versuchsanlage.

	Zeitanteil in %	Förderhöhe in mWS	Volumenstrom in m ³ /h
1	6	34.15	0.9768
2	21	35.25	1.954
3	26	36.35	2.931
4	19	37.45	3.907
5	12	38.56	4.884
6	6	39.66	5.861
7	4	40.76	6.838
8	3	41.86	7.815
9	2	42.96	8.792
10	1	44.06	9.768

Die Bestimmung aller notwendigen Eingangsdaten für die Berechnung des EEI aus der Pumpenkennlinie ist möglich. Der erste Schritt ist die Maximierung der Fluidleistung zur Bestimmung des Betriebspunkts maximaler Fluidleistung, im zweiten Schritt erfolgt dann die Berechnung der mindestens erforderlichen mittleren Eingangsleistung durch Lösung eines Minimierungsproblems. Dieser Wert für die Eingangsleistung basiert allein auf den Maschinendaten und stellt eine theoretische untere Schranke für die reale Anlage dar, weil keine Regelungseinflüsse wie beispielsweise Ein- oder Ausschaltverzögerungen oder Hysteresen berücksichtigt werden.

4.4.4 Experimenteller Vergleich der integrierten Regelung mit der optimalen Steuerung

Die Druckerhöhungsanlage verfügt über eine interne Regelung zur Einstellung von Betriebspunkten auf der Druckkontrollkurve. Dazu werden der gemessene Druck und Volumenstrom zur Regelung zurückgeführt und die Anzahl der aktiven Pumpen und deren Drehzahl so an den Anlagenwiderstand angepasst, dass Volumenstrom und Förderhöhe auf der Druckkontrollkurve liegen. Mit dieser Regelung und der Einstellung des Anlagenwiderstands über das Drosselventil wird der Wert für die mittlere Eingangsleistung zur Berechnung des EEI experimentell bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.13

dargestellt¹⁹. Die mittlere Eingangsleistung beträgt 0.8873 kW. Für 60 % Volumenstrom sind beim Betrieb mit Regelung mehr Pumpen (drei) eingeschaltet als von der Optimierung vorgeschlagen (zwei). Die als optimal berechnete Eingangsleistung liegt deshalb um etwa 6.6 % unter dem Messwert für den Betrieb mit der internen Regelung. Für alle anderen Betriebspunkte ist die Anzahl der aktiven Pumpen in Rechnung und Versuch gleich und die Abweichung der berechneten von der gemessenen Eingangsleistung kleiner. Die Steuerungsangaben aus dem Optimierungsergebnis werden in der Anlage anstatt der Regelung verwendet und ebenfalls die Eingangsleistung gemessen. Über das Drosselventil wird der Anlagenwiderstand so eingestellt, dass der Betriebspunkt auf der Druckkontrollkurve liegt und die Ergebnisse ebenfalls in Abbildung 4.13²⁰ aufgetragen. Die mittlere Eingangsleistung dieser Messung beträgt 0.8713 kW.

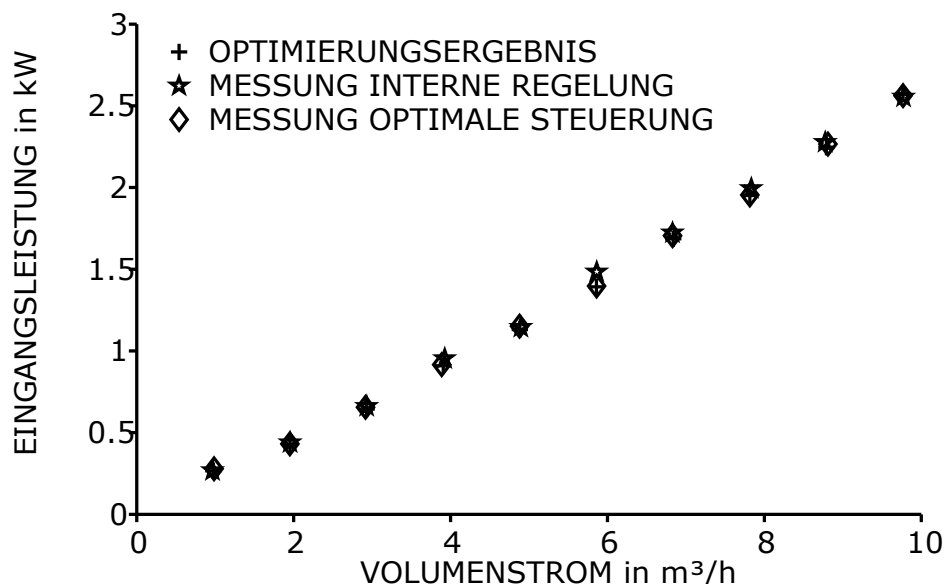


Abbildung 4.13: Vergleich der Eingangsleistungen von Optimierung, Steuerung und Regelung.

Die Werte der Eingangsleistungen für Experiment mit Regelung, Experiment mit Steuerung und Optimierung liegen für einen gegebenen Referenzpunkt des Lastprofils nah beieinander. Der Zeitaufwand für die experimentelle Ermittlung der Werte beträgt mehrere Stunden, wenn der Prüfstand aufgebaut

¹⁹Die Fehlerbalken der Messwerte sind kleiner als die Symbole. Zahlenwerte mit Angabe des Messfehlers sind in Tabelle B.14 tabellarisch aufgetragen.

²⁰sowie Tabelle B.13

und einsatzbereit ist. Ist das Kennfeld der Pumpe bekannt und das Optimierungsprogramm fertig implementiert, liefert der Computer in wenigen Sekunden alle relevanten Daten zur Bestimmung des EEI.

Kapitel 5

Diskussion und Ausblick

Eine Methode zur strukturierten Erstellung eines Optimierungsmodells für Fluidfördersysteme ist in dieser Arbeit vorgeschlagen und erfolgreich auf Druckerhöhungsanlagen angewandt worden. Die Methode gliedert sich in das Forschungsfeld des Technical Operations Research ein und zeigt eine Möglichkeit auf, aus der Systembeschreibung Optimierungsprogramme zu generieren, die mit exakten Verfahren bearbeitet werden können. Die Dokumentation der Strukturierung und deren Anwendung ermöglicht die Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit und zeigt den daraus folgenden Bedarf weiterführender Arbeiten auf.

5.1 Strukturierte Erstellung eines Optimierungsmodells

Die Modellbildung erfordert als ersten Schritt die Klärung der erforderlichen Detailtiefe des Modells. Die Pumpen des Fluidfördersystems werden als Kanten eines Graphen abgebildet. Die Systemgrenzen Ein- und Ausgang werden als Quell- und Senkenknoten des Graphen modelliert. Jede Pumpenkante endet in zwei Knoten, die deren Saug- und Druckstutzen abbilden. In jedem Knoten des Systems existiert eine Druckvariable als Potentialgröße, Flussgrößen werden den Kanten zugeordnet. Das Kennfeld einer Pumpe wird für die jeweilige Kante beschrieben. Dieses Vorgehen zur Modellierung ist auf andere Komponenten, beispielsweise Ventile, direkt anwendbar. Durch die systematische Applikation bekannter Modellierungstechniken entsteht ein nulldimensionales, kennfeldbasiertes Modell eines Fluidfördersystems. Die gewünschte Funktion des Systems ist eine Festvorgabe und damit eine Nebenbedingung des Optimierungsprogramms. Das Ziel ist subjektiv, aber eindeutig formuliert und in der Zielfunktion enthalten. Die Abbildung der

Randbedingungen und Lösungsmöglichkeiten folgt darauf aufbauend. Die gezeigten Optimierungsmodelle verwenden integrale Größen und enthalten damit wenige Details des realen Systems. Für die Modellbildung wird zwischen dem relevanten und irrelevanten Teil der Realität unterschieden (Abbildung 5.1¹). Danach gilt es, den relevanten Teil der Realität abzubilden. Fehlen aus Gründen der bewussten Abstraktion oder unbewussten Ignoranz Teile dieser relevanten Realität wird das Modell unsicher. Enthält das Modell Teile der irrelevanten Realität ist es zu umfangreich. Zu umfangreiche Modelle führen bei der Verwendung exakter Optimierungsverfahren dazu, dass überhaupt keine Lösung mehr in angemessener Zeit gefunden werden kann.

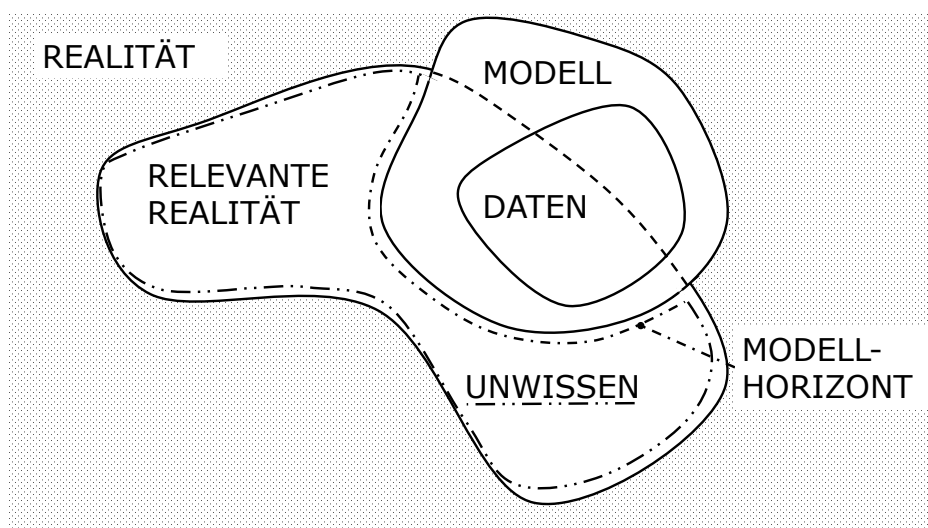


Abbildung 5.1: Überlagerung von Realität, relevanter Realität und Modellhorizont sowie daraus resultierendes Unwissen als graphische Darstellung nach Hedrich und Pelz [26].

Die Gültigkeit der modellbasiert gewonnen Ergebnisse für die Realität ist aufgrund der Fehleranfälligkeit der Modellbildung nicht zwingend gegeben. Für die Überprüfung der Ergebnisse stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung: Der gezeigte Vergleich zweier Implementierungsvarianten desselben Modells muss ähnliche Ergebnisse liefern. Für die Ermittlung eines Energy-Efficiency-Index ist darüber hinaus experimentell die Reproduzierbarkeit der berechneten Werte aufgezeigt worden. Kallrath unterscheidet bei der Modellüberprüfung mit absteigender Aussagekraft zwischen „mathematisch bewei-

¹ HEDRICH, CLOOS, WÜRTEMBERGER UND PELZ, „Comparison of a New Passive and Active Technology for Vibration Reduction of a Vehicle Under Uncertain Load.“, ([26], 2015)

sen“, „falsifizieren oder verifizieren“ und „validieren“². In jedem Fall ist die Anwendung der Modellergebnisse auf die Realität ohne vorherige Evaluation nicht ratsam.

Wird durch den Vergleich von Realität und Optimierungsergebnis eine größere Detailtiefe notwendig, kann die Modellierungssystematik beibehalten und das jeweilige Komponentenmodell erweitert werden. Die Modellierungssystematik ist unabhängig von der Detailtiefe der Komponentenmodelle. Die Optimierung von Fluidsystemen mithilfe der Abbildung als Flussgraphen lässt prinzipiell jede Detailtiefe zu.

5.2 Praktischer Nutzen

Der Nutzen einer Optimierung lässt sich anhand der Gegenüberstellung der gewonnenen Erkenntnisse und des betriebenen Aufwands bewerten. Die Erkenntnisse resultieren dabei aus der Lösung des Optimierungsproblems. Diese ist im Idealfall direkt umsetzbar und auf mehrere gleichartige oder verwandte Probleme übertragbar. Der betriebene Aufwand umfasst den Zeiteinsatz der Modellierung und den Ressourcenbedarf der Berechnung. Im Fall vieler ähnlicher Probleme kann der Modellierungsaufwand einmal groß, das Modell aber dafür häufig einsetzbar sein.

Die Anwendungsgebiete umfassten die Steuerung, Auswahl und Bewertung von Systemen. Die strukturierte Modellbildung ermöglicht die Wiederverwertung von Modellstrukturen für unterschiedliche Anwendungen. Der Aufwand für die Erstellung jedes einzelnen Optimierungsprogramms wird so reduziert. Unterschiedliche Programmtypen (MILP und MINLP) können mit der gleichen Datenbasis erzeugt und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Die Optimierung einer Betriebsstrategie für Druckerhöhungsanlagen mit gegebener Topologie ist mit gemischt-ganzzahligen (nicht)linearen Programmen einfach, zuverlässig und schnell möglich. Für Topologieentscheidungen sollten die Probleme linearisiert werden.

Der wesentliche praktische Nutzen der gezeigten Anwendungsbeispiele resultiert aus der engen Systemgrenze, die direkt um die Druckerhöhungsanlage gezogen wird. Statt große Netzwerke zu betrachten wird die Zusammenstellung und das Betriebsverhalten der Energiezufuhr optimiert. So wird statt einzelner oder weniger ausgewählter Betriebspunkte der gesamte Betriebsbereich betrachtet und mit Optimierungsverfahren behandelt. Die Ergebnisse enthalten garantiert optimale Steuerungsstrategien als Grundlage der Regelungsentwicklung.

² KALLRATH, *Gemischt-ganzzahlige Optimierung : Modellierung in der Praxis*, ([36], 2002)

Im Idealfall führen die gewonnen Erkenntnisse einer Optimierung zu einem betriebswirtschaftlichen Vorteil, also einer Senkung der Kosten gegenüber der ursprünglichen Auslegung oder einer Reduktion der laufenden Ausgaben. Die Topologiebildung führte in allen Praxisbeispielen zu Druckerhöhungsanlagen mit unterschiedlichen Pumpen. Der Einsatz von Gleichteilen wurde vermieden. Der Aufbau und die Inbetriebnahme einer Anlage mit unterschiedlichen Pumpen ist, verglichen mit einer Anlage aus Gleichteilen, mit höherem Komponenten- und Regelungsaufwand verbunden. Ob die erreichten Leistungsreduktionen in diesem Fall den Mehraufwand rechtfertigen, hängt vom tatsächlichen Betriebsverlauf der Anlage ab. Insbesondere häufiges An- und Ausschalten der kleinen Pumpe ist für deren Lebensdauer nicht zuträglich. Der gegenwärtige Stand der Modellbildung erlaubt noch keine integrierte Betrachtung der zu erwartenden Lebensdauer einer Pumpe in Abhängigkeit von der Schalthäufigkeit. Das gesamte Steuerungskennfeld der Druckerhöhungsanlage müsste hierfür in einem einzigen Optimierungsprogramm abgebildet und Annahmen für die Häufigkeit und Art der Lastwechsel getroffen werden. Dass aufgrund dieser teilweise wagen Annahmen und des großen resultierenden Modells noch ein verwertbares Ergebnis entstünde, ist unwahrscheinlich. Die Bestimmung einer Referenz für eine vorhandene Anlage ist ökonomisch eine wertvolle Information: Das Wissen um die bestmögliche Anlage für eine gegebene Funktion und ein Ziel erleichtert die Kaufentscheidung in vielerlei Hinsicht: Zum einen kann natürlich die Entscheidung zugunsten der Lösung des Optimierungsprogramms fallen, darüber hinaus wird so aber auch ein Referenzwert für eine möglicherweise bestehende Anlage geliefert oder die Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte ermöglicht, beispielsweise der Kauf einer geringfügig teureren Anlage mit mehr Gleichteilen.

Die strukturierte Modellbildung erfordert sowohl Kenntnisse des technischen Problems wie auch des Leistungsvermögens der eingesetzten Optimierungswerkzeuge. Die Lösungen müssen oft langwierig plausibilisiert werden, die Fehlersuche ist mühsam. Die Parametrierung eines einmal erstellten Modells und somit die Anpassung auf einen neuen Sachverhalt ist dagegen einfach. Anwendbarkeit der Lösungen auf die Realität erfordert sehr zielstrebiges Vorgehen und Wissen beim Nutzer. Die Leistungsfähigkeit der Optimierungssoftware muss bekannt sein und das Optimierungsergebnis richtig interpretiert und umgesetzt werden, um den Vorteil der exakten Optimierungsverfahren zu erhalten.

Die Anwendung exakter Optimierungsverfahren für praxisrelevante Probleme erfordert große Berechnungsressourcen. Der benötigte Zeitaufwand zur Berechnung ist im Voraus schwer abschätzbar. Die eingesetzte Hardware benötigt mitunter große Speicher und die Software ist im kommerziellen Einsatz selten günstig.

5.3 Ausblick

Die Anwendung und Weiterentwicklung der Arbeitsergebnisse teilt sich in drei Pfade auf: (i) Die systematisierte Modellierung dient als Grundlage einer automatisierten Übersetzung einer Systembeschreibung in ein Optimierungsprogramm. Statt der Parametrierung eines vorbereiteten Optimierungsmodells werden nun Optimierungsprogramme mithilfe einer Systembeschreibungssprache generiert. (ii) Die Anwendung der gezeigten Methoden garantiert globale Optimalität des Ergebnisses innerhalb der Modellgrenzen. Die Marktregulierungsbemühungen der Europäischen Kommission können durch die Methode unterstützt werden. (iii) Die Laufzeit von Lösern zur Auswahl von Pumpen aus einem umfangreichen Katalog ist zu lang. Mit der gezeigten Optimierungssystematik können Beispielinstanzen für die Algorithmenentwicklung schnell und zuverlässig generiert werden.

5.3.1 SHEP: Intuitiv lesbare Problembeschreibung

Die Formulierung von Optimierungsmodellen ist nicht auf den ersten Blick intuitiv lesbar und verständlich. Durch die gezeigte Strukturierung der Modellierung können Modelle durch Parametrierung leicht auf einen neue Anwendungsfälle übertragen werden. Die weiterführende Anwendung der Systematik ist nicht mehr nur die Parametrierung der Modelle, sondern die gänzliche Generierung von Optimierungsprogrammen aus lesbarem, intuitiv nachvollziehbarem Code.

In Zusammenarbeit mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU) wurde parallel zur Entstehung dieser Arbeit die „Sprache für Hocheffiziente Pumpensysteme (SHEP)“ entwickelt³. Die Syntax der Sprache ist speziell auf die Beschreibung von Fluidfördersystemen ausgerichtet. Nach der vollständigen Fertigstellung der Übersetzungsgrammatik übernimmt ein von der MLU entwickelter Compiler vollautomatisiert die Übersetzung der Systembeschreibung in ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MILP). Eine Basis der Übersetzungsgrammatik ist die in dieser Arbeit beschriebene strukturierte Modellierung.

Die Vorteile einer solchen Sprache liegen auf der Hand: Der Modellierungsaufwand beschränkt sich auf die Beschreibung des Systems, die Erstellung des Optimierungsprogramms durch den Computer geht schnell und ist weniger fehleranfällig. Darüber hinaus ist die Formulierung kompakter. Abbildung 5.2 zeigt in leicht gekürzter Darstellung die Beschreibung einer Obermenge

³ SAUL, PÖTTGEN, ZIMMERMANN UND PELZ, „SHEP: An Innovative Language to create and evaluate Optimization Programs for Pump Systems“, ([69], 2016)

```

pipe connection Flange
end

pump Pump_Type_1
  characteristic
    speed head flow power;
    30    1    0    0.009;
    :
    70    5    4    0.103;
    :
    100   1.3  9    0.190;
  costs
    purchase = 500;
  ports
    in Flange;
    out Flange;
end

pump Pump_Type_2
[...]
end

valve Valve_Type_1
  characteristic
    lift flow head;
  [...]
  costs
    purchase = 20;
  ports
    in Flange;
    out Flange;
end

pipe SteelPipe
  ports
    in Flange;
    out Flange;
end

system System_1
  Source S_1;
  Sink T_1;
  Sink T_2;
  SteelPipe Pipe_1 optional;
  SteelPipe Pipe_2 optional;
  Pump_Type_1 Pump_1 optional;
  Pump_Type_2 Pump_2 optional;
  Valve_Type_1 Valve_1 optional;
connections
  S_1 -> Pump_1;
  S_1 -> Pump_2;
  Pump_1 -> Pipe_1;
  Pump_2 -> Pipe_1;
  Pump_1 -> Pipe_2;
  Pump_2 -> Pipe_2;
  Pump_1 -> Valve_1;
  Pump_2 -> Valve_1;
  Valve_1 -> Pipe_2;
  Pipe_1 -> T_1;
  Pipe_2 -> T_2;
objective
  minimize costs;
scenarios
  scenario S1 weight 15000:
    S_1.out.pressure = 0;
    T_1.in.pressure = 4;
    T_1.in.flow = 5;
    T_2.in.pressure = 0;
    T_2.in.flow = 0;
  scenario S2 weight 5000:
    S_1.out.pressure = 0;
    T_1.in.pressure = 3;
    T_1.in.flow = 2;
    T_2.in.pressure = 4.3;
    T_2.in.flow = 3.2;
end

```

Abbildung 5.2: Beispiel für eine Deklaration einer möglichen Systemkonfiguration mit SHEP. Linke Spalte: Definition der verwendeten Komponententypen. Rechte Spalte: Mögliche Komponenten des Systems, potentielle Verschaltung, Zielfunktion und Lastfälle.

von Fluidsystemen zur Erfüllung einer Funktion. Die Übersetzungsgrammatik verwendet über Pumpenmodelle hinaus bereits kennfeldbasierte Modelle für Regelventile und semianalytische Modelle für Rohrleitungen.

Eine SHEP-Datei ist nach derzeitigem Entwicklungsstand einheitenlos, die verwendeten Einheiten entsprechen den industriell gebräuchlichen. Die Beschreibung des Optimierungsproblems beginnt in SHEP mit der Deklaration des Spielfelds. Alle Pumpen- und Ventiltypen werden kennfeldbasiert mit Stützpunkten beschrieben, Rohre sind vorimplementiert und werden nur angelegt. Die möglichen Instanzen der verschiedenen Typen werden zu Beginn der Deklaration festgelegt. Das Schlagwort `optional` gibt an, dass eine Komponente nicht im System enthalten sein muss. Die Verbindungen der Komponenten werden danach beschrieben, Verbindungen optionaler Komponenten sind auch immer optional. Als Zielfunktionen stehen vordefiniert die Minimierung der Anschaffungskosten, der Eingangsleistung sowie der Gesamtkosten zur Verfügung. Die Lastfälle werden zuletzt angegeben.

Intuitiv verständliche Modellierungsumgebungen sind eine notwendige Voraussetzung zum Einsatz der exakten Optimierung im Anwendungsfall. SHEP stellt einen Schritt in Richtung der automatisierten Systemplanung dar, weil es die Optimierung praxisrelevanter Probleme ermöglicht ohne Modellierungserfahrung vorauszusetzen. Derzeitiger Forschungsgegenstand ist die Ausgabe von Gründen für nicht lösbare Optimierungsprobleme.

5.3.2 Product Approach und Systems Approach

Die gezeigten Methoden leisten die Bestimmung des Energy-Efficiency-Index allein aus den vorliegenden Daten der Einzelmaschinen. Darüber hinaus ist für Druckerhöhungsanlagen aus unterschiedlichen Pumpen in der Norm kein Verfahren zur Bestimmung des Referenzpunkts vorgesehen weil die Bestimmung der maximalen Fluidleistung für Kombinationen von Pumpen nicht mehr durch Ablesen aus den Messdaten möglich ist. Die Referenzleistung ist abhängig von der Topologie. Das vorgestellte Optimierungsverfahren schafft hier Abhilfe, die Bestimmung des EEI für ein Pumpensystem aus mehreren Pumpentypen ist problemlos möglich⁴.

Für den von der Europäischen Kommission vorgesehenen Systems Approach für Pumpensysteme ist bisher kein Verfahren bekannt, zu erwarten ist aber, dass bei der Erarbeitung von Bewertungsverfahren für Systeme Optimierungsverfahren Verwendung finden werden. Heuristisch basierte Verfahren sind für eine Bewertung nicht ausreichend, weil die Güteinformation über

⁴ PÖTTGEN UND PELZ, „The best attainable EEI for Booster Stations derived by Global Optimization“, ([65], 2016)

die Lösung fehlt. Exakte Optimierungsverfahren können neben dem Entwurf von Systemen auch zu deren Bewertung dienen.

5.3.3 Optimierungsalgorithmen

Aus den Anwendungsbeispielen wird deutlich, dass Steuerungsprobleme für eine festgelegte Topologie mit Standardsoftware vom Rechner sehr schnell gelöst werden. Wenn das Optimierungsproblem in mehrere kleine, voneinander unabhängige Programme aufgeteilt wird, sind die verfügbaren Programme zur Lösung völlig ausreichend. Eine Vielzahl diskreter Entscheidungen führt aber zu einer derartigen Vergrößerung des Programms, dass dieses entweder nicht mehr in geringer Zeit gelöst wird, oder aber der Speicherbedarf der Suche den verfügbaren Rahmen übersteigt.

Die generierten Optimierungsprogramme sind das Resultat technischer Fragestellungen. Die Verknüpfung von Lastfällen untereinander ist meist nur in sehr wenigen Gleichungen, manchmal nur in der Zielfunktion, gegeben. Das Wissen um das technische System, das zum Optimierungsprogramm geführt hat, kann bei der Entwicklung von effizienten Algorithmen genutzt werden. Altherr⁵ nutzt Dekompositionsverfahren und das Wissen um die Topologie eines Hydrauliksystems zur Erzeugung von primalen Lösungen und dualen Schranken zur Lösung eines Optimierungsprogramms. Weber⁶ verwendet Metaheuristiken zur Generierung von Primallösungen für Pumpensysteme. Die entwickelten Algorithmen sind problemspezifisch entworfen worden und erfordern Anwenderwissen über das System. Die Anbindung dieser Algorithmen als Solver für Anwenderprobleme ist deshalb notwendig und eine Verknüpfung des Algorithmus mit der Modellierungsumgebung, nicht erst mit dem anonymisierten Modell, dringend geboten.

⁵ ALTHERR, „Algorithmic system design under consideration of dynamic processes“, ([3], 2016)

⁶ WEBER, „Optimierung von Druckerhöhungsanlagen“, ([84], 2016)

Zusammenfassung

Pumpen und Pumpensysteme sind in Summe einer der größten Verbraucher elektrischer Energie im heutigen Europa. Die problemspezifische Systemauslegung ist der Schlüssel zu einem System, das genau die gewünschte Funktion erfüllt und dabei sparsam arbeitet. Dem gegenüber steht ein großes Angebot technischer Komponenten unterschiedlicher Hersteller, die ihre Produktpalette verstärkt nicht nur in Katalogen präsentieren, sondern auch die automatische Auswahl eines Produkts für einen gegebenen Betriebspunkt durch einfache Software anbieten.

Die Auswahl einzelner Pumpen mithilfe von Computern ist nicht nur möglich sondern bereits Realität. Wünschenswert ist als nächster Schritt die automatisierte Zusammenstellung und Bewertung von Systemen. Die Anwendung exakter Optimierungsverfahren zur Systemauslegung garantiert dafür die globale Optimalität einer gefundenen Lösung.

Der Einsatz exakter Verfahren zur Systemplanung und Bewertung erfordert einen einfachen Zugang zu deren Nutzung. In dieser Arbeit wird deshalb die strukturierte Modellbildung für Fluidfördersysteme allgemein und Druckerhöhungsanlagen im Speziellen erarbeitet, begründet und beschrieben. Auf der Grundlage eines Flussgraphen werden die technischen Bedingungen zur Modellierung einer Menge möglicher Systeme formuliert und für unterschiedliche praxisrelevante Probleme angewandt.

Die exakte Optimierung wird genutzt, um eine energetisch optimale Steuerung für den Betrieb von Druckerhöhungsanlagen unterschiedlicher Konfiguration auszulegen. Durch die Überlagerung von Betriebs- und Kaufentscheidung erfolgt die automatisierte Auswahl und Zusammenstellung von Einzelpumpen zu optimalen Anlagen für unterschiedliche Lastprofile. Die Garantie der globalen Optimalität erlaubt die Nutzung der Modelle zur Bewertung von Anlagen.

Diese Arbeit zeigt Modellierungstechniken und Praxisanwendungen für Verfahren der exakten Optimierung zur Planung und Bewertung von Fluidsystemen und Druckerhöhungsanlagen.

Literaturverzeichnis

- [1] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti und James B. Orlin. *Network flows: theory, algorithms, and applications*. Prentice hall, 1993.
- [2] Oswin Aichholzer, Franz Aurenhammer, Ferran Hurtado und Hannes Krasser. „Towards compatible triangulations“. In: *Theoretical Computer Science* 296.1 (2003), S. 3–13.
- [3] Lena C. Altherr. „Algorithmic system design under consideration of dynamic processes“. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2016. Diss. Aachen: TU Darmstadt, 2016. ISBN: 978-3-8440-4848-3.
- [4] Lena C. Altherr, Thorsten Ederer, Ulf Lorenz, Peter F. Pelz und Philipp Pöttgen. „Experimental Validation of an Enhanced System Synthesis Approach“. In: *Operations Research Proceedings 2014: Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society (GOR)*. Bd. XIV. 1. Springer, 2016.
- [5] Arbeitskreis der Professoren für Regelungstechnik in der Versorgungstechnik. *Regelungs- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik*. 6., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: VDE-Verl., 2010. ISBN: 9783800732593.
- [6] André Babusch, Thomas Ebert, Karl-Heinz König, Thomas Makoschey, Andreas Millies, Manfred Oraschewski und Bernd Rudol. *Grundlagen der Pumpentechnik*. Wilo SE, 2009.
- [7] Anantharam Balakrishnan und Stephen C Graves. „A composite algorithm for a concave-cost network flow problem“. In: *Networks* 19.2 (1989), S. 175–202.
- [8] Niels Bidstrup, Markus Teepe, Gerhard Berge und Gerhard Ludwig. „Extended Product Approach for Pumps“. In: *Draft Version, Europump* (2014).

- [9] Pascal Bieupoude, Yao Azoumah und Pierre Neveu. „Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and constructal design“. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 36.5 (2012), S. 434–444.
- [10] Jens Burgschweiger, Bernd Gnädig und Marc C. Steinbach. „Optimization models for operative planning in drinking water networks“. In: *Optimization and Engineering* 10.1 (2009), S. 43–73.
- [11] Keely L. Croxton, Bernard Gendron und Thomas L. Magnanti. „A comparison of mixed-integer programming models for nonconvex piecewise linear cost minimization problems“. In: *Management Science* 49.9 (2003), S. 1268–1273.
- [12] George B. Dantzig. *Linear programming and its extensions*. 1963.
- [13] George B. Dantzig. „On the significance of solving linear programming problems with some integer variables“. In: *Econometrica, Journal of the Econometric Society* (1960), S. 30–44.
- [14] George B. Dantzig. *Origins of the simplex method*. ACM, 1990.
- [15] Bastian Dörig, Thorsten Ederer, Philipp Hedrich, Ulf Lorenz, Peter F. Pelz und Philipp Pöttgen. „Technical Operations Research (TOR) Exemplified by a Hydrostatic Power Transmission System“. In: *9th IFK*. 9.IFK Proceedings Vol.1. 2014.
- [16] Matthias Ehrgott. *Multicriteria optimization*. Bd. 491. Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] Leonhard Euler. *Commentationes algebraicae ad theoriam combinationum et probabilitatum pertinentes*. Hrsg. von Louis-Gustave Du Pasquier. Bd. Vol. 7. Teubner, 1923.
- [18] Leonhard Euler. „Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis“. In: *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 8 (1741), S. 128–140.
- [19] Eurostat. Online-Datencode: nrg_105a.
- [20] Hugh Falkner. „EuP Lot 11: Water pumps (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture)“. In: *Endbericht (Entwurf)*. AEA Energy and Environment, Didcot (2007).
- [21] Klaus-Peter Franz. *Kostenmanagement: Wertsteigerung durch systematische Kostensteuerung*. Schäffer-Poeschel, 2002.
- [22] Robert S. Garfinkel und George L. Nemhauser. *Integer programming*. Bd. 4. Wiley New York, 1972.

- [23] Björn Geißler, Antonio Morsi und Lars Schewe. „A new algorithm for MINLP applied to gas transport energy cost minimization“. In: *Facets of Combinatorial Optimization*. Springer, 2013, S. 321–353.
- [24] Tim Groß, Philipp Pöttgen und Peter F. Pelz. „An Analytical Approach for the Optimal Operation of Pumps in Booster Systems“. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* (2017).
- [25] Christopher P. Hamkins. *Entwicklung hocheffizienter Pumpensysteme, Zwischenbericht 2. HJ 2015*. Techn. Ber. KSB AG, 2016.
- [26] Philipp Hedrich, Ferdinand-J. Cloos, Jan Würtenberger und Peter F. Pelz. „Comparison of a New Passive and Active Technology for Vibration Reduction of a Vehicle Under Uncertain Load.“ In: *Applied Mechanics and Materials* 807 (2015), S. 57–66. ISSN: 1660-9336.
- [27] Franz-Josef Heinrichs, Jürgen Klement und Bernd Rickmann. *Druck-erhöhungsanlagen mit drehzahlgeregelten Pumpen: Kommentar zu DIN 1988-500*. Beuth Verlag, 2011.
- [28] Herborner Pumpentechnik GmbH & Co KG. *Lebenszykluskosten: Erläuterung und Berechnung*.
- [29] Heinrich Hertz. „Gesammelte Werke. Band III: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt“. In: *Bull. Amer. Math. Soc.* 1 (1894), 73 DOI: <http://dx.doi.org/10.1090/S0002-9904-1894-00248-1> PII (1894), S. 0002–9904.
- [30] Rainer Hirschberg. „Lastprofil und Regelkurve zur energetischen Bewertung von Druckerhöhungsanlagen (DEA)“. In: *HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, ISSN* (2014), S. 1436–5103.
- [31] Toshimide Ibaraki. „Integer programming formulation of combinatorial optimization problems“. In: *Discrete Mathematics* 16.1 (1976), S. 39–52.
- [32] Robert G. Jeroslow. „Representability in mixed integer programming, I: characterization results“. In: *Discrete Applied Mathematics* 17.3 (1987), S. 223–243.
- [33] Robert G. Jeroslow und James K. Lowe. „Experimental results on the new techniques for integer programming formulations“. In: *Journal of the Operational Research Society* (1985), S. 393–403.
- [34] Robert G. Jeroslow und James K. Lowe. „Modelling with integer variables“. In: *Mathematical Programming at Oberwolfach II*. Springer, 1984, S. 167–184.

- [35] KSB Aktiengesellschaft. *Baureihenheft Movitec 50 Hz*. KSB Aktiengesellschaft, 2014.
- [36] Josef Kallrath. *Gemischt-ganzzahlige Optimierung : Modellierung in der Praxis*. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. ISBN: 3528031417.
- [37] Igor J. Karassik, Joseph P. Messina, Charles C. Heald und Paul Cooper. *Pump handbook*. Bd. 3. McGraw-Hill, 1976.
- [38] Ahmet B. Keha, Ismael R. de Farias und George L. Nemhauser. „Models for representing piecewise linear cost functions“. In: *Operations Research Letters* 32.1 (2004), S. 44–48.
- [39] Oliver Kolb, Antonio Morsi, Jens Lang und Alexander Martin. „Non-linear and mixed integer linear programming“. In: *Mathematical Optimization of Water Networks*. Springer, 2012, S. 55–65.
- [40] Ben Kröse, Ben Krose, Patrick van der Smagt und Patrick Smagt. *An introduction to neural networks*. Citeseer, 1993.
- [41] Ailsa H. Land und Alison G. Doig. „An automatic method of solving discrete programming problems“. In: *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1960), S. 497–520.
- [42] Sebastian Lang, Gerhard Ludwig, Peter F. Pelz und Bernd Stoffel. „General Methodologies of Determining the Energy-Efficiency-Index of Pump Units in the Frame of the Extended Product Approach“. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Rio de Janeiro, Brazil*. Proceedings of the 8th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (2013).
- [43] Jon Lee und Dan Wilson. „Polyhedral methods for piecewise-linear functions I: the lambda method“. In: *Discrete applied mathematics* 108.3 (2001), S. 269–285.
- [44] James K. Lowe. *Modelling with Integer Variables*. Techn. Ber. DTIC Document, 1984.
- [45] MATLAB. *version 8.3.0.532 (R2014a)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2014.
- [46] Robert R. Meyer. „Mixed integer minimization models for piecewise-linear functions of a single variable“. In: *Discrete Mathematics* 16.2 (1976), S. 163–171.
- [47] Allen C. Miller III und Thomas R. Rice. „Discrete approximations of probability distributions“. In: *Management science* 29.3 (1983), S. 352–362.

- [48] Antonio Morsi, Björn Geißler und Alexander Martin. „Mixed integer optimization of water supply networks“. In: *Mathematical Optimization of Water Networks*. Springer, 2012, S. 35–54.
- [49] Iyswarya Narayanan, Venkatesh Sarangan, Arunchandar Vasan, Aravind Srinivasan, Anand Sivasubramaniam, Bhallamudi S. Murt und Shankar Narasimhan. „Efficient booster pump placement in water networks using graph theoretic principles“. In: *Green Computing Conference (IGCC), 2012 International*. IEEE. 2012, S. 1–6.
- [50] George L. Nemhauser und Laurence A. Wolsey. „Integer programming and combinatorial optimization“. In: *Wiley, Chichester. GL Nemhauser, MWP Savelsbergh, GS Sigismondi (1992). Constraint Classification for Mixed Integer Programming Formulations. COAL Bulletin 20 (1988)*, S. 8–12.
- [51] Volker Nissen. *Einführung in evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Springer-Verlag, 2013.
- [52] Lindell E. Ormsbee. „The history of water distribution network analysis: The computer age“. In: *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*. 2006, S. 27–30.
- [53] Lindell E. Ormsbee und Kevin E. Lansey. „Optimal control of water supply pumping systems“. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 120.2 (1994), S. 237–252.
- [54] Manfred Padberg. „Approximating separable nonlinear functions via mixed zero-one programs“. In: *Operations Research Letters* 27.1 (2000), S. 1–5.
- [55] Manfred Padberg und Giovanni Rinaldi. „A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems“. In: *SIAM review* 33.1 (1991), S. 60–100.
- [56] Christoph Pauly und Sonke Brodersen. *TECHNIK KOMPAKT - aktuelles Fachwissen für die Praxis*. Techn. Ber. KSB AG, 2012.
- [57] Peter F. Pelz, Ulf Lorenz und Gerhard Ludwig. „Besser geht’s nicht. TOR plant das energetisch optimale Fluidsystem“. In: *chemie & more* 1/2014 (2014).
- [58] Frank Pettersson und Tapio Westerlund. „Global optimization of pump configurations using binary separable programming“. In: *Computers & chemical engineering* 21.5 (1997), S. 521–529.

- [59] Marc E. Pfetsch, Armin Fügenschuh, Björn Geißler, Nina Geißler, Ralf Gollmer, Benjamin Hiller, Jesco Humpola, Thorsten Koch, Thomas Lehmann, Alexander Martin u. a. „Validation of nominations in gas network optimization: Models, methods, and solutions“. In: *Optimization Methods and Software* 30.1 (2015), S. 15–53.
- [60] Carl Pfeleiderer. *Die Kreiselpumpen*. Springer-Verlag, 2013.
- [61] Patricio Planells Alandi, Pedro Carrión Pérez, José Fernando Ortega Álvarez, Miguel Ángel Moreno Hidalgo und José María Tarjuelo Martín-Benito. „Pumping selection and regulation for water-distribution networks“. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131.3 (2005), S. 273–281.
- [62] Philipp Pöttgen, Thorsten Ederer, Lena C. Altherr, Ulf Lorenz und Peter F. Pelz. „Examination and Optimization of a Heating Circuit for Energy-Efficient Buildings“. In: *Energy Technology* Vol. 4 (2015), S. 136–144. ISSN: 2194-4296.
- [63] Philipp Pöttgen, Thorsten Ederer, Lena C. Altherr und Peter F. Pelz. „Developing a Control Strategy for Booster Stations under Uncertain Load“. In: *Applied Mechanics and Materials* 807 (2015), S. 241–246. ISSN: 1660-9336.
- [64] Philipp Pöttgen und Peter F. Pelz. „Evaluation of Different Approaches for the Optimization of Layout and Control of Booster Stations“. In: *ECCOMAS Congress 2016 - VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 2016.
- [65] Philipp Pöttgen und Peter F. Pelz. „The best attainable EEI for Booster Stations derived by Global Optimization“. In: *3rd International Rotating Equipment Conference (IREC) Pumps, Compressors and Vacuum Technology 2016, Duesseldorf, Germany* (2016).
- [66] Rüdiger Reinhardt, Armin Hoffmann und Tobias Gerlach. *Nichtlineare Optimierung: Theorie, Numerik und Experimente*. Springer-Verlag, 2012.
- [67] Hong S. Ryoo und Nikolaos V. Sahinidis. „A branch-and-reduce approach to global optimization“. In: *Journal of Global Optimization* 8.2 (1996), S. 107–138.
- [68] Salah H.A. Saleh und Tiku T. Tanyimboh. „Coupled topology and pipe size optimization of water distribution systems“. In: *Water resources management* 27.14 (2013), S. 4795–4814.

- [69] Benjamin Saul, Philipp Pöttgen, Wolf Zimmermann und Peter F. Pelz. „SHEP: An Innovative Language to create and evaluate Optimization Programs for Pump Systems“. In: *3rd International Rotating Equipment Conference (IREC) Pumps, Compressors and Vacuum Technology 2016, Duesseldorf, Germany* (2016).
- [70] Alexander Schrijver. *Theory of linear and integer programming*. John Wiley & Sons, 1998.
- [71] Hanif D. Sherali. „On mixed-integer zero-one representations for separable lower-semicontinuous piecewise-linear functions“. In: *Operations Research Letters* 28.4 (2001), S. 155–160.
- [72] Mateusz Sniegucki. „Optimal Cylinder Commutation in Digital Hydraulic Pumps and Motors for Pulsation Minimization“. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2016.
- [73] Bernd Stoffel. „EU-Richtlinien und ihre Auswirkungen auf den Pumpenmarkt - Herausforderung Energieeffizienz“. In: *chemie&more* 6 (2012).
- [74] Bernd Stoffel. „Ecopump work by Europump“. In: *EUROPUMP workshop*. 2013.
- [75] Bernd Stoffel und Johannes Lauer. „Theoretically attainable efficiency of centrifugal pumps“. In: *VDMA project-Final report, Technical University of Darmstadt* (1994).
- [76] Leena Suhl und Taïb Mellouli. *Optimierungssysteme : Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. 3., korrigierte und aktualisierte Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer Gabler, 2013. ISBN: 3642389368.
- [77] Paul Taubert, Bernd Stoffel, Gerhard Ludwig und Peter F. Pelz. „Development of a Standardized Approach to Assess the Energy Efficiency of Booster Pump Units in the Sense of an Extended Product“. In: *3rd International Rotating Equipment Conference (IREC) Pumps, Compressors and Vacuum Technology 2016, Duesseldorf, Germany* (2016).
- [78] Michael Tiller. *Introduction to physical modeling with Modelica*. Bd. 615. Springer Science & Business Media, 2012.
- [79] Michael J. Todd. „Union jack triangulations“. In: *Fixed points: algorithms and applications* (1977), S. 315–336.
- [80] Angela Vergé, Philipp Pöttgen, Lena C. Altherr, Thorsten Ederer und Peter F. Pelz. „Lebensdauer als Optimierungsziel - Algorithmische Struktursynthese am Beispiel eines hydrostatischen Getriebes“. In: *O+P ? Ölhydraulik und Pneumatik* 60.1-2 (2016), S. 114–121.

- [81] Angela Vergé, Philipp Pöttgen und Peter F. Pelz. „Hilfe von TOR - Lebensdauer als Optimierungsziel im automatisierten Systementwurf“. In: *fluid MARKT 2015* B 30510 (2014), S. 47–49. ISSN: 0015-461X.
- [82] Juan P. Vielma, Shabbir Ahmed und George L. Nemhauser. „Mixed-integer models for nonseparable piecewise-linear optimization: unifying framework and extensions“. In: *Operations research* 58.2 (2010), S. 303–315.
- [83] Juan P. Vielma und George L. Nemhauser. „Modeling disjunctive constraints with a logarithmic number of binary variables and constraints“. In: *Mathematical Programming* 128.1-2 (2011), S. 49–72.
- [84] Jonas B. Weber. „Optimierung von Druckerhöhungsanlagen“. Masterarb. Universität Siegen, 2016.
- [85] Tapio Westerlund, Frank Pettersson und Ignacio E. Grossmann. „Optimization of pump configurations as a MINLP problem“. In: *Computers & chemical engineering* 18.9 (1994), S. 845–858.
- [86] Daniel L. Wilson. *Polyhedral methods for piecewise-linear functions*. publisher not identified, 1998.

Anhang A

Pumpenkatalog

Mit Ausnahme der im Prüfstand eingesetzten und gesondert vermessenen Pumpe entstammen alle Pumpen aus der Baureihe Movitec der KSB Aktiengesellschaft¹. Zur Einführung einer einheitlichen Kurz kennzeichnung und der Vermeidung konkreter Produktbezeichnung in der Arbeit, die als Produktempfehlung missverstanden werden könnte, werden die Pumpen durchnummeriert. Die Darstellung aller 226 Pumpen des Baukastens würde 70-80 Seiten umfassen und ist nicht zielführend. Um die Ergebnisse nachvollziehbar zu halten, werden die Kennliniendaten und Fitergebnisse aller tatsächlich für Systemvorschläge verwendeten Pumpen dokumentiert. Bei den angegebenen Kaufpreisen handelt es sich vollständig um Schätzungen.

Für die bessere Einschätzbarkeit der Drehzahl wird darüber hinaus konsequent die Referenzdrehzahl für alle Pumpen wird zu $n_{\text{ref}} = 100 \text{ min}^{-1}$ gesetzt. Diese ist gleich der Maximaldrehzahl $n_{\text{max}} = n_{\text{ref}}$. Die Minimaldrehzahl entspricht 5% dieses Werts $n_{\text{min}} = 5 \text{ min}^{-1}$.

¹ KSB AKTIENGESELLSCHAFT, *Baureihenheft Movitec 50 Hz*, ([35], 2014)

Tabelle A.1: Typ12, Kaufpreis: 346.41 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	92.89	0.3448	$b_{H,0}$	92.89	mWS
0.6	90.6	0.4717	$b_{H,1}$	-4.127	mWS(m ³ /h) ⁻¹
1.222	85.57	0.5948	$b_{H,2}$	0.1318	mWS(m ³ /h) ⁻²
1.622	80.48	0.6802	$b_{H,3}$	-1.331	mWS(m ³ /h) ⁻³
1.815	77.66	0.7254	$b_{P,0}$	0.3448	kW
1.922	75.98	0.7415	$b_{P,1}$	0.2138	kW(m ³ /h) ⁻¹
2.053	73.59	0.7682	$b_{P,2}$	-0.020 45	kW(m ³ /h) ⁻²
2.443	64.58	0.826	$b_{P,3}$	0.020 01	kW(m ³ /h) ⁻³
2.69	56.96	0.85	$b_{P,4}$	-0.005 896	kW(m ³ /h) ⁻⁴
3.027	44.49	0.8659			

Tabelle A.2: Typ14, Kaufpreis: 400.00 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	123.9	0.4597	$b_{H,0}$	123.9	mWS
0.6	120.8	0.6289	$b_{H,1}$	-5.503	mWS(m ³ /h) ⁻¹
1.222	114.1	0.793	$b_{H,2}$	0.1758	mWS(m ³ /h) ⁻²
1.622	107.3	0.9069	$b_{H,3}$	-1.774	mWS(m ³ /h) ⁻³
1.815	103.5	0.9673	$b_{P,0}$	0.4597	kW
1.922	101.3	0.9887	$b_{P,1}$	0.285	kW(m ³ /h) ⁻¹
2.053	98.12	1.024	$b_{P,2}$	-0.027 27	kW(m ³ /h) ⁻²
2.443	86.11	1.101	$b_{P,3}$	0.026 69	kW(m ³ /h) ⁻³
2.69	75.95	1.133	$b_{P,4}$	-0.007 863	kW(m ³ /h) ⁻⁴
3.027	59.32	1.155			

Tabelle A.3: Typ21, Kaufpreis: 547.72 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	232.2	0.8619	$b_{H,0}$	232.2	mWS
0.6	226.5	1.179	$b_{H,1}$	-10.32	mWS(m ³ /h) ⁻¹
1.222	213.9	1.487	$b_{H,2}$	0.3295	mWS(m ³ /h) ⁻²
1.622	201.2	1.7	$b_{H,3}$	-3.327	mWS(m ³ /h) ⁻³
1.815	194.2	1.814	$b_{P,0}$	0.8619	kW
1.922	189.9	1.854	$b_{P,1}$	0.5345	kW(m ³ /h) ⁻¹
2.053	184	1.92	$b_{P,2}$	-0.051 14	kW(m ³ /h) ⁻²
2.443	161.5	2.065	$b_{P,3}$	0.050 04	kW(m ³ /h) ⁻³
2.69	142.4	2.125	$b_{P,4}$	-0.014 74	kW(m ³ /h) ⁻⁴
3.027	111.2	2.165			

Tabelle A.4: Typ27, Kaufpreis: 489.90 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	53.06	0.2563	$b_{H,0}$	53.06	mWS
1.342	51.38	0.4299	$b_{H,1}$	-1.121	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-1}$
2.718	48.27	0.6376	$b_{H,2}$	0.036 04	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$
3.297	46.17	0.7109	$b_{H,3}$	-0.1001	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-3}$
3.936	43.11	0.7745	$b_{P,0}$	0.2563	kW
4.65	38.57	0.8315	$b_{P,1}$	0.094 13	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-1}$
5.031	35.59	0.8499	$b_{P,2}$	0.038 78	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$
5.708	29.22	0.8744	$b_{P,3}$	-0.009 683	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-3}$
6.001	26	0.8814	$b_{P,4}$	0.000 581 9	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-4}$
6.5	19.82	0.885			

Tabelle A.5: Typ34, Kaufpreis: 748.33 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	124.9	0.5981	$b_{H,0}$	124.9	mWS
1.342	120.3	1.003	$b_{H,1}$	-3.197	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-1}$
2.718	114	1.488	$b_{H,2}$	0.3421	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$
3.297	109.3	1.659	$b_{H,3}$	-0.2448	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-3}$
3.936	102.8	1.807	$b_{P,0}$	0.5981	kW
4.65	92.78	1.94	$b_{P,1}$	0.2196	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-1}$
5.031	86.19	1.983	$b_{P,2}$	0.090 47	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$
5.708	72.11	2.04	$b_{P,3}$	-0.022 59	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-3}$
6.001	64.99	2.057	$b_{P,4}$	0.001 357	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-4}$
6.5	51.49	2.065			

Tabelle A.6: Typ51, Kaufpreis: 994.99 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	105.3	0.5961	$b_{H,0}$	105.3	mWS
1.203	102.7	0.8927	$b_{H,1}$	-2.326	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-1}$
2.14	100.5	1.178	$b_{H,2}$	0.1853	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$
2.741	98.96	1.344	$b_{H,3}$	-0.067 69	$\text{mWS}(\text{m}^3/\text{h})^{-3}$
4.22	93.73	1.715	$b_{P,0}$	0.5961	kW
5.45	87.2	1.951	$b_{P,1}$	0.2209	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-1}$
5.879	84.31	2.022	$b_{P,2}$	0.037 08	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-2}$
6.309	81.04	2.071	$b_{P,3}$	-0.007 712	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-3}$
6.827	76.55	2.13	$b_{P,4}$	0.000 343 6	$\text{kW}(\text{m}^3/\text{h})^{-4}$
7.428	70.54	2.168			
8.555	56.61	2.211			

Tabelle A.7: Typ59, Kaufpreis: 1529.71 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	241.4	1.409	$b_{H,0}$	241.4	mWS
1.203	239.8	2.11	$b_{H,1}$	-1.356	mWS(m ³ /h) ⁻¹
2.14	236.7	2.785	$b_{H,2}$	-0.2692	mWS(m ³ /h) ⁻²
2.741	233.1	3.177	$b_{H,3}$	-0.1116	mWS(m ³ /h) ⁻³
4.22	221.9	4.054	$b_{P,0}$	1.409	kW
5.45	207.8	4.612	$b_{P,1}$	0.5221	kW(m ³ /h) ⁻¹
5.879	201.5	4.78	$b_{P,2}$	0.08766	kW(m ³ /h) ⁻²
6.309	194.3	4.895	$b_{P,3}$	-0.01823	kW(m ³ /h) ⁻³
6.827	184.5	5.035	$b_{P,4}$	0.0008122	kW(m ³ /h) ⁻⁴
7.428	171.2	5.124			
8.555	139.9	5.226			

Tabelle A.8: Typ75, Kaufpreis: 1414.21 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	89.26	0.8566	$b_{H,0}$	89.26	mWS
1.98	86.93	1.316	$b_{H,1}$	-1.207	mWS(m ³ /h) ⁻¹
4.11	84	1.786	$b_{H,2}$	0.04433	mWS(m ³ /h) ⁻²
6.03	80.27	2.162	$b_{H,3}$	-0.01513	mWS(m ³ /h) ⁻³
8.08	74.42	2.485	$b_{P,0}$	0.8566	kW
9.35	69.49	2.634	$b_{P,1}$	0.2332	kW(m ³ /h) ⁻¹
10.37	64.62	2.719	$b_{P,2}$	0.0006152	kW(m ³ /h) ⁻²
11.01	61.17	2.755	$b_{P,3}$	-0.0005717	kW(m ³ /h) ⁻³
11.75	56.66	2.78	$b_{P,4}$	1.309×10^{-6}	kW(m ³ /h) ⁻⁴
12.46	51.83	2.784			

Tabelle A.9: Typ94, Kaufpreis: 10 825.32 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	109.6	26.76	$b_{H,0}$	109.6	mWS
8	108.4	26.78	$b_{H,1}$	-0.361	mWS(m ³ /h) ⁻¹
20	105.2	26.83	$b_{H,2}$	0.001706	mWS(m ³ /h) ⁻²
43	96.58	26.51	$b_{H,3}$	-9.833×10^{-6}	mWS(m ³ /h) ⁻³
60	91.36	26.65	$b_{P,0}$	26.76	kW
80	85.17	27.61	$b_{P,1}$	0.002343	kW(m ³ /h) ⁻¹
95	81.12	28.8	$b_{P,2}$	-0.000657	kW(m ³ /h) ⁻²
108.8	77.57	29.88	$b_{P,3}$	1.381×10^{-5}	kW(m ³ /h) ⁻³
121.9	74.16	30.74	$b_{P,4}$	-5.233×10^{-8}	kW(m ³ /h) ⁻⁴
122.1	74.09	30.75			
128.8	71.57	31.17			
145	63.06	32.14			
154	58.36	32.54			
160	54.55	32.68			

Tabelle A.10: Typ111, Kaufpreis: 1837.12 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	85.1	1.241	$b_{H,0}$	85.1	mWS
3	82.94	1.95	$b_{H,1}$	-0.7634	mWS(m ³ /h) ⁻¹
6	80.77	2.642	$b_{H,2}$	0.023 22	mWS(m ³ /h) ⁻²
9	78.15	3.287	$b_{H,3}$	-0.002 69	mWS(m ³ /h) ⁻³
12	74.63	3.855	$b_{P,0}$	1.241	kW
13	73.19	4.022	$b_{P,1}$	0.2358	kW(m ³ /h) ⁻¹
15	69.79	4.316	$b_{P,2}$	0.000 712 2	kW(m ³ /h) ⁻²
16	67.81	4.441	$b_{P,3}$	-0.000 184 3	kW(m ³ /h) ⁻³
17	65.61	4.55	$b_{P,4}$	-8.923×10^{-10}	kW(m ³ /h) ⁻⁴
18	63.19	4.641			
19.5	59.09	4.744			
21.8	51.62	4.811			

Tabelle A.11: Typ127, Kaufpreis: 3092.33 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	239.6	3.518	$b_{H,0}$	239.6	mWS
3	234.4	5.459	$b_{H,1}$	-1.882	mWS(m ³ /h) ⁻¹
6	229.4	7.137	$b_{H,2}$	0.063 93	mWS(m ³ /h) ⁻²
9	223.4	8.987	$b_{H,3}$	-0.007 235	mWS(m ³ /h) ⁻³
12	213.5	10.73	$b_{P,0}$	3.518	kW
13	209.3	11.23	$b_{P,1}$	0.5807	kW(m ³ /h) ⁻¹
15	200.2	12.07	$b_{P,2}$	0.011 57	kW(m ³ /h) ⁻²
16	195.4	12.41	$b_{P,3}$	-0.000 911 3	kW(m ³ /h) ⁻³
17	190.5	12.7	$b_{P,4}$	5.537×10^{-6}	kW(m ³ /h) ⁻⁴
18	185.3	12.95			
19.5	176	13.25			
21.8	152.5	13.51			

Tabelle A.12: Typ137, Kaufpreis: 2795.08 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	100.7	4.038	$b_{H,0}$	100.7	mWS
10	96.65	5.347	$b_{H,1}$	-0.2657	mWS(m ³ /h) ⁻¹
18	90	6.552	$b_{H,2}$	-0.009 281	mWS(m ³ /h) ⁻²
23	83.55	7.208	$b_{H,3}$	-0.000 507 6	mWS(m ³ /h) ⁻³
26	78.64	7.524	$b_{P,0}$	4.038	kW
28	74.89	7.69	$b_{P,1}$	0.099 88	kW(m ³ /h) ⁻¹
33	63.63	7.912	$b_{P,2}$	0.004 227	kW(m ³ /h) ⁻²
			$b_{P,3}$	-0.000 112	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	3.608×10^{-11}	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle A.13: Typ149, Kaufpreis: 4145.78 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	218.2	8.879	$b_{H,0}$	218.2	mWS
10	209.9	11.71	$b_{H,1}$	-0.5668	mWS(m ³ /h) ⁻¹
18	196.3	14.28	$b_{H,2}$	-0.012 35	mWS(m ³ /h) ⁻²
23	182.5	15.65	$b_{H,3}$	-0.001 321	mWS(m ³ /h) ⁻³
26	171.9	16.29	$b_{P,0}$	8.879	kW
28	163.6	16.62	$b_{P,1}$	0.2156	kW(m ³ /h) ⁻¹
33	138.5	16.97	$b_{P,2}$	0.009 26	kW(m ³ /h) ⁻²
			$b_{P,3}$	-0.000 253 3	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	-5.95 × 10 ⁻¹¹	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle A.14: Typ151, Kaufpreis: 4330.13 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	237.7	9.686	$b_{H,0}$	237.7	mWS
10	228.8	12.77	$b_{H,1}$	-0.617	mWS(m ³ /h) ⁻¹
18	214	15.57	$b_{H,2}$	-0.012 86	mWS(m ³ /h) ⁻²
23	199	17.06	$b_{H,3}$	-0.001 457	mWS(m ³ /h) ⁻³
26	187.4	17.75	$b_{P,0}$	9.686	kW
28	178.4	18.1	$b_{P,1}$	0.2349	kW(m ³ /h) ⁻¹
33	151	18.49	$b_{P,2}$	0.0101	kW(m ³ /h) ⁻²
			$b_{P,3}$	-0.000 276 9	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	-1.091 × 10 ⁻¹⁰	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle A.15: Typ156, Kaufpreis: 4000.00 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	97.8	5.538	$b_{H,0}$	97.8	mWS
20	93.56	8.167	$b_{H,1}$	-0.1897	mWS(m ³ /h) ⁻¹
32	87.21	10.17	$b_{H,2}$	0.005 612	mWS(m ³ /h) ⁻²
36	83.41	10.77	$b_{H,3}$	-0.000 319 7	mWS(m ³ /h) ⁻³
38	81.15	11.05	$b_{P,0}$	5.538	kW
40	78.63	11.31	$b_{P,1}$	0.0549	kW(m ³ /h) ⁻¹
50	62.17	12.3	$b_{P,2}$	0.005 872	kW(m ³ /h) ⁻²
54	53.74	12.56	$b_{P,3}$	-0.000 113 7	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	5.698 × 10 ⁻⁷	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle A.16: Typ182, Kaufpreis: 5196.15 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	86.98	7.884	$b_{H,0}$	86.98	mWS
12.5	82.04	8.11	$b_{H,1}$	-0.4766	mWS(m ³ /h) ⁻¹
24	78.44	8.869	$b_{H,2}$	0.008 089	mWS(m ³ /h) ⁻²
35	74.75	9.895	$b_{H,3}$	-0.000 127 2	mWS(m ³ /h) ⁻³
48.74	68.23	11.55	$b_{P,0}$	7.884	kW
50.17	67.36	11.73	$b_{P,1}$	-0.007 096	kW(m ³ /h) ⁻¹
52.41	65.9	12.01	$b_{P,2}$	0.002 019	kW(m ³ /h) ⁻²
52.56	65.8	12.03	$b_{P,3}$	2.207×10^{-6}	kW(m ³ /h) ⁻³
56	63.31	12.43	$b_{P,4}$	-1.826×10^{-7}	kW(m ³ /h) ⁻⁴
60	60.02	12.85			
70	49.61	13.61			
76	41.63	13.91			

Tabelle A.17: Typ207, Kaufpreis: 9000.00 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	112.3	15	$b_{H,0}$	112.3	mWS
36	106.6	18.2	$b_{H,1}$	-0.1534	mWS(m ³ /h) ⁻¹
54	101.9	20.9	$b_{H,2}$	0.000 945	mWS(m ³ /h) ⁻²
72	94.7	23.6	$b_{H,3}$	-3.07×10^{-5}	mWS(m ³ /h) ⁻³
81	89.8	24.9	$b_{P,0}$	15	kW
85	87.2	25.5	$b_{P,1}$	0.027 26	kW(m ³ /h) ⁻¹
90	83.8	26.1	$b_{P,2}$	0.002 15	kW(m ³ /h) ⁻²
110	66	27.9	$b_{P,3}$	-1.177×10^{-5}	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	-3.046×10^{-9}	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle A.18: Typ221, Kaufpreis: 7794.23 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	73.1	8.7	$b_{H,0}$	73.1	mWS
36	69.6	11.1	$b_{H,1}$	-0.076 48	mWS(m ³ /h) ⁻¹
54	65.9	13.3	$b_{H,2}$	0.000 440 1	mWS(m ³ /h) ⁻²
72	59.5	15.5	$b_{H,3}$	-2.781×10^{-5}	mWS(m ³ /h) ⁻³
81	55	16.3	$b_{P,0}$	8.7	kW
85	52.7	16.6	$b_{P,1}$	-0.003 473	kW(m ³ /h) ⁻¹
90	49.5	16.9	$b_{P,2}$	0.002 509	kW(m ³ /h) ⁻²
110	33	16.9	$b_{P,3}$	-1.547×10^{-5}	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	-8.144×10^{-9}	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle A.19: Typ226, Kaufpreis: 11 022.70 €.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWS	Leistung in kW	Fitparameter		
0	157.3	19.5	$b_{H,0}$	157.3	mWS
36	149.5	24.3	$b_{H,1}$	-0.192	mWS(m ³ /h) ⁻¹
54	142.3	28.5	$b_{H,2}$	0.001 152	mWS(m ³ /h) ⁻²
72	130.5	32.6	$b_{H,3}$	-5.081×10^{-5}	mWS(m ³ /h) ⁻³
81	122.3	34.4	$b_{P,0}$	19.5	kW
85	118.1	35.1	$b_{P,1}$	0.023 21	kW(m ³ /h) ⁻¹
90	112.3	35.9	$b_{P,2}$	0.003 884	kW(m ³ /h) ⁻²
110	82.5	37.2	$b_{P,3}$	-2.2×10^{-5}	kW(m ³ /h) ⁻³
			$b_{P,4}$	-1.75×10^{-8}	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Anhang B

Detaillierte Ergebnisse

B.1 Ergebnisse zur Auswahl einer Druckerhöhungsanlage

Tabelle B.1: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Druckerhöhung 1 (DE1). Die Rechenzeit betrug 23.26 h.

Zeit- anteil	Last		Optimale Lösung		
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h	Eingangs- leistung in kW	Typ27 in min ⁻¹	Typ137 in min ⁻¹
0.109	46.50	3	0.6629	99.28	
0.026	48	6	1.820		70.23
0.137	49.50	9	2.199		72.33
0.072	51	12	2.646		74.61
0.119	52.50	15	3.138		77.18
0.169	54	18	3.703		80.07
0.089	55.50	21	4.343		83.31
0.051	57	24	5.048		86.83
0.088	58.50	27	5.837		90.80
0.140	60	30	6.716		94.85

Tabelle B.2: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Druckerhöhung 2 (DE2). Die Rechenzeit betrug 12.25 h.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung Drehzahl	
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Typ94 in min ⁻¹	Typ182 in min ⁻¹
0.109	46.50	20	4.222		77.29
0.026	48	40	6.737		83.59
0.137	49.50	60	10.96		94
0.072	51	80	15.02	79.92	
0.119	52.50	100	18.09	83.75	
0.169	54	120	22.28	88.91	
0.089	55.50	140	27.03	86.49	87.45
0.051	57	160	31.19	89.22	91.58
0.088	58.50	180	36.48	92.88	96.11
0.140	60	200	42.35	97.15	100

Tabelle B.3: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Druckerhöhung 3 (DE3). Die Rechenzeit betrug 5.006 h.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung Drehzahl		
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Typ21 in min ⁻¹	Typ59 in min ⁻¹	Typ151 in min ⁻¹
0.109	155	3	2.128		82.73	
0.026	160	6	3.854		91.77	
0.137	165	9	6.312	93.17	97.81	
0.072	170	12	9.536			87.52
0.119	175	15	11.06			89.93
0.169	180	18	12.80			92.65
0.089	185	21	14.70			95.66
0.051	190	24	16.83			98.92
0.088	195	27	20.04		92.17	100
0.140	200	30	23.26	97.93	100	100

Tabelle B.4: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Boilerfeed 1 (BF1). Die Rechnung wurde nach 24.01 h abgebrochen.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung		
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Drehzahl		
				Typ12 in min ⁻¹	Typ51 in min ⁻¹	Typ111 in min ⁻¹
0.084	18.15	3	0.2296		47.37	
0.281	21.60	6	0.5880			53.45
0.196	25.35	9	1.021		51.67	58.25
0.162	29.40	12	1.508		57.25	64.28
0.142	33.75	15	2.113		62.20	70.95
0.093	38.40	18	3.294	100	82.33	71.50
0.036	43.35	21	3.768		76.25	83.97
0.005	48.60	24	4.845		82.97	90.96
0.001	54.15	27	6.119		87.58	99.04
0	60	30	7.751	100	100	99.94

Tabelle B.5: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Boilerfeed 2 (BF2). Die Rechnung wurde nach 24.01 h abgebrochen.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung	
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Drehzahl	
				Typ94 in min ⁻¹	Typ156 in min ⁻¹
0.084	18.15	20	1.353		48.63
0.281	21.60	40	3.589	50.27	
0.196	25.35	60	5.529	56.85	
0.162	29.40	80	8.082	63.57	
0.142	33.75	100	11.78	71.59	
0.093	38.40	120	15.95	73.21	68.52
0.036	43.35	140	21.24	80.37	74.21
0.005	48.60	160	27.63	87.28	81
0.001	54.15	180	35.13	94.94	85.75
0	60	200	44.10	100	98.25

Tabelle B.6: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Boilerfeed 3 (BF3). Die Rechnung wurde nach 24.01 h abgebrochen.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung		
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Typ21 in min ⁻¹	Drehzahl Typ59 in min ⁻¹	Typ151 in min ⁻¹
0.084	60.50	3	0.7632		54.10	
0.281	72	6	1.883	61.55	64.83	
0.196	84.50	9	3.466			61.92
0.162	98	12	4.855			67.58
0.142	112.5	15	6.628			73.73
0.093	128	18	8.720			79.90
0.036	144.5	21	11.24			86.33
0.005	162	24	14.23			92.82
0.001	180.5	27	17.70			99.51
0	200	30	23.30	99.70	99.62	99.91

Tabelle B.7: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Kühlung 1 (KU1). Die Rechenzeit betrug 9.057 h.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung	
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Drehzahl Typ137 in min ⁻¹	
0.099	33	3	0.9352	57.83	
0.057	36	6	1.234	60.98	
0.063	39	9	1.644	64.62	
0.069	42	12	2.091	68.16	
0.125	45	15	2.636	72.16	
0.085	48	18	3.255	76.25	
0.079	51	21	3.972	80.58	
0.080	54	24	4.783	85.14	
0.067	57	27	5.696	90	
0.276	60	30	6.716	94.85	

Tabelle B.8: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Kühlung 2 (KU2). Die Rechenzeit betrug 6.402 h.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung		
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Drehzahl		Typ182 in min ⁻¹
				Typ94 in min ⁻¹		
0.099	33	20	2.735		65.75	
0.057	36	40	5.074		74.43	
0.063	39	60	9.075		87.42	
0.069	42	80	12.01	73.54		
0.125	45	100	15.36	78.86		
0.085	48	120	20.04	85.57		
0.079	51	140	24.65	82.90	85.51	
0.080	54	160	29.59	86.84	90.82	
0.067	57	180	35.62	90.91	97.42	
0.276	60	200	42.35	97.15	100	

Tabelle B.9: Details zu Anforderung und Optimierungsergebnis für den Lastfall Kühlung 3 (KU3). Die Rechenzeit betrug 8.335 h.

Zeit- anteil	Last		Eingangs- leistung in kW	Optimale Lösung		
	Förder- höhe in mWS	Volumen- strom in m ³ /h		Drehzahl		Typ151 in min ⁻¹
				Typ21 in min ⁻¹	Typ59 in min ⁻¹	
0.099	110	3	1.451		70.46	
0.057	120	6	2.924		82.77	
0.063	130	9	5.106	85.75	90.53	
0.069	140	12	7.495			79.86
0.125	150	15	9.183			83.67
0.085	160	18	11.21			88.01
0.079	170	21	13.40			92.24
0.080	180	24	15.90			96.80
0.067	190	27	19.25			97.94
0.276	200	30	23.26	97.93	100	100

B.2 Ergebnisse zum Energy-Efficiency-Index

Tabelle B.10: Ergebnisse der Kennfeldmessung am Prüfstand, angegeben ist das Kennfeld für eine Pumpe. Während der Messung waren drei baugleiche Pumpen in Parallelschaltung gleichzeitig in Betrieb. Die Messwerte der elektrischen Leistung sind um den Mittelwert der Eingangsleistung ohne Pumpenbetrieb (74.2 W) bereinigt, die Werte für Volumenstrom und Eingangsleistung sind bereits pro Pumpe angegeben.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWs	Eingangsleistung in kW
0	66.38 ± 0.17	0.3799 ± 0.0011
0.2301 ± 0.0112	65.16 ± 0.20	0.4192 ± 0.0005
1.208 ± 0.012	60.99 ± 0.10	0.5905 ± 0.0005
1.370 ± 0.012	60.16 ± 0.10	0.6170 ± 0.0004
1.467 ± 0.012	59.66 ± 0.08	0.6341 ± 0.0010
1.610 ± 0.013	58.90 ± 0.09	0.6584 ± 0.0003
1.921 ± 0.013	57.06 ± 0.12	0.7082 ± 0.0004
2.256 ± 0.014	54.60 ± 0.17	0.7553 ± 0.0004
2.619 ± 0.015	51.31 ± 0.20	0.8000 ± 0.0006
2.941 ± 0.012	47.97 ± 0.21	0.8338 ± 0.0006
3.702 ± 0.014	37.32 ± 0.21	0.8799 ± 0.0005
4.590 ± 0.014	20.34 ± 0.30	0.8634 ± 0.0009

Tabelle B.11: Parameter für den Fit der Kennlinie einer Pumpe im Prüfstand.

$b_{H,0}$	66.38	mWS
$b_{H,1}$	-4.778	mWS(m ³ /h) ⁻¹
$b_{H,2}$	0.7761	mWS(m ³ /h) ⁻²
$b_{H,3}$	-0.4341	mWS(m ³ /h) ⁻³
$b_{P,0}$	0.3799	kW
$b_{P,1}$	0.1651	kW(m ³ /h) ⁻¹
$b_{P,2}$	0.016 19	kW(m ³ /h) ⁻²
$b_{P,3}$	-0.007 467	kW(m ³ /h) ⁻³
$b_{P,4}$	0.000 244 3	kW(m ³ /h) ⁻⁴

Tabelle B.12: Optimierungsergebnis für die optimale Steuerung der Pumpenkonfiguration zur Erfüllung des Lastprofils des Energy Efficiency Index.

Eingangsleistung in kW	Drehzahl in min^{-1}	Anzahl Pumpen
0.2660	75.11	1
0.4265	81.29	1
0.6442	90.55	1
0.9088	83.39	2
1.131	87.98	2
1.392	93.29	2
1.686	88.66	3
1.951	92.17	3
2.246	95.96	3
2.576	100	3

Tabelle B.13: Messergebnisse für Umsetzung der optimalen Steuerung zur Erfüllung des Lastprofils des Energy Efficiency Index im Prüfstand.

Volumenstrom in m^3/h	Förderhöhe in mWs	Eingangsleistung in kW
0.9864 ± 0.0377	33.78 ± 0.54	0.3526 ± 0.0002
1.952 ± 0.040	34.50 ± 0.23	0.5053 ± 0.0002
2.917 ± 0.046	36.40 ± 0.22	0.7297 ± 0.0010
3.888 ± 0.036	36.62 ± 0.23	0.9904 ± 0.0005
4.880 ± 0.039	38.20 ± 0.36	1.226 ± 0.001
5.862 ± 0.038	38.72 ± 0.19	1.472 ± 0.001
6.829 ± 0.042	40.70 ± 0.35	1.780 ± 0.002
7.815 ± 0.040	41.41 ± 0.30	2.029 ± 0.001
8.810 ± 0.039	42.77 ± 0.23	2.340 ± 0.001
9.769 ± 0.042	43.62 ± 0.23	2.637 ± 0.002

Tabelle B.14: Messergebnisse für die Erfüllung des Lastprofils des Energy Efficiency Index im Prüfstand durch die interne Regelung.

Volumenstrom in m ³ /h	Förderhöhe in mWs	Eingangsleistung in kW	Anzahl Pumpen
0.9662 ± 0.0369	34.49 ± 0.21	0.3422 ± 0.0002	1
1.955 ± 0.041	35.59 ± 0.22	0.5127 ± 0.0022	1
2.933 ± 0.040	36.70 ± 0.20	0.7355 ± 0.0034	1
3.926 ± 0.035	37.84 ± 0.30	1.0277 ± 0.0020	2
4.897 ± 0.043	38.88 ± 0.31	1.219 ± 0.001	2
5.863 ± 0.042	40.03 ± 0.53	1.558 ± 0.003	3
6.829 ± 0.039	41.10 ± 0.31	1.797 ± 0.002	3
7.835 ± 0.045	42.18 ± 0.28	2.069 ± 0.005	3
8.776 ± 0.038	43.20 ± 0.26	2.351 ± 0.006	3
9.775 ± 0.041	43.36 ± 0.17	2.628 ± 0.003	3

Anhang C

Hardware und Software

C.1 Hardware

Die Workstation zur Erzeugung der im Anwendungskapitel gezeigten Ergebnisse hat die in Tabelle C.1 gezeigten Spezifikation.

Tabelle C.1: Spezifikation der genutzten Workstation.

Intel(R) Core(TM) i7-3820 CPU @ 3.60GHz
Arbeitsspeicher: 64 GB
Auslagerungsdatei: 50 GB
64-Bit-Betriebssystem
Windows 10
Updatedienst deaktiviert

C.2 Optimierungssoftware

Alle Optimierungsprogramme sind AIMMS 4.10.X implementiert worden. Hierfür wurde ein Framework gemäß der beschriebenen Modellierungssystematik entworfen und konsequent wiederverwendet. AIMMS bietet zur Modellierung eine grafisch unterstützte Umgebung anstelle eines reinen Texteditors. Die Deklaration von Mengen, Parametern, Variablen, und Nebenbedingungen erfolgt übersichtlich in einer Baumstruktur. Die mathematischen Programme werden ebenfalls in der Baumstruktur definiert. Für jedes Programm kann der gesamte Baum, aber auch nur Teile davon als Bestandteil des Optimierungsprogramms genutzt werden. Funktionen und Skripte werden als eigene Elemente in der Struktur implementiert und per Aufruf oder Rechtsklick ausgeführt.

Solver sind direkt an die Modellierungsumgebung angebunden, ihr Aufruf erfolgt über ein Skript oder Programm. Die Parametrierung der Optimierungsprobleme erfolgt ebenfalls im jeweils genutzten Skript. Für die Lösung der Optimierungsprogramme wurden GUROBI 6.0 für gemischt-ganzzahlige lineare Programme und BARON 15 für gemischt-ganzzahlige nichtlineare Programme genutzt. Bei beiden Solvtern handelt es sich um globale Optimierer. Außer für das dokumentierte Zeitlimit der Rechnungen wurden alle Standardeinstellungen beibehalten. Die Einstellung der MI(N)LP-Gap beträgt (10^{-6}) .

Das in Kapitel 4.2.3 gezeigte Versagen des nichtlinearen Solvers ist in Abbildung C.1 dargestellt. Die diskrete Entscheidung in einigen Punkten wirkt unglaublich, da für die Umgebung eine andere Entscheidung getroffen worden ist. Die Berechnung der spezifischen Punkte mit Erzwingen einer anderen diskreten Entscheidung liefert ein besseres Ergebnis. Die Fehler wirken zufällig, sind aber reproduzierbar und treten auch bei Wechsel der Hardware an der gleichen Stelle auf. Veränderung der Einstellungen (Beispielsweise die Aktivierung des Presolve) behebt die aufgetretenen Fehler, erzeugt aber neue an anderer Stelle. Auch ein anderer nichtlinearer Solver bringt keine Verbesserung. Alle suboptimalen gefundenen Lösungen sind nicht weit von der optimalen Lösung entfernt, die MINLP-Gap ist aber kleiner.

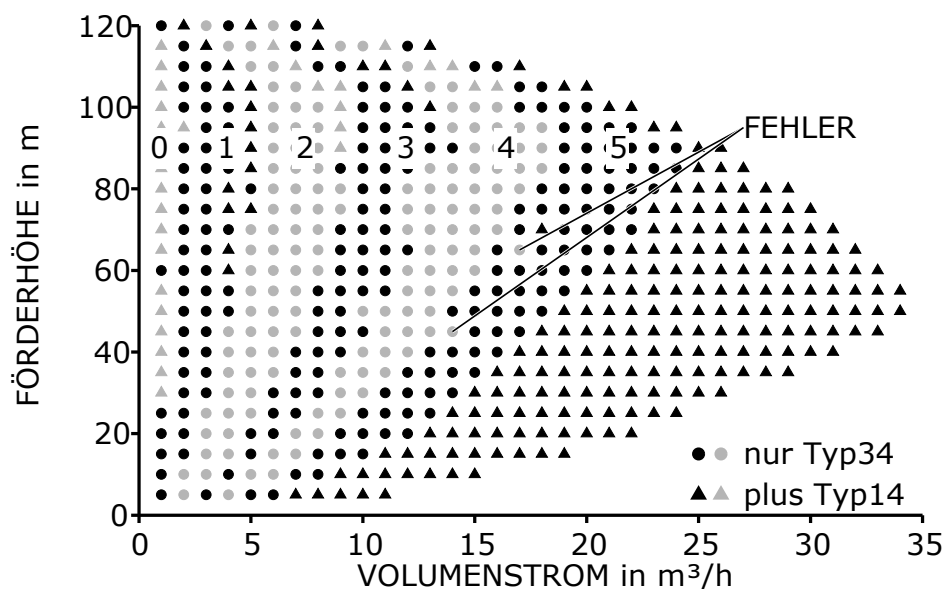


Abbildung C.1: Optimierungsergebnis des nichtlinearen Solvers für die Steuerung einer Druckerhöhungsanlage aus fünf Pumpen 'Typ34' und einer Pumpe 'Typ14'. Markiert sind zwei Beispiele für Fehler: An diesen Stellen gibt der Solver eine zulässige, aber suboptimale Lösung aus.