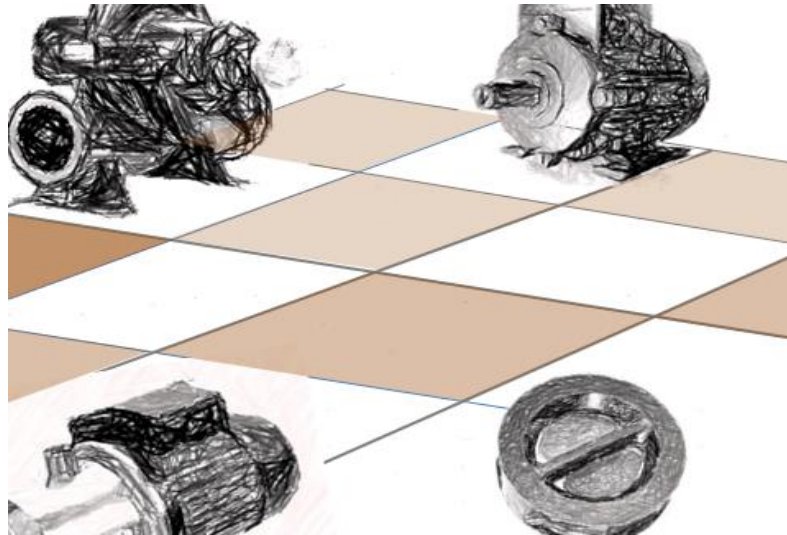


Besser geht's nicht! TOR plant das energetisch optimale Fluidsystem

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz, PD Dr. Ulf Lorenz
Technische Universität Darmstadt
Institut für Fluidsystemtechnik



1

Abb. 1: Module werden zum System.

Zusammenfassung

Nennenswerte Energieeinsparung bei energieverbrauchenden Fluidsystemen erfordert eine globaloptimale Systemoptimierung, die robust gegenüber Unsicherheiten in der Lasthistorie ist. Es ist daher ein Umdenken erforderlich von einer Produktskalierung (Product Approach, Extended Product Approach) hin zu einer Systemoptimierung (System Approach).

Der Planer muss dabei wie ein Schachspieler Szenarien solange durchspielen und bewerten bis die Systemtopologie gefunden ist, bei der die minimale Energie zur Erreichung einer Prozessfunktion notwendig ist. Aufgrund der Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten kann dies nur mit Hilfe von Computern und intelligenten Algorithmen gelingen.

An der TU Darmstadt entwickelt eine Gruppe von Mathematikern und Ingenieuren am Institut für Fluidsystemtechnik den virtuellen Anlagenplaner TOR [1]. Dabei steht TOR sowohl für den virtuellen Planer

als auch für die neue Forschungsrichtung „Technical Operational Research“.

Einführung

Bittet man heute drei unterschiedliche Anlagenplaner A, B, C eine Prozessfunktion (Flüssigkeitsförderung, Kühlen, Heizen, ...) zu erfüllen, so ist wahrscheinlich, dass sich die drei Anlagen in Topologie, Regelung und insbesondere im Energieverbrauch wesentlich unterscheiden. Dabei ist der erfahrene Anlagenplaner zuweilen in der Lage, Funktionalität und Effizienz zu vereinen. Ein unerfahrener Anlagenplaner ist das jedoch oft nicht. D.h. um wesentliche Energieeinsparungen zu erreichen, muss der Anlagenplaner Entscheidungshilfen bekommen. Insbesondere fehlt ein absoluter Maßstab, an dem die geplante oder sogar ausgeführte Anlage zu bemessen ist. Bei Fluidkraftsystemen (z.B. Wind, Wasser, Wellenkraft, ...) ist solch ein Maßstab zumeist vorhanden bei Fluidarbeitssystemen aber nicht. Es hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass die Existenz solch eines Maßstabes bei regenerativen Energien wesentlicher Technologietreiber ist.

2

Unbestritten ist zudem, dass selbst bei einem System, welches nur aus Modulen besteht, die alle die Ökodesignrichtlinie erfüllen, ein erheblicher Teil der zugeführten Energie ungenutzt durch Drosselverluste irreversibel in Wärmeenergie gewandelt wird. Es ist also deutlich zu kurz gedacht, die Ökodesignrichtlinie nur bis zum Extended Product Approach zu denken und umzusetzen. Provokant formuliert kann man sagen, dass es durchaus möglich ist aus einer Reihe maschinenbaulicher Perlen, die durch Effizienz glänzen, ein energetisch schlechtes System zu planen, welches durch Ineffizienz auffällt. Der Praktiker weiß, dass dies leider eher die Regel als die Ausnahme ist.

Im vorliegenden Artikel adressieren wir drei Punkte:

1. Wir möchten über einen **absoluten Maßstab** für den Energieverbrauch von Fluidarbeitssystemen sprechen. Wie wir sehen werden, ist dieser absolute Maßstab im Charakter vergleichbar mit der maximal möglichen Energieumsetzung bei Fluidkraftsystemen [3], [4], [2]. Nochmals: Dieser absolute Maßstab fördert Innovationen, schafft Wettbewerbsvorteile und ist damit zugleich ökonomisch wie ökologisch gewünscht. Dies kann ein relativer Vergleich (z.B. Vergleich mit einem

realen Referenzsystem, Gebäude, ...) nicht erfüllen. Im Gegenteil: Der relative Maßstab wird Innovationen behindern.

2. Wir wollen Planern, Betreibern und Gesetzgebern *Entscheidungshilfen* in die Hand geben, um Systeme auszulegen, zu betreiben bzw. deren energetische Qualität zu überprüfen. Dabei ist uns sehr wohl bewusst, dass bei Systemen die Frage der Verantwortung deutlich schwieriger zu beantworten ist im Vergleich zu Produkten oder erweiterten Produkten. Die Klärung der politischen Diskussion ist aber die Aufgabe anderer. Als Forscher haben wir die Aufgabe Methoden bereitzustellen, die einen dazu führen zu sagen: Besser geht's nicht. Mein Kollege, der Wirtschaftsmathematiker Professor Alexander Martin entwickelte aus dem Satz „das Bessere ist des Guten Feind“, der bildhaft für eine inkrementelle Verbesserung steht, den Satz „das Optimum ist des Besseren Feind“. Dies führt uns zum dritten Punkt:
3. Wir wollen die *Mathematische Optimierung TOR* diskutieren und Planer, Betreiber und Gesetzgeber sensibilisieren für die Suche nach einem globalen Optimum. Um wiederum plakativ zu sein: Wenn Ingenieure heute „optimieren“, dann „drehen“ sie durchaus sophisticated mittels Algorithmen (Evolutionäre Algorithmen,...) solange an Parametern, bis eine gute Lösung verbessert ist. Die genannten Ingenieure A, B, C nennen die Lösung dann ein „Optimum“. Tatsächlich ist die gefundene Konfiguration zumeist weit von einem energetischen Optimum entfernt, da die wesentliche Größe, die Topologie des Fluidsystems, d.h. die Auswahl der Komponenten, die Verschaltung, ... überhaupt nicht variiert worden ist. Schaut man sich die heute verfügbaren mathematischen „Optimierungswerkzeuge“ an, dann sind die Ingenieure A, B, C entschuldigt. Nur ansatzweise finden sich Methoden der diskreten Optimierung im Ingenieurwesen, obwohl sie sehr hilfreich sein können. Die Topologieoptimierung verlangt Entscheidungen der Art: Verwende ich die eine Komponente oder eine andere. Die Entscheidung ist also diskret, 0 oder 1. Entscheidungshilfen in der Mathematischen Optimierung sind als OR-Methoden (Operational Research) insbesondere in den Wirtschaftswissenschaften bekannt. Wir verdeutlichen unser Anliegen an einem einfachen System, einer Druckerhöhungsanlage. Optimiert wird mittels TOR (Technical Operational Research), das als Methode in Darmstadt entwickelt wurde und wird, um eine globaloptimale Lösung zu

erarbeiten, an der sich die Planer A, B, C messen können, bzw. die Planer unterstützt.

Die TOR Pyramide



Abb. 2: Die TOR Pyramide.

4

Ergänzend zum V-Modell sehen wir eine Pyramide aus 7 Schritten, bzw. 3 Fragen und 4 Antworten, die explizit auf die Optimierung von Systemen zugeschnitten ist. Dabei steigt die zeitliche und räumliche Granularität der Systemauslegung und Systemrealisierung von oben nach unten. Die Pyramide ist in den letzten 3 Jahren in Darmstadt gereift und unter anderem durch Gespräche mit Industriepartnern gewachsen (vgl. Abb. 2).

1. **Was ist die Funktion?** Ursprünglich stand am Anfang die Frage der Systemgrenze, doch Dr.-Ing. Joachim Schullerer, KSB AG, formulierte im Gespräch den schönen und einfachen Satz: „Zu einem System gehört alles, was zur Erfüllung der Funktion notwendig ist“. D.h. die erste Frage muss die nach der Funktion und der Lasthistorie sein. Die Funktion kann häufig mit Sicherheit formuliert werden. Die Lasthistorie demgegenüber kann häufig nur mit großer Unsicherheit angegeben werden. TOR hat als virtueller Anlagenplaner die Aufgabe robuste Lösungen zu finden. Robust bedeutet, dass die Systemauslegung auch bei schwankenden Lasten rückblickend die Richtige war. Bei der Diskussion um Unsicherheit und Sicherheit sei

angemerkt, dass die größten Unsicherheiten in der Systemauslegung heute bei der Annahme der Lasten entstehen.

2. **Was ist mein Ziel?** Eine Funktion kann entweder mit **geringem Aufwand** (minimaler Energieaufwand, minimale Investitionen, minimaler Materialeinsatz, ...) oder mit **hoher Verfügbarkeit** (geringe Ausfallwahrscheinlichkeit, hohe Lebensdauer, geringe Verstopfungsgefahr, geringe Wartungskosten, ...) erfüllt werden. Ein Anlagenplaner wird ggf. die Frage anders beantworten als ein Betreiber bzw. Besitzer. Auf alle Fälle wird ein Anlagenplaner andere Schwerpunkte setzen wollen als ein Gesetzgeber. Zusammengefasst gilt: Die Festlegung des Ziels macht die Optimierungsaufgabe von TOR subjektiv und je nach Zielfestlegung liefert TOR eine andere Antwort. Die Methode ist davon zunächst unbeeindruckt. Es soll hier nur verdeutlicht werden, dass bei der Beantwortung der Frage „Was ist mein Ziel?“ politisches Handeln herrscht.
3. **Wie groß ist das Spielfeld?** Bei einem Schachspiel (vgl. Eingangsbild) sind das Spielfeld und die Regeln festgelegt. Gleiches muss auch für die virtuelle Anlagenplanung mittels TOR gelten. D.h. es muss eine Vorauswahl an Komponenten ermittelt werden. Dabei entscheidet TOR darüber, ob eine Komponente Verwendung findet oder nicht. TOR entscheidet auch über den optimalen Betrieb der ausgewählten Komponenten und deren Topologie. Wichtig ist aber festzuhalten: Sollte es eine technische Lösung geben, die nicht im Spielfeld enthalten ist, oder sollte eine Kombinationsmöglichkeit durch Restriktionen ausgeschlossen sein, so kann TOR auch keine Lösung hierfür finden. D.h. TOR kann nicht an die Stelle der menschlichen Imagination (vgl. Binswanger [4]) bzw. Kreativität außerhalb derzeit denkbarer Lösungen treten.

5

Durch Beantwortung der Fragen 1 bis 3 sind alle wesentlichen Entscheidungen getroffen, obgleich doch noch gar kein System ausgelegt wurde.

4. **Suche das optimale System!**

Bei der Beantwortung dieser Frage wird zunächst ein vollständiger Graph aus allen Komponenten gebildet, d.h. alle Verbindungen und Komponenten werden in das Kalkül genommen. TOR wählt aus diesem Graphen einen Teilgraphen

je nach Ziel aus. Dies kann z.B. die minimale Energie zur Erfüllung einer Prozessfunktion sein. Je nach Spielfeld können auch einzelne Designparameter eines Moduls mit in die Optimierung genommen werden.

5. **Evaluiere mittels Modellen!**

Die gefundene Lösung wird mittels physikalisch-technisch-ökonomischen Modellen mit konzentrierten Parametern (sogenannte 0-dimensionale Modelle und nicht 1-dimensionale Modelle wie häufig fälschlich behauptet) validiert. Wir nutzen hierzu den Sprachstandard Modelica [5] der sich zunehmend zur Beschreibung von gekoppelten technischen Systemen durchsetzt. Die Beschreibung der Komponenten in Algebra-differentialgleichungssystemen bzw. Kennlinien ermöglicht die Parameteroptimierung. Das „Missing Link“ ist also nicht der Schritt 5 sondern der Schritt 4, die Optimierung mittels TOR im Dialog mit der physikalisch-technisch-ökonomischen Systembeschreibung im Schritt 5.

6. **Validiere!**

Die Validierung erfolgt wie bisher entweder durch 3 dimensionale Berechnungsmethoden (CFD, FEM) oder Versuch.

7. **Umsetzen!**

Das Umsetzen obliegt dem Systembauer so wie bisher.

Was ist neu und was ist die Abgrenzung zum V-Modell? Neu ist die Konzentration auf die 3 Fragen und das Wechselspiel von mathematischer Optimierung mittels TOR in Schritt 4 und physikalisch-technisch-ökonomischer Modul- und Systembeschreibung in Schritt 5.

Die TOR Pyramide und die dahinterstehenden Methoden können von unterschiedlichen Shareholdern genutzt werden, vom Produktverantwortlichen über den Planer bis zum Gesetzgeber.

Der Weg zum Maßstab

Neben dem Modulwirkungsgrad

$$\eta := \frac{\text{Referenz}}{\text{Wert}} = \frac{P_{ref}}{P_{zu}}$$

der derzeit allein im Fokus der Europäischen Union aber auch der USA und China ist, wird eine weitere Größe benötigt, um den Energieverbrauch von Systemen zu bewerten. In der Tat ist diese zweite

Größe seitens der Energieeinsparung deutlich wichtiger als der Wirkungsgrad der Module.

Die Frage ist:

Welche Größe tritt bei Systemen an die Stelle des Wirkungsgrades?

Sofern uns die Referenzenergie bekannt ist, können wir jede Systemauslegung mit einem Energieverbrauch E_A des Planers A oder E_B des Planers B bewerten ohne, dass wir A mit B bewerten müssen.

Die unter allen Umständen minimal notwendige Energie zur Erreichung einer Prozessfunktion (Kühlen, Heizen, Verdichten, Transport, Reaktion,...) ist nicht bekannt. Bei einer üblichen Lasthistorie ist die minimale Energie bei Fluidarbeitssystemen oder maximale Energie für ein Fluidkraftsysteme das Integral über die Leistung. Wir definieren diese minimale Energie als absolute Referenz:

$$E_{ref} = E_{min,max} = \int_0^T P_{min,max} dt.$$

Derzeit werden zwei Alternativen zu obiger absoluten Referenz diskutiert: Erstens die Definition einer kontextfernen Referenz, zweitens die einer Exergie- bzw. Anergiebetrachtung von Systemen. Das in der Gebäudetechnik diskutierte kontextferne Referenzsystem ist zumindest problematisch. Zum einen kann eine Prozessaufgabe (Kühlen, Heizen, Transport, ...) in den seltensten Fällen unabhängig von den kontextspezifischen Randbedingungen betrachtet werden. Zum andern besteht die Gefahr, derzeit verfügbare und in der Referenz abgebildete Technologien vorzuschreiben. Der Gesetzgeber sollte sich aber tunlichst davor hüten, Technologien gezielt zu fördern, da damit Innovationen gefährdet und Märkte ge- bzw. zerstört werden können. Richtig ist der Ansatz einer Exergieanalyse von Systemen, der letztlich aber identisch mit dem Ansatz ist, den Energieverbrauch E_{min} zu reduzieren. Die Exergie ist das Arbeitsvermögen z.B. eines Gases oder einer Flüssigkeit gegenüber der Umgebung, die durch Entropieproduktion reduziert wird. Der Begriff der Exergie ist sehr gut auf Fluidkraftsysteme anwendbar [5], weniger auf Fluidarbeitssysteme, die hier im Fokus stehen. Zusammenfassend gilt: Die Definition der minimalen Energie zur Erfüllung einer gegebenen Prozessfunktion erscheint die bestgeeignetste Referenz zur Bewertung von Systemen.

In völliger Analogie zu Fluidkraftsystemen lässt sich ein dimensionsloser Verbrauchsfaktor einführen, der es ermöglicht die Auslegungen der Planer A, B, C absolut zu bewerten.

$$C_P := \frac{\text{Referenz}}{\text{Wert}} = \frac{\int_0^T P_{ref} dt}{\int_0^T P_{zu} dt}.$$

Als nächstes haben wir die deutlich schwierigere Aufgabe die Referenzenergie für das ideale System zu bestimmen:

Bei dem idealen System ist der Verbrauchsfaktor definitionsgemäß maximal

$$C_P = C_{P,max}$$

und nimmt, sofern das ideale System technisch realisierbar ist, den Wert Eins an. Wie so oft führt die Antwort auf eine Frage gleich zur nächsten Frage.

Wie bestimmen wir eine absolute Referenz bei Systemen?

Hierzu lohnt ein Blick auf Fluidkraftsysteme wie Wind-, Wasser- und Wellenkraft, da sich der Charakter der Aufgabe zeigt. Albert Betz definierte 1920 [3] den Erntefaktor für Fluidkraftsysteme bei konstanter Last als Verhältnis von

8

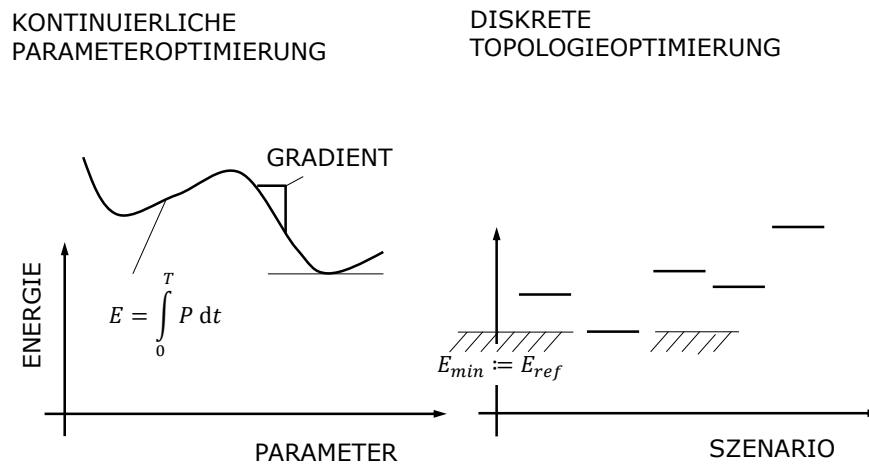
$$C_P(\text{Betriebszustand}) := \frac{\text{Wert}}{\text{Referenz}} = \frac{P_{ab}}{P_{ref}}.$$

Dieser Faktor wird bei Fluidkraftsystemen heute Erntefaktor genannt und bewertet die energetische Güte des Systems einschließlich der Fluidenergiemaschine wie Windturbine, Wasserturbine oder Meeresturbine. Für Windkraft ist der praktisch maximale Erntefaktor 59% [3] für Wasserkraft 50% [4] selbst bei einem Modulwirkungsgrad von 100%, d.h. keiner Dissipation in der Maschine. Mindestens 41% bzw. 50% der verfügbaren Leistung, die als Referenz definiert ist, wird stromab der Maschine transportiert und steht für die Energiewandlung nicht zur Verfügung.

Bei Windkraftsystemen ist anerkanntermaßen der Erntefaktor deutlich wichtiger als der Wirkungsgrad. Bei Wasserkraftsystemen ist man auf dem Weg zu dieser Erkenntnis.

Angelehnt an Albert Betz wird bei der Ermittlung der Referenzleistung ein ideales System betrachtet, nämlich ein System ohne Abströmung bzw. Unterwasser, das sind Fluidkraftsysteme, die als Gedankenmodell dienen, aber technisch nicht zu realisieren sind.

Wichtig ist, die abgegebene Leistung und damit der Erntefaktor C_p ist eine stetige Funktion des Betriebszustandes welcher z.B. den Grad der Aufstauung beziffert oder die Wasserhöhe im Unterwasser. Der Betriebszustand kann nun solange kontinuierlich (!) variiert werden, bis die abgegebene Leistung maximal wird. D.h. bei Fluidkraftsystemen erfolgt die Frage nach dem maximalen Energieertrag über eine kontinuierliche Optimierung: Wir suchen die Spitze eines Leistungsberges.



9

Abb. 3: Parameteroptimierung vs. Topologieoptimierung oder kontinuierliche Optimierung vs. diskrete Optimierung mittels TOR.

Wir kommen nun zurück zu den Anlagenplanern A, B, C. Alle drei Anlagenplaner stehen vor der Aufgabe aus einem Spielfeld bestehend aus Maschinen, Ventilen bzw. Armaturen, Reaktoren bzw. Wärmetauschern, ... Komponenten auszuwählen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Planer die Anlage nicht nur für einen Betriebspunkt auslegen sollen, sondern für mehrere. Dabei müssen Entscheidungen getroffen werden, wie Pumpe 1 oder 2? Schalte ich eine kleine Pumpe mit einer großen Pumpe parallel oder ordne ich drei gleiche kleine Pumpen parallel an. Jede Entscheidung ist von der Art ja oder nein, 0 oder 1 und hat Einfluss auf den Energieverbrauch der Anlage. Jede Entscheidung hat aber auch Einfluss auf die Investitionskosten sowie auf die Robustheit, d.h. Verfügbarkeit der Anlage.

Nun ist es so, dass es auch bei den Fluidarbeitssystemen mindestens ein Extremum im Energieverbrauch gibt. Die Aufgabe ist nicht dadurch gelöst irgendein Energieminimum zur Erfüllung einer Prozessaufgabe zu suchen sondern das eine globale Energieminimum.

An der Technischen Universität Darmstadt stellen wir uns genau dieser Aufgabe, die wir am Beispiel einer Druckerhöhungsanlage verdeutlichen wollen.

Beispiel Druckerhöhungsanlage

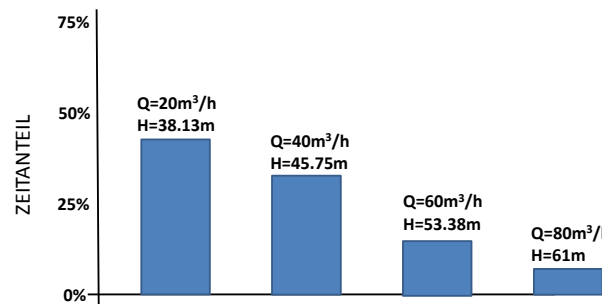


Abb. 4: Lastprofil einer Druckerhöhungsanlage.

1. Funktion? Ausgehend vom Kunden, der in diesem Fall vier mögliche Lastszenarien vorgibt, wie in Abb. 4 gezeigt, stehen den Planern A, B, C sechs Pumpentypen zur Verfügung, aus denen er eine beliebige Kombination bilden darf. Drei sind Drehzahl regelbar, drei nicht.
2. Ziel? In unserem Beispiel ist es Ziel sowohl Energieverbrauch als auch Investitionskosten mit vorgegebener Gewichtung zu minimieren.
3. Spielfeld? Die Fluidenergiemaschinen sind anhand ihrer Kennlinien zu unterscheiden (vgl. Abb. 5). Für unser Beispiel sollen nun aus Platzgründen zudem maximal fünf Pumpen verbaut werden. Die Aufgabe des Planers ist also, maximal fünf Pumpen aus dem Sortiment so auszuwählen, dass natürlich die gewünschten Lastszenarien bedient werden, dass aber eben auch die Summe der Anschaffungskosten plus die zu erwartenden Energiekosten auf den Abschreibungszeitraum minimal sind. Dabei darf die Topologie, also auf welche Weise die ausgewählten Maschinen verschaltet und betrieben werden, flexibel gestaltet werden, das heißt, sie darf auch im späteren Betrieb umgeschaltet werden.

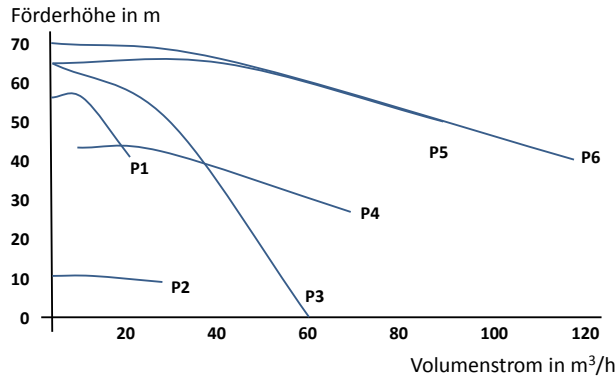


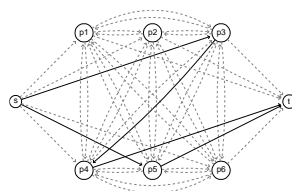
Abb. 5: Kennlinien der zur Verfügung stehenden Fluidmaschinen. Für P1 bis P3 (drehzahl geregelt) bei maximaler Drehzahl.

4. TOR findet das optimale System

Neu und wesentlich ist die Übernahme der Anlagenplanung durch den Rechner! Die Zahl der Kombinationen ist derart hoch, dass wie beim Schachspiel mittelmäßige Spieler kaum eine Chance gegen die mathematische Optimierungssoftware haben. Die algorithmische Idee ist, dass diskrete Szenarien durchgespielt werden und aus dem vollständigen Graphen der geeignetste Teilgraph ausgewählt wird. In Abbildung 6 sind beim Graph 1 P3 und P4 in Reihe und die beiden parallel zu P5 geschaltet, beim Graphen 2 sind die Maschinen P1 und P3 parallel und P4 in Reihe dahinter angeordnet.

11

TOPOLOGIE / GRAPH 1



TOPOLOGIE / GRAPH 2

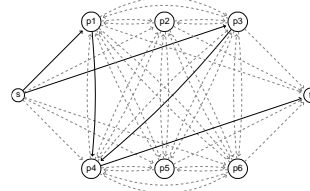


Abb. 6: Unvollständige Graphen der Druckerhöhungsanlage.

Obwohl das Beispiel auf den ersten Blick noch nicht sehr groß aussieht, besitzt es eine überraschend komplexe Lösung, die in Abb. 7 graphisch dargestellt ist.

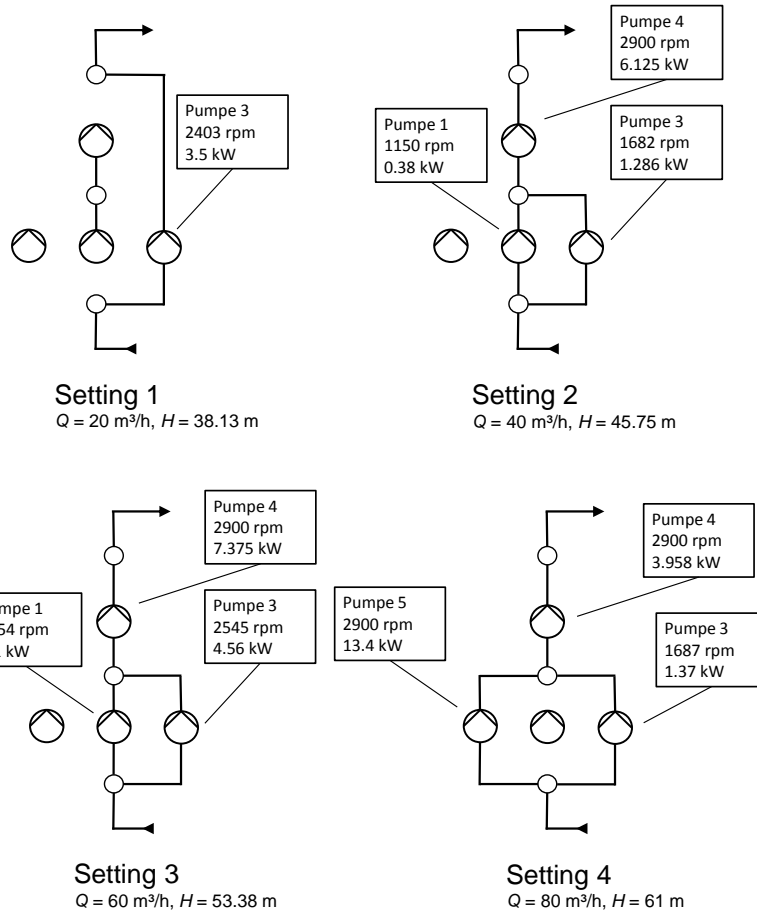


Abb. 7: Globaloptimale Lösung der Planung für das Beispiel.

Es fällt auf, dass die Lösung lediglich vier Pumpen benötigt und dass ihre Verschaltung lastabhängig ist. Im ersten Szenario wird nur Pumpe 3 genutzt, im zweiten und dritten werden die Pumpen 1 und 3 parallel und diese in Reihe zu Pumpe 4 geschaltet. Im 4. Lastszenario wird Pumpe 1 nicht benutzt, dafür sind Pumpe 3 und Pumpe 5 parallel. Das Besondere an dieser Lösung ist, dass uns die Methode, die uns zu dieser Lösung geführt hat garantiert, dass es keine bessere Lösung geben kann. Besser geht's nicht!

Die Methode TOR im Detail

Das reine Topologieproblem von Fluidsystemen lässt sich oft mit der besonders einfachen Modellierungshilfe der so genannten Graphen (vgl. Abb. 6) beschreiben. Ein Graph besteht lediglich aus zwei Mengen, den Knoten (Punkten) und den Kanten (Verbindungslinien zwischen

Punktepaaren). Die Graphentheorie wurde von Leonard Euler gegründet, als er 1736 das so genannte Königsbergerbrückenproblem gelöst hat. Damals ging es um die Frage, ob es einen Weg gibt, bei dem man alle Brücken Königsbergs bei einem Sonntagsspaziergang genau einmal überquert. Euler, der 1775 interessanterweise auch den Drallsatz bzw. die Eulersche Turbinengleichung als Axiom erkannt und formuliert hat, bildete zu dem Zweck alle Landmassen auf Knoten und alle Brücken auf Kanten eines Graphen ab. Wir bilden Pumpen auf Knoten und Verbindungen zwischen Pumpen auf Kanten ab, so dass mögliche Topologien, wie in Abb. 6 gezeigt, entstehen. P1 bis P6 symbolisieren die Pumpen, S und T Punkte im System, in dem die Flüssigkeit hinein- und wieder herausströmen soll.

Wenn wir nun berücksichtigen wollen, dass wir nicht allein an einer Topologieentscheidung interessiert sind, sondern dass physikalische Axiome wie die Kontinuitätsgleichung, der Impuls- und Energiesatz gelten, dass es Lastanforderungen und Pumpenkennlinien etc. gibt, ist die Modellierung mit Hilfe von Graphen nicht mehr gut geeignet. Deshalb wird das gegebene Optimierungsproblem in TOR tatsächlich als gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsproblem modelliert. Für diese Modelle wurden in den letzten 20 Jahren Algorithmen entwickelt, die für große praxisrelevante Problemstellungen, insbesondere in der Logistik, bei der Planung von Flugrouten und Zugverbindungen, bei der Fertigungsplanung u.v.m. in angemessener Rechenzeit entweder optimale Lösungen finden, oder zumindest Lösungen mit Gütegarantien abgeben können. Anstelle von einer Lösung mit dem Label „optimal“ genügt einem ja oft auch eine Lösung mit dem Wissen, dass es keine Lösung geben kann, die mehr als z.B. 1 Prozent besser ist als die gefundene Lösung.

Ein Punkt, den es zu beachten gilt ist, dass die physikalischen Zusammenhänge in der Fluidsystemtechnik i.d.R. nicht-linearer Natur sind. Man denke nur an den quadratischen Geschwindigkeitsterm in der Bernoullischen Gleichung. Um damit umzugehen, bedient man sich Linearisierungstechniken. Dabei erkaufte man sich Linearität durch den vermehrten Einsatz von diskreten Variablen. Versucht man sich den Effekt von Linearisierung geometrisch zu veranschaulichen, erhält man anstelle einer Kugel eine Art Fußball (s. Abb. 8), der hier passend zum Begriff TOR dargestellt ist. Die Linearisierung ist also, entgegen dem ersten Eindruck, keine starke Einschränkung der Methodik. Tatsächlich wird sie auch bei anderen Methoden (Finite Elemente mit linearen Ansatzfunktionen) verwendet. Im Bedarfsfall lässt sie sich auch adaptiv

verfeinern, was aber z.B. bei Kennlinien gar nicht nötig ist, da diese als Eingabedaten vorliegen.

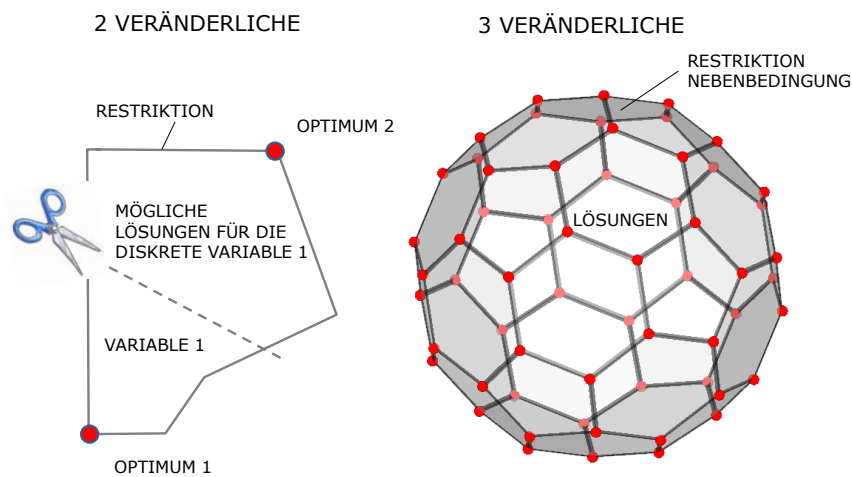


Abb. 8: Lösungsraum bei 2 und drei kontinuierlichen Variablen sowie, im Bild links mit einer diskreten Variable. Durch die diskrete Variable zerfällt der Lösungsraum in 2 Teilstücke.

Unter Operations Research (OR) wird allgemein die Entwicklung und der Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung verstanden [6]. Aufgabe des Technical Operational Research (TOR) ist zum einen, die Modellierungsmethoden und dazugehörigen mathematischen Lösungsverfahren zu nutzen, um technische Systeme zu optimieren und die Güte von vorhandenen technischen Systemen zu bestimmen. Zum anderen ist es die Koordination der Interaktion zwischen der funktional-ökonomisch-ökologischen Modellierung z.B. mittels des Sprachstandards Modelica und der mathematischen Modellierung, die erst eine Optimierung ermöglicht. Der Anspruch von TOR ist es nämlich, Lösungen aus der mathematischen Optimierung in die funktionale Modellierung (Modelica) zurückzuspiegeln um damit eine belastbare Validierung der Ergebnisse und der mathematischen Modellbildung zu ermöglichen.

Die dafür notwendige Methodenentwicklung gelingt nur, wenn Mathematiker und Ingenieur sehr eng zusammen arbeiten.

Danksagung

Wir danken dem VDMA Fachverband Pumpen+Systeme für die Forschungsunterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] Pelz, Lorenz, Ederer, Lang, Ludwig: „Designing Pump Systems by Discrete Mathematical“, IREC 2012, Düsseldorf, (2012)
- [2] Becker: „Technische Thermodynamik: Eine Einführung in die Thermo- und Gasdynamik“, Teubner, (1985)
- [3] Betz: “Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren.” Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen (1920).
- [4] Pelz: „Upper Limit for Hydropower in an Open-Channel Flow“, Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000393 (2011)
- [5] Binswanger: „ Die Wachstumsspirale: Geld, Energie und Imagination in der Dynamik des Marktprozesses “, (2009)
- [6] <https://www.modelica.org/>.
- [7] <https://gor.uni-paderborn.de/>.