

Vortrag anlässlich der Ehrenpromotion von Hans-Ulrich Banzhaf,  
23. Januar 2014, Universität Siegen

## 250 Jahre Energienutzung: Algorithmen übernehmen Synthese, Planung und Betrieb von Energiesystemen

Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz,  
Institut für Fluidsystemtechnik,  
Technische Universität Darmstadt.

24. Januar 2013

### **1. Der Blick zurück: Die zwei Meilensteine, die unsere Welt veränderten**

Die moderne Energiewelt hat bisher nur zwei radikale Meilensteine gesehen, nämlich die Jahre 1764 und 1867.

1

*Zum ersten Meilenstein:* 1764 veränderte James Watt die Welt, indem der Feinmechaniker an der Universität Glasgow die Effizienz des Wärmekraftprozesses um den Faktor 10 steigerte. Damit entzündete er das Energiezeitalter, das 250 Jahre andauert und mindestens so lange reicht, bis der letzte fossile Brennstoff verbrannt sein wird. Durch die Innovation von Watt konnten 3% der dem Prozess, durch Verbrennung von Kohle, zugeführten Wärmeenergie in mechanische Arbeit gewandelt werden. Demgegenüber hatte die Wärmekraftmaschine von Thomas Savery nur 0.3% Ausnutzung. Die besten Kraftwerke erreichen heute einen Anteil von 60.75%. Gut sind bereits 43%, so beim Braunkohlekraftwerk Neurath, das 9.2 TWh elektrische Energie pro Jahr bereitstellt. Damit würde Neurath 10 000 000 Kochwaschgänge pro Jahr ermöglichen.

Vor James Watt hatte der Mensch nur seine eigene Arbeitskraft oder die seines Ochsens. Nach 1764 ist die Arbeitsleistung des Einzelnen durch Maschinenunterstützung um Größenordnungen gesteigert.

*Zum zweiten Meilenstein:* 1867 elektrifizierte Werner von Siemens durch Erfindung des Dynamos die Welt. Ökonomisch führte dies zur räumlichen Trennung der Angebots- und Verbrauchsseite, von Kraft-

und Arbeitsprozessen. Maschinen wurden schnellläufig, Turbomaschinen ersetzen langsamläufige Verdrängermaschinen. Vor Werner von Siemens war der Müller auf Wasserkraft oder Windkraft angewiesen. Nach 1867 konnten elektrische Arbeitsmaschinen praktisch überall eingesetzt werden. Watt und Siemens waren nicht nur exzellente Techniker sondern auch Unternehmer, die es verstanden Märkte zu nutzen und zu gestalten: Die Verfügbarkeit von elektrischer Energie ist heute ein bestimmender Faktor für die Wirtschaftsstärke einer Region.

In der Folge des Energiezeitalters werden Ölfunde von Ölkrisen, die friedliche Nutzung der Atomkraft durch Katastrophen abgelöst. Immer ist es ein Wechsel von Hoffnung und enttäuschter Hoffnung auf der Produktionsseite. Sie zeigen unsere verzweifelte Suche nach neuen Energiequellen, die aber nicht die gleiche verändernde Wirkung auf unsere Welt gehabt haben, wie die beiden Jahre 1764 und 1867.

## ***2. Die Wissenschaft liefert innovationsfördernde absolute Maße der Art „Besser geht's nicht“***

2

---

Wenn heute über 60% Energieausbeute bei Wärmekraftprozessen möglich sind, so muss man sich fragen, ob auch 100% Energieausbeute denkbar sind. Die Antwort lautet nein! Der Ingenieur Sadi Carnot zeigte 1824 [1], dass die Ineffizienz, das ist das Komplementär zum Systemwirkungsgrad, umgekehrt proportional zur Systemtemperatur ist. D.h. der Systemwirkungsgrad hängt von den technisch erreichbaren Temperaturen ab und ist auf alle Fälle kleiner 100%. Carnot begründete mit seiner Neugierde und seinem Streben nach Klarheit einen neuen Wissenschaftszweig, die Thermodynamik, die nicht der Naturbeobachtung sondern der Technikbeschreibung entspringt. Mit dem Satz von Carnot steht uns für bestehende Technologien und Materialien ein **absolutes Maß** zur Verfügung, mit dem wir die Güte von Wärmekraftprozessen bemessen können.

Die Existenz und Kenntnis eines absoluten Maßes hat zwei Vorteile: Erstens können Planer und hoffentlich in Zukunft die Gesellschaft (Marktüberwachung) Systeme auf der Basis existierender Technologien bewerten.

Zweitens ist das Maß Ansporn und Wegweiser, um Prozesse und Technologien zu verbessern. Dass dies gelingt, zeigt die Entwicklung von

Hochtemperaturwerkstoffen beim Wärmekraftprozess: Die Kenntnis des absoluten Maßes fördert Innovationen.

Tatsächlich hat die Ingenieurwissenschaft auch bei anderen Kraftprozessen vergleichbare absolute Maße gefunden:

Um 1900 entstanden in Deutschland die ersten Kohlekraftwerke und die Kohleknappheit nach dem ersten Weltkrieg führte dazu, dass viele Erfinder aber auch Wissenschaftler sich mit Windkraft beschäftigten. Der Göttinger Ingenieurwissenschaftler und Strömungsforscher Albert Betz schuf 1921 seine Grundlagen der Windkraft aus der Motivation heraus, wie er wörtlich schreibt: *„[Den] Erfinder von der Aussichtslosigkeit seiner Ideen zu überzeugen und ihn dadurch vor unnötigen Verlusten [zu] bewahren...“*. Indem Betz das System und nicht dessen Einzelkomponenten behandelte, gelangte er zu einer globaloptimalen Lösung, die als Betzsches Gesetz bekannt ist.

Der Weg zur Lösung kommt über die richtige Frage: Häufig stellen Ingenieure und Gesetzgeber die nicht zielführende Frage: „Wie kann der Maschinenwirkungsgrad erhöht werden?“. Betz dagegen stellt die Frage: „Wie kann die Energie im Abstrom minimiert werden?“. Die erste Frage betrifft die einzelne Komponente eines Systems. Die zweite Frage betrifft das System als Ganzes.

3

---

Das Betzsche Gesetz hat die Entwicklung der Windturbinen nach der Zeit der ersten Ölkrise stark beeinflusst. Heute wird die Güte aller Windkraftprozesse nach der absoluten Messlatte von Betz beurteilt.

Im Jahr 2011 wurde ein analoges, axiomatisch begründetes Gesetz für Wasserkraftsysteme gefunden [1]. Wiederum ist es für Potentialabschätzungen aber auch den optimalen Betrieb eines Systems von Nutzen. Bei Wasserkraftsystemen (Gezeitenkraft, Flusskraftwerke) kann maximal die Hälfte der verfügbaren Energie in mechanische Arbeit gewandelt werden. Die verbleibende Energie geht sprichwörtlich „den Bach hinunter“ und ist unter keinen Umständen nutzbar.

Die Wissenschaft hat nicht nur die Verantwortung über die Angebotsseite sondern auch über die Nachfrageseite nachzudenken. Im Folgenden steht die Frage „Wozu brauchen wir Energie?“ im Zentrum.

### 3. Wozu brauchen wir Energie?

Wir brauchen Energie in den vier Bereichen:



**Arbeitsprozesse:** Mittels Energie steigern wir unsere Arbeitsleistung in mobilen oder stationären Arbeitsmaschinen um mehrere Zehnerpotenzen.



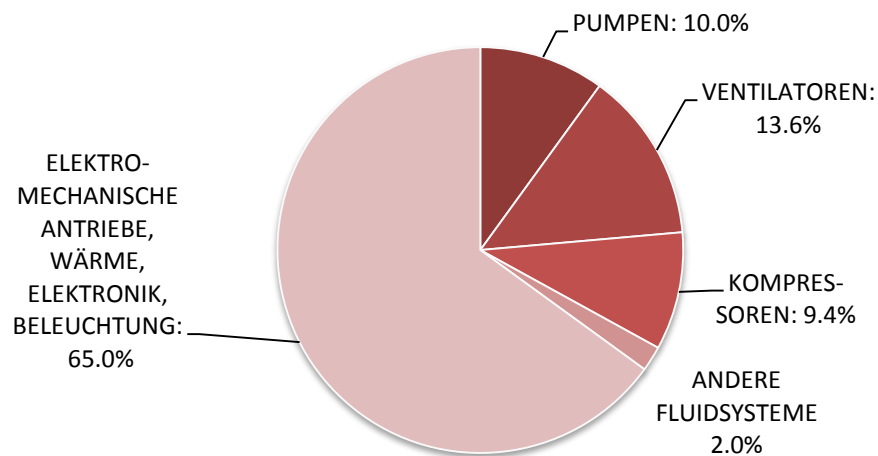
**Gebäude:** Wir heizen oder kühlen Gebäude, so dass sie für uns bewohnbar sind. Wir beleuchten Gebäude und nutzen Energie zum Betrieb von Rechnern und Kühlen von Rechenzentren.



**Wasser und Chemie:** Wir nutzen Energie für die Aufbereitung von Wasser und Luft, deren Transport sowie für chemische Prozesse.



**Transport:** Der Transport von Personen und Waren ist ohne Energie nicht möglich, wobei wir auf absehbare Zeit chemisch gebundene, flüssige Energie in Form von Diesel, Benzin und Kerosin benötigen.



**Abb. 1:** Fluidsysteme der Wirtschaft verbrauchen 35% der elektrischen Energie [4]...[17].

Zum Heizen von Gebäuden und zum Transport von Gütern und Personen verbrennen wir meist Gas oder Öl. Dies macht annähernd die Hälfte unseres Primärenergiebedarfes aus.

5

Den dritten Anteil der Primärenergie einschließlich regenerativer Energie benötigen wir zur Stromproduktion. Mittels elektrischer Leistung treiben wir Produktionsmaschinen an, beleuchten Gebäude, speisen CPUs und fördern Wasser und Luft in Pumpen und Ventilatoren. Wir treiben Verdichter für Druckluftsysteme oder Kühlsysteme an. Die größten Verbraucher an Sekundärenergie sind Fluidarbeitssysteme. Dabei wird über einen Elektromotor und eine Pumpe, einen Ventilator, oder einen Verdichter der Flüssigkeit, bzw. dem Gas, Energie zugeführt. Mehr als ein Drittel der produzierten elektrischen Energie wird in Fluidarbeitssystemen irreversibel in Wärme verrieben. In Europa brauchen wir 103 Wärmekraftwerke vom Typ Neurath [18] allein um Prozessfunktionen wie Heizen, Kühlen, chemische Reaktion, Filtration, Wasseraufbereitung, Wasserversorgung ... zu ermöglichen.



**Abb. 2:** Das Äquivalent von 103 Großkraftwerke [8] wird in Europa ausschließlich zum Fördern von Gasen und Flüssigkeiten benötigt.

#### **4. Wie kann eine Prozessfunktion mit minimalen Energieaufwand erfüllt werden?**

Wie bei Kraftsystemen gibt es auch bei Arbeitssystemen zielführende und irreführende Fragen.

6



**Abb. 3:** Die Systemkomponente im Mittelpunkt (Bildquelle [19])

Wiederum legender Ingenieur, der Ökonom und die Politik häufig den Fokus auf die Systemkomponente und stellen die Frage „Wie können die Energieverluste innerhalb der Maschine reduziert werden?“. Der Gesetzgeber folgt dem Techniker und fordert Mindestwirkungsgrade für

einzelne Maschinen, was in der Wirkung auf die CO2 Einsparungen von geringer Auswirkung ist.

Ein Beispiel ist hierfür ist der „Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe“, herausgegeben vom Bayerischen Landesamt für Umwelt im Jahr 2009.

Hier muss ein Umdenken stattfinden. Die falsche Frage betrifft das Modul, die richtige Frage das System.

Richtig ist es, die drei Fragen zu stellen:

1. Was ist die Systemfunktion?
2. Wie kann die geforderte Prozessfunktion mit minimalem Energieaufwand erfüllt werden?
3. Wie groß ist das Spielfeld der technischen Möglichkeiten?



7

**Abb. 4:** Fluidsystem zur Kühlung eines Rechenzentrums der Fa. Google.

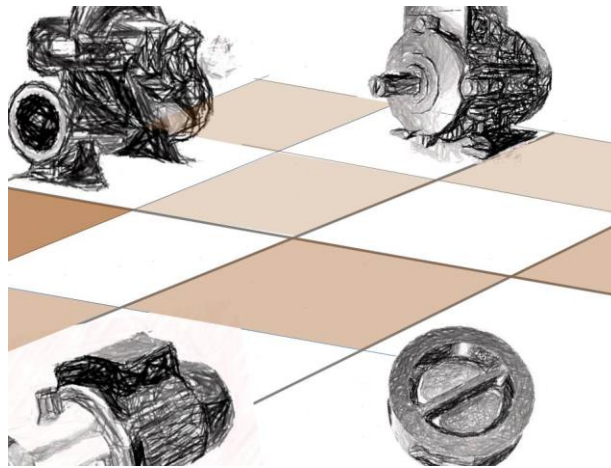
Die Systemfunktion ist z.B. die Kühlung eines Rechenzentrums. Das Spielfeld besteht aus Rohrleitungen, Pumpen unterschiedlicher Größe, Elektromotoren, Frequenzumrichtern, Ventilen und den Reaktoren, in diesem Fall den Wärmetauschern. Die Antwort auf die Frage 2 besteht darin, die Komponenten aus dem Spielfeld so anzuordnen, zu verschalten und zu betreiben, dass die Prozessfunktion mit minimalem Energieaufwand erfüllt werden kann. Für einfache Systeme gelingt dem Planer die energetisch optimale Synthese, für größere Systeme ist dies unmöglich.



Der Grund liegt in der, für den Menschen unüberschaubaren, Zahl von möglichen Entscheidungen. Die Fragen sind immer diskret, d.h. der Art „Komponente A oder B?“. Bei einer Verschaltung von 6 Komponenten eines Pumpensystems sind über 5504 Varianten möglich!

Ganz Ähnliches geschieht beim Schachspielen. Hier lautet die Frage „Springer oder Läufer?“. Seitdem 1997 die IBM Maschine „Deep Blue“ gegen den Schachgroßmeister Kasparow gewann, ist es anerkannt, dass Schachalgorithmen bessere Spiellösungen als Menschen finden.

Hier setzen wir an und übertragen Ideen aus Mathematik und Algorithmik auf technische Systeme.



**Abb. 5:** Algorithmen synthetisieren technische Systeme analog zu Schachalgorithmen.

Heute ersetzen Maschinen Menschen dann, wenn Zeit und Geld gespart oder Qualität verbessert werden kann [20]. Unsere Motivation ist eine andere, nämlich Algorithmen (Maschinen) dafür zu nutzen, um optimale Energiesysteme zu planen und zu betreiben. Wir wollen auf die bereits gestellte Frage „*Wie kann eine Prozessfunktion mit minimalem Energieaufwand gelöst werden?*“ eine Antwort geben.





**Abb. 6:** Ingenieurstudenten der TU Darmstadt treten gegen den Planungscomputer TOR an.

Hierzu entwickeln wir die neue Forschungsrichtung TOR, Technical Operations Research [21]. TOR wird im Team von Ingenieuren, Mathematikern, Physikern und Informatikern entwickelt.

### **Warum ist die Methode TOR heutigen Planern überlegen?**

In unseren Versuchen gelang es allen Ingenieuren, die geforderte Systemfunktion zu erfüllen. In keinem Fall war der energetische Aufwand dabei so gering wie bei der von TOR vorgeschlagenen Lösung.

Woran liegt dies? Wir Ingenieure reduzieren Komplexität, indem wir Systeme gedanklich in überschaubare Baugruppen oder Komponenten zerlegen und diese für sich in Funktion und Effizienz verbessern. In der Kriegsführung wurde dieses Prinzip bereits 500 v. Chr. als „Teile und herrsche Prinzip“ durch Meister Sun in seinem Buch „Die Kunst der Kriegsführung“ beschrieben. Das Zusammenwirken der Module (Pumpen, Ventilatoren, ...) resultiert in der gewünschten Systemfunktion. In den Ingenieurwissenschaften wird das Prinzip „Teile und herrsche“ Funktionstrennung genannt und hat in der Tat zu einem großen Erfolg geführt.

Heute sind Ingenieure aber zunehmend gefordert, neben der Funktion weitere Ziele, wie die Anforderung nach minimalem Energieverbrauch oder maximaler Robustheit oder minimaler Investition, zu erfüllen.

Zwar ist es leicht zu fordern, aus der Variantenvielfalt die optimale Variante auszuwählen, so wie in der Systemtechnik von Pahl und Beitz, allein der Mensch ist damit überfordert, wie oben deutlich wurde.

Heute planen wir bereits erste Energiesysteme mittels TOR. So suchen wir für einen gegebenen Standort den optimalen Mix aus Speicher und Kraftsystemen, so z.B. für den Energiecontainer der IAV GmbH, oder wir planen die energetisch optimale Heizungs- und Kühlungsanlage für das

Darmstädter Kongresszentrum darmstadtium. Dabei findet TOR nicht lokale Optimum sondern globale Optimum. Damit haben wir wiederum einen absoluten Maßstab.

### **Die Zukunft der Energiesysteme**

Arbeit, die von Maschinen bzw. Algorithmen gemacht werden kann, soll auch von Maschinen gemacht werden, so Stanislaw Law. Dies gilt nach unserer Überzeugung auch für Planung, Synthese und Betrieb von Energiesystemen, und zwar nicht primär um Kosten zu sparen, sondern weil wir die Verantwortung haben, mit Energie sparsam umzugehen. Hieran arbeiten wir mit der Methode TOR.

Planer, Betreiber, Lieferant und Marktüberwachung müssen an einem Strang ziehen. Dem Planer und Betreiber kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Der Komponentenlieferant hat die Aufgabe, das Spielfeld mit innovativen Lösungen zu füllen. Derzeit ist aber der Komponentenlieferant im Fokus, das ist häufig der deutsche Maschinenbau, der zu einem Großteil die Wertschöpfung und den Wohlstand liefert. Aus energetischer Sicht ist es sekundär, ob die Komponente einen Wirkungsgrad von 90% oder 92% hat. Wesentliche Energieeinsparungen lassen sich im System erzielen und hierfür ist der Planer und Betreiber verantwortlich. Beide haben keine wirtschaftlichen Anreize, energetisch optimale Systeme zu schaffen. Ihnen kommt es allein auf die Funktion an.

So wie die Mechatronik, die Verbindung von Maschinenbau und Regelungstechnik, den Verbrennungsmotor im Automobil effizient gemacht hat, so ist heute auch eine „mechatronische Veredelung“ von Fluidenergiemaschinen festzustellen. Fluidenergiemaschinen sind heute ohne Drehzahlregelung nicht mehr vorstellbar. Dadurch lässt sich energetisch optimal auf eine Prozessanforderung reagieren.

Der nächste Schritt wird die Vernetzung der Komponenten eines energieverbrauchenden Systems sein. Hierfür ist Voraussetzung, dass der Betriebszustand durch Messung bekannt ist. Sind die einzelnen Komponenten untereinander vernetzt, so können sie autonom bei einer festgelegten Topologie eine energetisch optimale Systemantwort liefern. Die Vernetzung der Komponenten ist im Maschinenbau unter dem Stichwort Industrie 4.0 bekannt.

Häufig wird aber vergessen, dass die mechatronischen Ansätze und die der vernetzten Regelung eine bestehende Systemtopologie voraussetzen. Ist diese schlecht, dann können sich die Komponenten zwar über das schlechte System unterhalten, sie können es aber hinsichtlich Energieeinsparung nicht signifikant verbessern, da nachträglich die Struktur nicht verändert werden kann. Das fehlende Glied, nämlich die Ermittlung einer optimalen Systemtopologie, liefert die Methode TOR am Anfang eines Projektes.

### **Gemeinsame Zukunftsaufgaben**

Gemeinsam haben wir fünf Aufgaben zur Gestaltung der Zukunft bei Energiesystemen:

1. Anstatt die Komponente und die einzelne Technologie in das Zentrum unseres Denkens und Handelns zu stellen, muss unsere Konzentration dem System gelten.
2. Die Wissenschaft hat die Aufgabe, absolute Maße für Energiewandlungsprozesse zu liefern. An diesen absoluten Maßen lassen sich tatsächliche Wandlungsprozesse messen.
3. Algorithmen wie TOR müssen dem Ingenieur Planungsaufgaben abnehmen. Durchgeführte Planungen müssen sich an globaloptimalen Lösungen von TOR messen lassen.
4. Die Politik darf keinesfalls Technologien vorschreiben oder einzelne Technologien gezielt subventionieren, so wie es derzeit geschieht. Richtig ist es wirtschaftliche Anreize zu schaffen, CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen. Dies kann gleichermaßen auf der Produktionsseite wie auf der Verbrauchsseite geschehen.
5. Letztlich ist die Gesellschaft durch Schulung auf neue Anforderungen vorzubereiten. Einerseits sind Handwerker in Sensorik und Regelungstechnik zu schulen, so wie es in der Automobilindustrie seit langem der Fall ist. Auf der anderen Seite sind interoperable Fähigkeiten zwischen Betreiber, Planer, Hersteller und Marktüberwacher zu schulen. Letzteres ist Aufgabe der Hochschulen. Hierzu konzeptionieren Kollegen an der TU Darmstadt derzeit neue Schulungskonzepte für die kooperative Systemsynthese.

### **Literaturverzeichnis**

- [1] Carnot: "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance."

- Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure Sér. 2, 1 (1872).
- [2] Betz: "Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren."  
Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen (1920).
- [3] Pelz: „Upper Limit for Hydropower in an Open-Channel Flow“,  
Journal of Hydraulic Engineering,  
DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000393 (2011).
- [4] BMWi; Energie in Deutschland; 2013
- [5] [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main\\_tables](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables)
- [6] Verbrauchsdaten der Aggregate:
- [7] EuP, Lot 11, Appendix 7; Circulators in Buildings; 2008
- [8] EuP, Lot 11, Appendix 5; Water Pumps; 2008
- [9] EuP, Lot 11, Final report; Fans vor ventilation...; 2008
- [10] EuP, Lot 11, paper; implementing Directive 2009125EC...; 2010
- [11] EuP, Lot 31, Preparatory Study; Compressors; 2012
- [12] EuP, Lot 10 , Preparatory Study; Residential room conditioning...
- [13] EuP, Lot 12, Final Report; Commercial refrigerators & freezers; 2007
- [14] EuP, Lot 1, Preparatory Study; Refrigerating and freezing equipment
- [15] EuP, Lot 6, Preparatory Study; Air-conditioning systems
- [16] EuP, Lot 16, Final Report; Laundry dryers; 2009
- [17] EHPA; 4th EHPA market report and statistics; 2011
- [18] [http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk\\_Neurath](http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Neurath)
- [19] <http://www.brandeins.de>
- [20] Kurz, Rieger: "Arbeitsfrei-Eine Entdeckungsreise zu den Maschinen, die uns ersetzen".  
ISBN: 978-3-570-50155-9 Riemann, (2013).
- [21] [http://www.fst.tu-darmstadt.de/forschung\\_fst/systemoptimierung/index.de.jsp](http://www.fst.tu-darmstadt.de/forschung_fst/systemoptimierung/index.de.jsp).