

# Hilfe von **TOR**

## Lebensdauer als Optimierungsziel im automatisierten Systementwurf

Um eine hohe Verfügbarkeit eines Systems zu erzielen, muss umgedacht werden. Weg von der Lebensdauerbetrachtung einer einzelnen Komponente hin zu einer Systemoptimierung. An der Verwirklichung arbeitet eine Forschungsgruppe am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt. Sie entwickelte den Begriff „Technical Operations Research“ und die TOR-Methodik.

Die Verfügbarkeit von technischen Systemen ist neben Effizienz und Kosten das wichtigste Entscheidungskriterium für oder gegen eine Systemvariante. Durch geringe Ausfallzeiten beziehungsweise eine höhere Lebensdauer einzelner Komponenten steigert sich die Verfügbarkeit des Systems. Eine hohe Lebensdauer bedeutet eine sichere Funktion, beeinflusst aber den ökonomischen Wert des Systems. Betrachten wir heute Lebensdauerberechnungen, werden die einzelnen Komponenten für eine vordefinierte Systemtopologie in den Mittelpunkt gestellt und optimiert. Unbeantwortet bleibt jedoch die Frage, ob eine „hohe Verfügbarkeit“ eine ganz andere Topologie, das heißt eine gänzlich andere Systemvariante bedingt.

An dieser Stelle setzt das Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt an. Die Forschungsgruppe vereinigt Skalierungskonzepte von zeitveränderlichen Vorgängen mit Methodiken diskreter Optimierung technischer Systeme, wofür der Begriff „Technical Operations Research“, kurz TOR, steht.

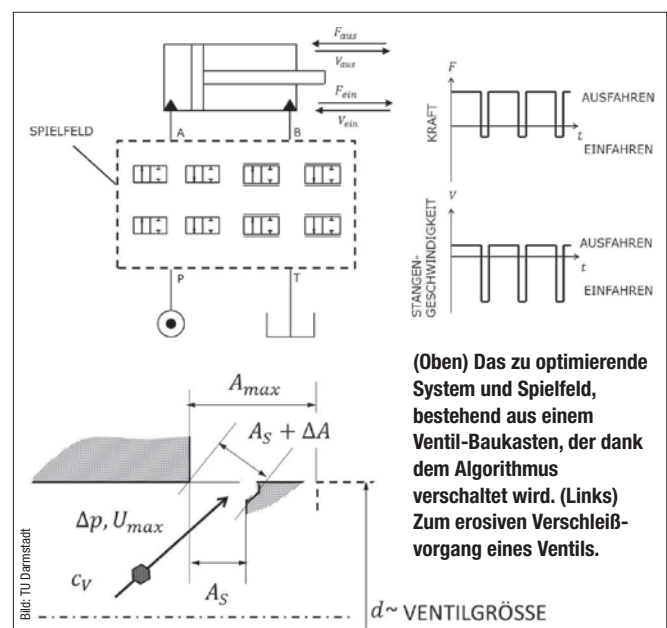
Zur Verdeutlichung der Methodik betrachten wir ein hydrostatisches Getriebe, das Lasten mit vorgeschriebener Geschwindigkeit hebt. Das „Spielfeld“ wird durch einen Differentialzylinder und eine Auswahl an Ventilen vorgegeben. Der Versorgungsdruck sowie Tankdruck sind fest. Die Auswahl an möglichen Ventilen, das heißt das Spielfeld für die Systemtopologie, besteht aus 2/2-Proportionalventilen und 2/2-Schaltventilen. Dem Algorithmus ist erlaubt, aus den verfügbaren Komponenten eine Anzahl von vier Ventilen je Typ auszuwählen und beliebig zu verschalten. Wohlwissend, dass eine automatische Systemfindung gerade für unterschiedliche Ventilbaugrößen von Interesse ist, wird im ersten Schritt das Spielfeld nur mit Ventilen konstanter Größe gefüllt.

### TOR-Methodik

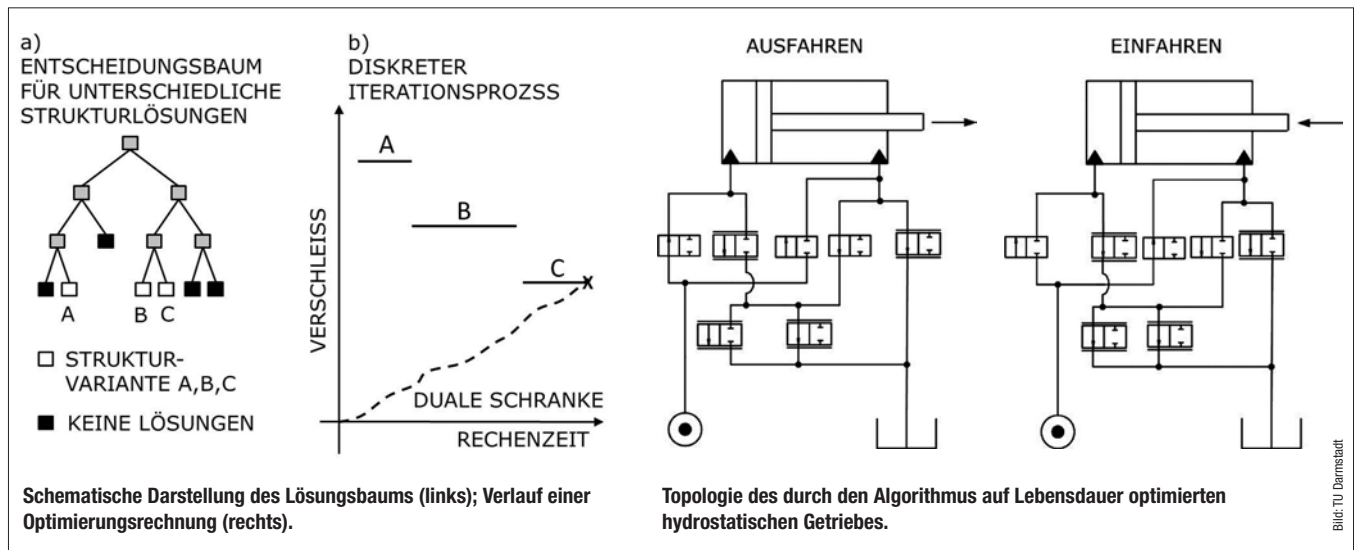
Für eine Systemoptimierung wurde am Institut ergänzend zum V-Modell eine Pyramide mit sieben Schritten entwickelt, die an die

Vorgehensweise einer Systemoptimierung explizit angepasst ist – die TOR-Pyramide. Zu Beginn der Planungsphase müssen drei Entscheidungsfragen beantwortet werden:

- Was ist die Funktion? Zu einem System gehört alles, was zur Erfüllung der Funktion notwendig ist. Eine Lasthistorie kann ebenfalls Teil der Funktionsbeschreibung sein.
- Was ist mein Ziel? Eine Funktion kann entweder mit geringem Aufwand wie minimaler Energieaufwand, minimale Investitionen und minimaler Materialeinsatz, oder wie in dem hier beschriebenen Beispiel mit hoher Verfügbarkeit, geringe Ausfallwahrscheinlichkeit und hohe Lebensdauer, erfüllt werden.



(Oben) Das zu optimierende System und Spielfeld, bestehend aus einem Ventil-Baukasten, der dank dem Algorithmus verschaltet wird. (Links) Zum erosiven Verschleißvorgang eines Ventils.



- Wie groß ist das Spielfeld? Bei einem Schachspiel sind Spielfeld und Regeln festgelegt. Gleiches muss auch für die computergestützte Systemplanung gelten. Die Komponenten müssen vorher gewählt und physikalische Randbedingungen kodiert werden. Dann lässt sich algorithmisch bestimmen, ob eine Komponente und wie sie im optimalen Betrieb verwendet wird. An dieser Stelle sind alle wesentlichen Eigenschaften des Zielsystems festgelegt. Die weiteren Schritte sind wie folgt:
  - Suche das optimale System: Ein Algorithmus wählt gemäß den Spielregeln und dem vorgegebenen Ziel automatisch das bestmögliche Teilsystem aus.
  - Die gefundene Lösung wird mit physikalisch-technisch-ökonomischen Modellen mit konzentrierten Parametern evaluiert.
  - Die Validierung erfolgt durch 3D-Berechnungsmethoden wie CFD oder FEM; oder durch einen Versuch.
  - Bei der Umsetzung findet die eigentliche Wertschöpfung statt.

**Alterung und Verschleiß als Evolutionsprozess**

Hat TOR das Ziel die Lebensdauer bei vorgegebener Funktion zu optimieren, muss der Algorithmus die Systemlebensdauer unterschiedlicher Topologien bewerten und vergleichen. Wird eine Komponente in unterschiedlichen Systemen verwendet, führt dies zu unterschiedlichem Betrieb und Verschleiß der Komponente. Dies wird bei Verschleißvorgängen in TOR durch eine Zeitdehnung oder Zeitraffung berücksichtigt.

Der einfachste und üblichste Ansatz, um deterministischen Verschleiß und Alterung zu berechnen, ist die lineare Schadensakkumulation. Verschleiß und Alterung entwickeln sich über die Nutzungshistorie. Äquivalent zu der linearen Schadensakkumulation ist die Evolutionsgleichung.

Die Darstellung als Evolutionsgleichung hat den Vorteil, dass die Wirkung der Verschleiß- oder Alterungsrate deutlich wird: Sie führt zu einer Zeitdehnung und allein die skalierte oder dimensionslose Zeit ist für alle Betriebszustände und verschiedene Systemtopologien unverändert. Bei einer hohen Verschleißrate wird die Zeit gestaucht, bei einer niedrigen Verschleißrate wird die Lebenszeit einer Komponente gedehnt. Dieses formalistisch ausgedrückte Verhalten bildet mathematisch die Erfahrung des Praktikers ab. Genau diese Abbildung der Erfahrung ist notwendig, wenn in Zukunft Algorithmen bei Strukturierungs- beziehungsweise Synthesaufgaben unterstützen sollen.

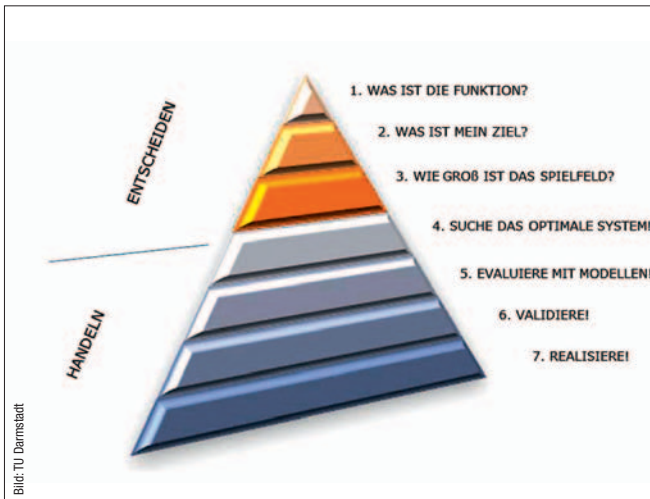
**Verschleiß- beziehungsweise Alterungsrate**

Kern der Berechnung von Verschleiß und Alterung ist die Verschleiß- beziehungsweise Alterungsrate. Es stellt sich die Frage, wie sie bei einem Ventil modelliert werden kann. Hierzu wurden aufbauend auf experimentellen Ergebnissen vom Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen (IFAS) der RWTH Aachen folgende Überlegungen validiert: Für die Teilkomponente „Ventil“ mit der Teilfunktion „Druck absenken“ folgt, dass der Druckverlust proportional dem Quadrat des Volumenstroms und umgekehrt proportional dem Quadrat der Ventiloffenfläche ist. Dadurch ist ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang zwischen Druckverlust, Volumenstrom und gesamter Ventiloffenfläche gegeben. Die Ursache für Verschleiß ist das Auftreffen von suspendierten Partikeln auf die Ventilsteuerkanten. Die Aufprallgeschwindigkeit ist von der maximalen Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

**Anwendungsbeispiel**

Im folgenden Anwendungsbeispiel wird eine hydraulische Schaltung mittels der TOR-Methodik optimiert. Dazu wird das Skalierungsgesetz zusätzlich zu den Erhaltungsgleichungen, wie Kontinuitätsgleichung, Impulssatz und Energiegleichung, im Optimierungsprogramm modelliert. Dieses basiert auf Techniken der linearen Optimierung, die bereits erfolgreich in der Logistik, Produktionsplanung oder zur Erstellung von Fahrplänen eingesetzt wird, und nun auch zur Strukturierung technischer Systeme seinen Einsatz findet. Die Modellbildung erfordert das Vorgehen anhand der TOR-Pyramide.

- Schritt 1: Die Funktion der Schaltung muss beschrieben werden. Ein Kolben führt während des Betriebs eines hydrostatischen Getriebes immer wieder denselben Lastzyklus aus. Zur Versorgung des Kolbens steht eine Konstantdruckleitung zur Verfügung. Aus dem Spielfeld kann der Algorithmus beliebige Ventile wählen und verschalten.
- Schritt 2: Ziel der automatisierten Synthese ist das System so zu strukturieren, dass der Systembetrieb der Maschine ohne einen wartungsbedingten Ausfall durch Ventil-Verschleiß gewährleistet ist. Zur Alterungsbeschreibung wird die Skalierungsgleichung herangezogen und für jedes Strukturszenario und jeden Betrieb in jedem Strukturszenario bewertet.
- Schritt 3: Das Spielfeld zur Optimierung besteht aus jeweils vier 2/2-Wege-Proportionalventilen und 2/2-Wege-Schaltventilen.



Zur Systemoptimierung entwickelte die TU Darmstadt eine Pyramide mit sieben Schritten, die TOR-Pyramide.

Diese können zwischen den Anschlüssen an der Druckversorgung, am Tank und am Kolben beliebig miteinander verschaltet werden. Die Emulation eines 4/3-Wege-Proportionalventils – hier mit getrennten Steuerkanten – steht genauso zur Auswahl wie der Einsatz einer Parallel- oder Reihenschaltung. Die Entscheidung, welche Komponente wirklich gebraucht und wie sie eingesetzt wird, entscheidet der Lösungsalgorithmus TOR.

- Schritt 4: Zur Optimierung wird die Obermenge aller möglichen Systeme abgebildet und kann als Entscheidungsbaum dargestellt werden. Jede diskrete Entscheidung etwa für oder gegen den Einsatz eines Ventils führt in einen neuen Ast des Entscheidungsbaums und auf der unteren Ebene zu einer Variablenbelegung.

Kann infolge einer diskreten Entscheidung die Funktion nicht mehr erfüllt werden, so existiert im gesamten folgenden Ast kein zulässiges System. Die beste gefundene Lösung ist eine sogenannte „Primallösung“. Die spezielle Formulierung des Optimierungsproblems generiert eine weitere Information, welche angibt, wie gut die beste Lösung höchstens sein kann: Die „duale Schranke“. Treffen sich Primallösung und duale Schranke, so ist die bestmögliche Lösung gefunden, ohne dass der gesamte Entscheidungsbaum erforscht ist. Damit liefert die diskrete Optimierung mittels TOR immer ein globales Optimum im Gegensatz genetischen Algorithmen

oder nichtlinear Optimierung. Die Güte eines Systems kann quantifiziert werden im Sinne von „besser geht's nicht“.

### Faktor 13 in der Lebensdauer

Obwohl das Spielfeld mit einer recht geringen Anzahl an Ventilen gefüllt ist, gibt es bereits über zwanzig Kombinationsmöglichkeiten, die eine Funktionserfüllung des hydrostatischen Getriebes gewährleisten. Hierbei kann die Ventilschaltung zusätzlich noch variieren. Die Auswahl der für die Lebensdauer optimalen Topologie ist somit nicht mehr intuitiv. Die von dem Algorithmus gefundene Struktur für das vorliegende Optimierungsproblem ist alles andere als intuitiv. Im Beispiel wurden alle zur Verfügung stehenden Proportionalventile von TOR gewählt, sowie drei der im Baukasten verfügbaren Schaltventile. Wird die Arbeit von TOR reflektiert, erkennt man, dass TOR die Belastung möglichst gleichmäßig auf alle Ventile verteilt, sodass die Laufzeit bis zum ersten verschleißbedingten Ausfall maximal wird. Im Vergleich zu einer üblichen Schaltung mit einem 4/3-Proportionalventil wird die Systemlebensdauer mit der Schaltung um den Faktor 13 erhöht.

Die am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt entwickelten Methoden des Technical Operations Research erlauben den Vergleich einer Obermenge technischer System und schließen den Vergleich verschiedener Topologien hinsichtlich der Zielfunktion ein. Ist die Funktion und das Ziel in diesem Fall eine maximale Lebensdauer bekannt, ist TOR in der Lage aus einem gegebenen Spielfeld die beste Systemtopologie auszuwählen. Die Zugänglichkeit von Alterungsprozessen für TOR wird über eine analytische Beschreibung der deterministischen Zuverlässigkeit einer Komponente mit Methoden der Skalierung gegeben.

Technische Systeme entstehen im Spannungsfeld von Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit. Letztere wird gemessen in Effizienz aber auch Materialeinsatz und Geldeinsatz. Im gezeigten Beispiel war die Verfügbarkeit alleiniges Ziel. Eine Kombination von verschiedenen Zielen ist aber auch möglich. Alternativ kann ein Ziel zu einer Nebenbedingung „degradiert“ werden in dem Sinne: „das System darf x Euro Investitionskosten nicht überschreiten“. Wir arbeiten daran, dass vieles möglich ist, und der Ingenieur bzw. die Ingenieurin algorithmisch unterstützt wird. Damit kann er sich auf die drei ersten Fragen der TOR-Pyramide konzentrieren und ab dann die Dinge im Sinne von „besser geht's nicht“ ablaufen. *hei*

**Autoren**

Angela Vergé, Philipp Pöttgen, Professor Peter F. Pelz,  
Institut für Fluidsystemtechnik, TU Darmstadt

CONFORTI OLEODINAMIC: MD  
mm x mm