

Zur modellbasierten, ganzheitlich-optimalen Entscheidung über technische Systeme

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

Mario Holl, M.Sc.

geboren in Nastätten

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Tag der Einreichung:	26.04.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	04.07.2017

Darmstadt 2017

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 14

Mario Holl

**Zur modellbasierten, ganzheitlich-optimalen
Entscheidung über technische Systeme**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5415-6

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Kontext

Die Funktion regenerativer Energiesysteme ist es, ein Energieangebot der Natur mit minimalem Aufwand und maximaler Verfügbarkeit in Energie für Arbeitsprozesse zu wandeln. Aus mathematischer Sicht ist mit diesem einfachen Satz ein Optimierungsproblem beschrieben. Die "Funktion" wird mathematisch zur Nebenbedingung, die mathematische Kostenfunktion wird durch "Aufwand" und "Verfügbarkeit" gebildet. Damit ist das für jede Entwicklung typische Spannungsfeld zwischen Funktion, Aufwand und Verfügbarkeit gebildet.

In diesem Zusammenhang stellen sich zwei Fragen, erstens (i) die nach der Strukturunsicherheit und zweitens (ii) die nach der Modellunsicherheit:

Strukturunsicherheit (i):

Was liefert die Produktentwicklung nach Pahl und Beitz hierzu? Die Funktion lässt sich in Teilfunktionen aufspalten. Die Teilfunktionen stehen über Energie- und Signalflüsse in einem Zusammenhang, der Funktionsstruktur genannt wird. Diese ist zunächst noch abstrakt und damit nicht hinsichtlich Aufwand und Verfügbarkeit bewertbar. Erst die Materialisierung in einer aus der Funktionsstruktur abgeleiteten Komponentenstruktur ermöglicht die Bewertung in einer Kostenfunktion.

Damit ist das Dilemma der heutigen Produkt- und Systementwicklung aufgezeigt: Erst was konzeptionell vorhanden ist kann bewertet werden. Alle Strukturen, seien es Funktionsstrukturen oder Komponentenstrukturen, die nicht bewertet werden, bleiben im Bereich des Unwissens. Wir nennen die damit verbundene Unsicherheit die Strukturunsicherheit. Diese wird heute häufig ignoriert. Zur methodischen Beherrschung von Strukturunsicherheit ist daher an der TU Darmstadt in den vergangenen Jahren im Sonderforschungsbereich 805 "Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus" in einer fruchtbaren Zusammenarbeit von Mathematik (Martin, Pfetsch, Lorenz) und Maschinenbau (Altherr, Pelz) die Methode Technical Operations Research (TOR) entstanden.

Modellunsicherheit (ii):

Sowohl die Funktion als auch die Verfügbarkeit und der Aufwand technischer Systeme müssen für eine Systemscheidung in einem Modell abgebildet werden. Dies gelingt immer unzureichend, was in dem schönen Zitat von George Box mündet “alle Modelle sind falsch, manche sind nützlich”. Die Entscheidung für oder gegen ein System wird auf dieser Bewertungsbasis durch einen Algorithmus (z.B. TOR) oder einen Menschen getroffen. Idealerweise liefert der Algorithmus dem Menschen eine Vorauswahl guter Systeme. Strukturentscheidungen brauchen Modelle wodurch die Strukturunsicherheit über der Modellunsicherheit steht.

Das Spannungsfeld Funktion, Aufwand und Verfügbarkeit wird heute in jedem Iterationsschritt seriell bearbeitet, d.h. die Ingenieurin oder der Ingenieur stellt die Funktionserfüllung eines Systems dar. Nachfolgend wird die Verfügbarkeit durch Rechnung oder Messung quantifiziert. Erst dann kommt der Ökonom ins Spiel, der Aufwände und Investitionsentscheidungen bemisst bzw. bewertet. Der Ökologe kommt erst ganz am Projektende zum Handeln. Er bemisst die Wirkung des Systems auf die Umwelt. Dadurch weitet er notwendigerweise die Systemgrenze. Ob dann noch eine Systemanpassung erfolgt sei dahingestellt.

Geht es um neue Energiewandler und innovative Energieketten, die erst in einer der Folgedekaden realisiert werden können, dann ist das beschriebene seriell-iterative Verfahren nicht zielführend, da es zeit- und kostenaufwendig ist und an Transparenz mangelt.

Anlass und Forschungsfragen

Im Jahr 2014 hat mich mein Kollege Professor Max Platzer (USA) auf das Konzept des Energieschiffs aufmerksam gemacht. Das Konzept sieht vor, dass zukünftig Schiffe autonom im Südpazifik segeln und in den windreichen und landarmen Regionen Energie ernten. Dies gelingt durch eine im Rumpf integrierte Wasserturbine, die mechanische Leistung einer Power-to-Gas Anlage liefert. Auf dem Schiff füllt sich mit der Zeit ein Wasserstoff- oder Methanspeicher. Die chemisch gebundene Energie wird nach der “Ernte” in Häfen abgeliefert.

Schiffe, Turbinen, Segel, verfahrenstechnische Power-to-Gas Anlagen sind mehr oder weniger bewährte Technologien von hohem Reifegrad. Auch ist die Mobilität des Energiewandlers von Vorteil.

Nun kann man sich als Ingenieur mit Begeisterung solch einem Thema widmen. Es stellt sich aber die Frage: Lohnt sich das System ökonomisch? Die Frage lautet genauer: Ab welchem Wasserstoffpreis lohnt sich eine Investition? Wie gesagt: Technologisch stellt das Energieschiff keine unüberwindbare

Herausforderung an die Ingenieurwissenschaften dar. Methodisch ist die Frage der Bewertung und ganzheitlichen Optimierung demgegenüber sehr lohnend. Im Jahr 2014 gab es keine Methode, die zur Beantwortung der Frage diente.

Aus dem Kontakt mit Herrn Professor Platzer leiteten sich die drei Forschungsfragen für Herrn Holl ab:

- (i) Wie können techno-ökonomisch-ökologische Systeme bekannter Topologie (ausgeklammerte Strukturunsicherheit) ganzheitlich und gleichzeitig (nicht seriell-iterativ) beschrieben werden?
- (ii) Wie kann die Modellunsicherheit dabei quantifiziert werden?
- (iii) Wie kann die ganzheitliche Optimierung erfolgen?

Methoden und Ergebnisse

Herr Holl nutzt zur ganzheitlich und gleichzeitigen Modellierung von technischen Systemen den Mehrpolformalismus, der von elektrischen, mechanischen, akustischen und hydraulischen Netzen bekannt ist. In sehr kreativer Weise wird durch Herrn Holl jede Komponente (jeder Energiewandler) der Energiekette durch einen Mehrpol beschrieben. Die Eingangs- und Ausgangsströme in den Mehrpol sind dabei technisch, ökonomisch und ökologisch. Im Einzelnen sind die Flüsse Leistungsflüsse, Massenströme, Geldströme und ökologische Kostenströme. Die in der Arbeit von Herrn Holl entstandene neue Beschreibungsmethode wird von ihm und mir Mehrpolsystemanalyse MPSA genannt.

Herr Holl grenzt die MPSA sehr sorgfältig gegenüber der Exergoökonomie ab. Bei dieser werden Exergieströme sofort ökonomisch bewertet. Letztlich verbleibt dadurch allein ein Fluss durch jeden Wandler. Eine Optimierung nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ist bei der Exergoökonomie daher nicht möglich. Demgegenüber ist durch die methodisch saubere Trennung der Flüsse in der neuen MPSA eine Optimierung nach rein energetischen, ökonomischen oder ökologischen Kosten möglich. In der Tat stellt sich dann jeweils ein anderes Optimum ein.

Die Modellierung erfordert eine physikalische, ökonomische und eine ökologische Modellierung des Systems. Bei der physikalischen Modellierung nutzt Herr Holl vornehmlich axiomatische, nulldimensionale Modelle (konzentrierte Parameter), die für den Zweck sehr angemessen sind. Wie bei allen regenerativen Energien kommt er zu einem Erntefaktor, der den Energieertrag zu

einem Energieangebot ins Verhältnis setzt. Dieser ist nicht mit dem Wirkungsgrad zu verwechseln wie Albert Betz (1921) für Windturbinen bereits sehr deutlich machte. Tatsächlich folgt Herr Holl dieser notwendigen und sauberen Unterscheidung.

Interessant ist die ökonomische Modellierung. Hier nutzt Herr Holl die Kapitalwertmethode die auf eine ökonomische Effizienz, nämlich den ROI (return on investment) führt. Die ökologische Modellierung bemisst die Umweltkosten und führt auf die ökologische Effizienz, den ROE (return on environment). Um das System zu begrenzen und den Markt nicht in das Modell zu integrieren, gilt als Bewertungsmaß die markt- und umweltbereinigten Kosten für Wasserstoff (levelized cost of hydrogen LCOH und levelized environmental cost of hydrogen LEOH).

Herr Holl hat die Strukturunsicherheit aus seiner Betrachtung berechtigterweise ausgeklammert, indem die Topologie des Systems bereits festgelegt bleibt (s.o.). Die Beherrschung von Strukturunsicherheit führt zur diskreten Optimierung. Herr Holl verändert kontinuierlich die Größe einzelner Systemkomponenten wie z.B. Schiffsgröße und Turbinengröße. Hierzu hat er die Investitionskosten in Abhängigkeit der Größe über Skalierungsfunktionen abgebildet. Die Skalierungsfunktionen sind Potenzgesetze, die Herr Holl über eine Marktrecherche gewonnen hat.

Zur oben angesprochenen Modellunsicherheit:

Die Skalierungsfunktionen sind ein wesentlicher Quell für Modellunsicherheit. Um diese und Sensitivitäten zu bewerten, nutzt Herr Holl statistische Methoden, Monte-Carlo Simulation sowie moderne Sensitivitätsanalysen. Insgesamt hat alles Hand und Fuß und die Methoden sind sehr ausführlich reflektiert, sorgfältig dargestellt und passend.

Als Ergebnis steht eine für Energiewandler erprobte ganzheitliche Entscheidungsmethodik zur Verfügung, die weit über den Stand der bisherigen Methoden hinausweist oder Nachteile z.B. der Exergoökonomie überwindet. Gerade für die Energiewende und für Investitionsentscheidungen braucht die Gesellschaft solche transparenten Methoden.

Darmstadt, im Sommer 2017
Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift basiert auf den Forschungsergebnissen meiner dreijährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Den Worten Albert Schweitzers folgend “Vergiß den Anfang nicht, den Dank!” möchte ich dieses Vorwort nutzen, um mich bei den Menschen zu bedanken, die rückblickend diesen Lebensabschnitt mit mir geteilt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein *erster* Dank gilt meinem betreuenden Professor und Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz. Die durchweg konstruktive Zusammenarbeit, die unvoreingenommene Offenheit, mit der er dem Forschungsthema begegnete und das mir entgegengebrachte Vertrauen, welches mir erlaubte mein Forschungsthema eigenständig voranzutreiben, trugen maßgeblich zu dessen Erfolg bei.

Mein *weiterer* Dank gelten Prof. Dr.-Ing. Max Platzer für die Bereitstellung eines konkreten Anwendungsbeispiels und die Möglichkeit eines Auslandsforschungsaufenthalts im schönen Monterey, Kalifornien, Frau Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek für die Anfertigung des Zweitgutachtens dieser Arbeit sowie der Graduiertenschule für Energiewissenschaften und Energietechnik für die Förderung des Forschungsvorhabens.

Mein *ganz besonderer* Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut. Stets waren sie bereit mein Forschungsthema zu diskutieren und ermüdeten nie es konstruktiv zu kritisieren. Beides führte zur nachhaltigen Verbesserung der wissenschaftlichen Qualität dieser Arbeit. Abseits der fachlichen Expertise bin ich besonders dankbar für die gemeinsamen Stunden, die wir als Kollegen im privaten Umfeld miteinander verbrachten. Es ist diese Kombination aus dem Privileg des Lernens und Begreifens, der freien Entfaltung und Gestaltung in der eigenen Forschung sowie dem geselligen Miteinander unter Freunden, was meine Zeit an der Universität zur unvergesslichsten Zeit meines bisherigen Lebens macht. Ich werde voller guter Erinnerungen auf diese schöne Zeit zurückblicken.

Der *letzte und bedeutendste* Dank gebührt den wichtigsten drei Menschen meines Lebens, meiner lieben Amelie und meinen herzlichen Eltern, Heike und Andreas Holl. Die aufopfernde, zwanglose Unterstützung die ihr mich in allen Lebensphasen spüren lasst - trotz all meiner Ecken und Kanten - werde ich nie vergessen. Diese Arbeit ist euch gewidmet.

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

Darmstadt, im April 2017
Mario Holl

*Wahrlich, es ist nicht das Wissen, sondern das Lernen,
nicht das Besitzen, sondern das Erwerben,
nicht das Dasein, sondern das Hinkommen,
was den größten Genuss gewährt.*

Carl Friedrich Gauß, 1808

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Relevanz	1
1.2	Stand der Forschung	2
1.3	Einordnung der Forschungsfrage	9
1.4	Aufbau der Arbeit	10
2	Methode	12
2.1	Systemsynthese	16
2.2	Systemanalyse unter Unsicherheit	19
2.2.1	Technische Modellbildung	20
2.2.2	Ökonomische Modellbildung	24
2.2.3	Ökologische Modellbildung	28
2.3	Stochastische Systemoptimierung	38
2.4	Sensitivitätsanalyse	42
3	Anwendung	51
3.1	Konzeptvorstellung	51
3.2	Methodische Evaluation des Konzepts	53
3.2.1	Systemsynthese	54
3.2.2	Systemanalyse unter Unsicherheit	60
3.2.3	Stochastische Systemoptimierung	79
3.2.4	Sensitivitätsanalyse	88
4	Diskussion	94
4.1	Der Vergleich optimaler Systeme	95
4.2	Die Bedeutung der Unsicherheit	98
4.3	Die Vereinbarkeit optimaler Systeme	106
4.4	Die Grenzen der Methode	110
	Zusammenfassung	114
	Fazit	116