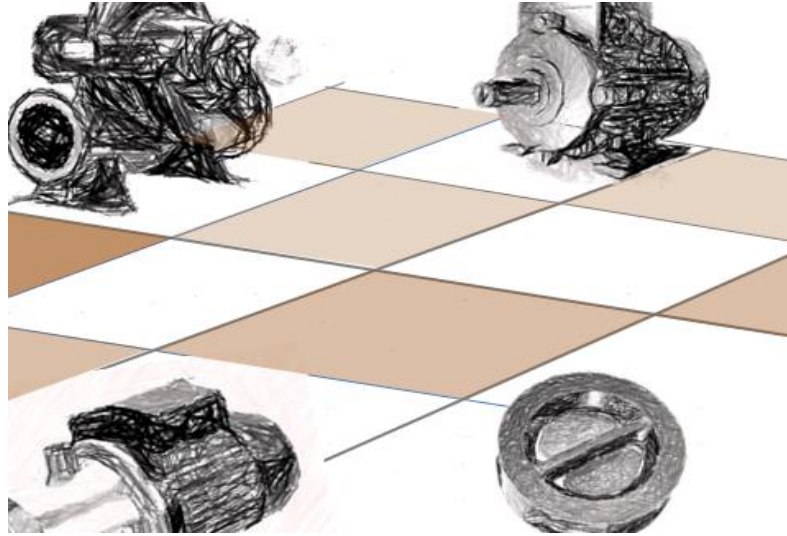


# Besser geht's nicht!

## TOR plant das energetisch optimale Fluidsystem

PD Dr. Ulf Lorenz, Dr. Gerhard Ludwig, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Fluidsystemtechnik



2

Module werden zum System.

### Zusammenfassung

*Um nennenswerte Energieeinsparung bei energieverbrauchenden Fluidsystemen erreichen zu können, ist ein Umdenken erforderlich, von einer Produkt**skalierung** (Product Approach, Extended Product Approach) hin zu einer System**optimierung** (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 arbeiten Mathematiker und Ingenieure gemeinsam an dieser Herausforderung und entwickeln 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 eine Prozessfunktion (Flüssigkeitsförderung, Heizen, ...) zu erfüllen, so ist zu vermuten, dass sich die Anlagen in Topologie, Regelung und insbesondere im Energieverbrauch unterscheiden, so dass keinesfalls alle drei Lösungen gleichwertig sein können.

Im vorliegenden Artikel adressieren wir zwei Punkte:

1. Wir möchten über einen **absoluten Maßstab** für den Energieverbrauch von Fluidarbeitssystemen sprechen, vergleichbar mit der maximal möglichen Energieumsetzung bei Fluidkraftsystemen [3], [4], [2]. Dadurch ergeben sich für Planer, Betreiber und Gesetzgeber **Entscheidungshilfen**, um Systeme auszulegen, zu betreiben bzw. deren energetische Qualität zu überprüfen.
2. Wir wollen die Anwendung **Mathematischer Optimierung** diskutieren und Planer, Betreiber und Gesetzgeber für die Suche nach einem Systemoptimum sensibilisieren. Um einmal plakativ zu sein: Wenn Ingenieure heute „optimieren“, dann „drehen“ sie solange an Parametern, bis eine gute Lösung verbessert ist. Ein Optimum im Sinne einer bestmöglichen Lösung wird dadurch im Allgemeinen nicht gefunden. Eine Abschätzung der Lösungsqualität gegenüber einer bestmöglichen Lösung ist bei dieser Vorgehensweise auch nicht gegeben und 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.

## Der Weg zum Maßstab

Neben dem Modulwirkungsgrad

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

der derzeit im Fokus der Europäischen Union aber auch der USA und China ist, wird eine weitere Größe benötigt, um den Energieverbrauch von Systemen zu bewerten. Die unter allen Umständen minimal notwendige Energie zur Erreichung einer Prozessfunktion (Kühlen, Heizen, Reaktion,...) ist zwar nicht bekannt, aber unter der Annahme einer üblichen Lasthistorie ist die minimale Energie bei

Fluidarbeitssystemen oder maximale Energie für ein Fluidkraftsysteme das Integral über die Leistung.

*Wie aber bestimmen wir mit dieser Erkenntnis eine absolute Referenz bei Systemen?*

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

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

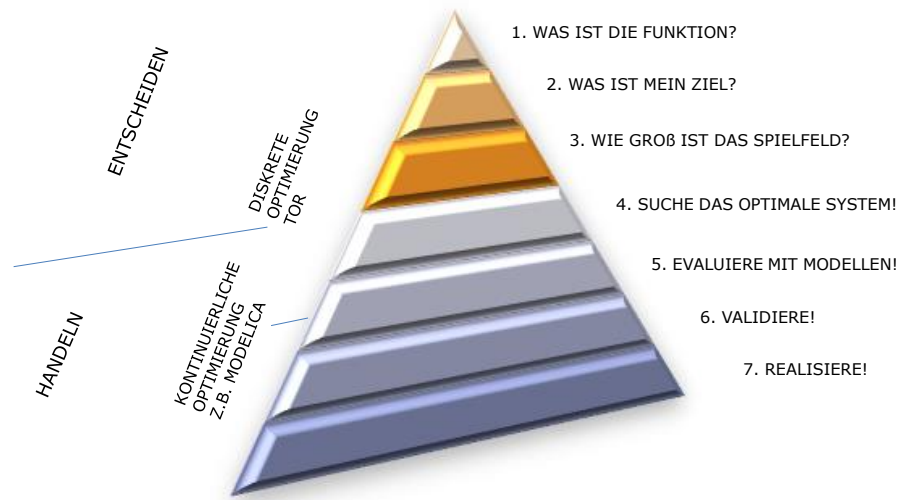
Dieser Faktor bewertet die energetische Güte des Systems einschließlich der Fluidenergiemaschine wie Windturbine, Wasserturbine oder Meeresturbine. Für Windkraft ist der praktisch maximale Erntefaktor 59% [3] für Wasserkraft 50% [4] selbst bei einem Modulwirkungsgrad von 100%, d.h. keiner Dissipation in der Maschine. 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 maximale Energieertrag eines Fluidkraftsystems kann somit über eine kontinuierliche Optimierung ermittelt werden.

4

Letzteres ist grundlegend anders beim Aufbau einer Anlage aus Maschinen, Ventilen, Reaktoren, Wärmetauschern, ... alles Komponenten, aus denen der Anlagenplaner auswählen muss. 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 hat Einfluss auf die Güte der Anlage.

An der Technischen Universität Darmstadt stellen wir uns der Aufgabe, in diesem Konfigurationsraum optimale Lösungen zu suchen. Wie wir vorgehen wird im Folgenden am Beispiel einer Druckerhöhungsanlage erklärt.

## Die TOR Pyramide

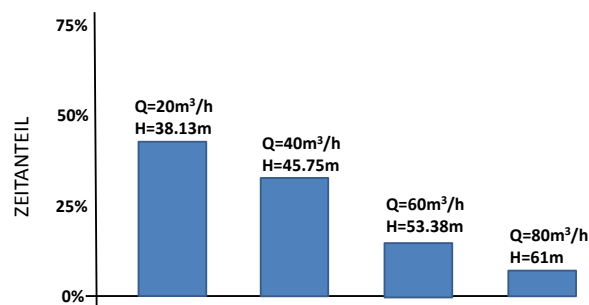


**Abb. 1:** Die TOR Pyramide.

Um die gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung für Ingenieure handhabbar zu machen, wurde am FST eine Methodik zur Systemauslegung entwickelt. Sie sieht im Kern folgendes Vorgehen vor: Der erste Schritt (1) der Systemauslegung ist immer die Klärung der grundlegenden Funktion des Systems (vgl. Bild 1). Anschließend (2) folgt die Frage nach den subjektiven Zielen der Planung. Der zur Erfüllung von Ziel und Funktion vorhandene Komponentenbaukasten wird im nächsten Schritt beschrieben (3).

Danach sind zunächst einmal alle Entscheidungen zur Auslegung des Systems getroffen, aber dessen Struktur ist nach wie vor unbekannt. In einem weiteren Abstraktionsschritt entsteht ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MILP) (4). Die innerhalb des Optimierungsmodells optimalen Lösungen werden validiert und realisiert (5-7).

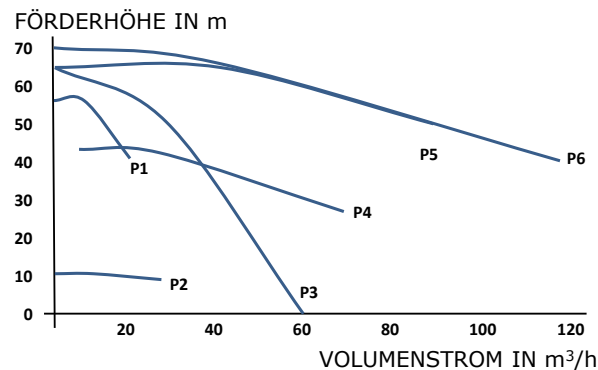
## Systemdesignprozess einer Druckerhöhungsanlage



**Abb. 2:** Lastprofil einer Druckerhöhungsanlage.

1. Zu Beginn einer Systemauslegung steht die Frage **Was ist die Funktion?** Hier soll Druck erhöht werden.
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 ...) erfüllt werden. Ein Anlagenplaner wird in diesem Sinne ggf. ein anderes subjektives **Ziel** anstreben als ein Betreiber bzw. Besitzer. In unserem Beispiel sollen Energieverbrauch ebenso wie Investitionskosten mit vorgegebener Gewichtung minimiert werden.
3. **Wie groß ist das Spielfeld?** Bei einem Schachspiel (vgl. Eingangsbild) sind das Spielfeld und die Regeln festgelegt. Gleiches muss auch für die computergestützte Anlagenplanung gelten. Z.B. muss eine Vorauswahl an Komponenten ermittelt werden und physikalische Randbedingungen müssen kodiert werden. Dann lässt sich algorithmisch bestimmen, ob eine Komponente Verwendung findet oder nicht und wie sie im optimalen Betrieb verwendet wird. Zu einem System gehört alles, was zur Erfüllung der Funktion notwendig ist. Ausgehend

6



**Abb. 3:** Kennlinien der zur Verfügung stehenden Fluidmaschinen. Für P1 bis P3 (drehzahl geregelt) bei maximaler Drehzahl.

vom Kunden, der in diesem Fall vier mögliche Lastszenarien vorgibt, wie in Abb. 2 gezeigt, stehen sechs Pumpentypen zur Verfügung, aus denen eine beliebige Kombination gebildet werden darf. Die Fluidenergiemaschinen sind anhand ihrer Kennlinien zu unterscheiden (vgl. Abb. 3). 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 die gewünschten Lastszenarien bedient werden, dass aber eben auch die Summe der Anschaffungskosten plus die zu erwartenden Energiekosten auf den Abschreibungszeitraum minimal sind.

An dieser Stelle sind alle wesentlichen Eigenschaften des Zielsystems festgelegt.

4. [Finde 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 menschliche Spieler kaum eine Chance gegen die mathematische Optimierungssoftware haben.

5. Die gefundene Lösung wird mittels physikalisch-technisch-ökonomischen Modellen mit konzentrierten Parametern (sogenannte 0-dimensionale Modelle) in Modelica [5] [evaluiert](#).

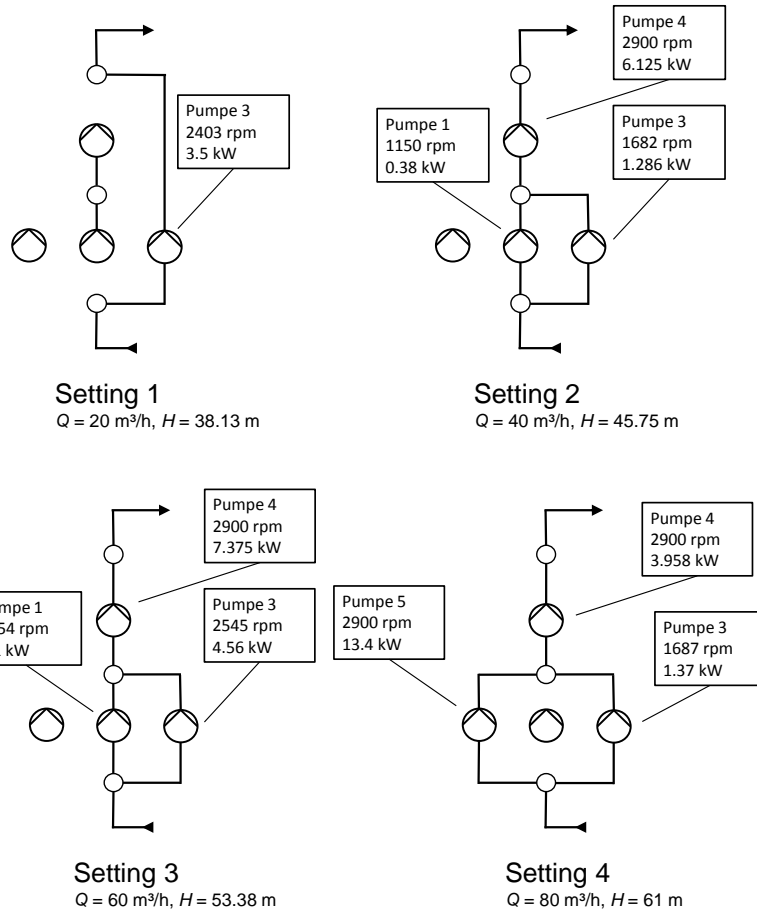
6. Die [Validierung](#) erfolgt wie üblich durch dreidimensionale Berechnungsmethoden (CFD, FEM) oder Versuch.

7. Das [Umsetzen](#) obliegt dem Systembauer so wie bisher.

---

7

Obwohl das Beispiel auf den ersten Blick noch nicht sehr groß aussieht, besitzt es eine überraschend komplexe Lösung, die in Abb. 4 graphisch dargestellt ist.



**Abb. 4:** 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!

## Fazit

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. Der Anspruch von TOR ist es zudem, Lösungen aus der mathematischen Optimierung in die funktionale Modellierung (Modelica [5]) 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] <https://www.modelica.org/>.
- [6] <https://gor.uni-paderborn.de/>.