

Effiziente Energiewandlung als Optimierungs- und Skalierungsaufgabe

Nun sag', wie hast du's mit der Energieeffizienz? Obgleich wir alle rufen, „höchste Priorität“, bleibt die Antwort nach dem „Wie“ zumeist so vage wie die Antwort auf Gretchens Frage: „Umnebelnd Himmelsglut“. Könnten wir einen Mikroorganismus fragen, so bekommen wir die Antwort „das kümmert mich nicht“. In der Tat liegt der Propulsionswirkungsgrad bei nur etwa 1 % [10]. Der Mikroorganismus hat kein ökonomisches Problem, Energie ist für ihn unbeschränkt verfügbar. Er ist mit einem Cadillac Sedan aus den 1960er Jahren vergleichbar. Heute beantworten wir durch unsere Forschung die Frage nach dem Wie, indem das System im Fokus ist.

► What do you think of energy efficiency?

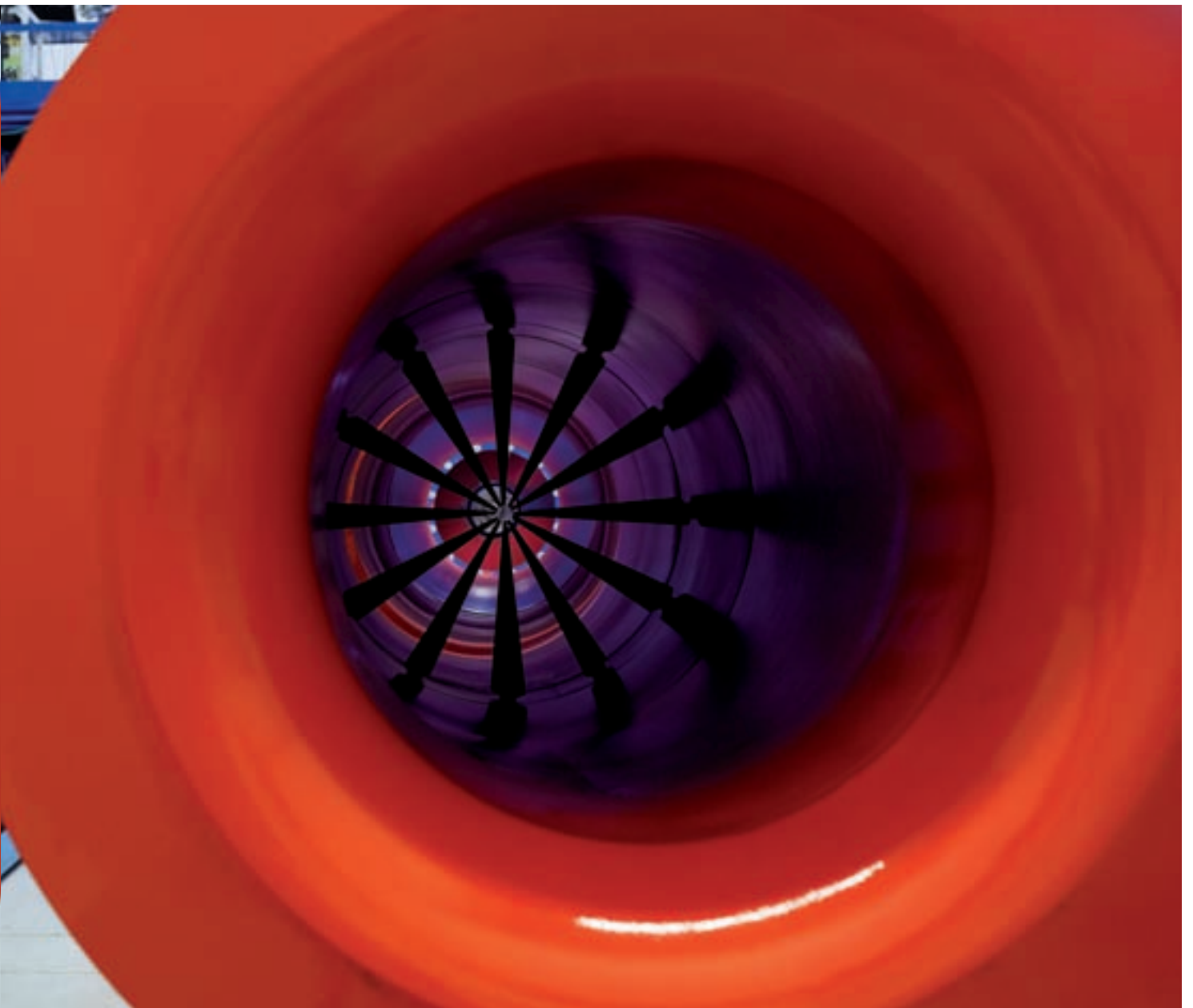
„It's of first priority, of course“ we all answer. But the answer to the question „How do you reach the efficiency“ remains such vague like the answer to the Gretchen question: „Enshrouding heaven's glow“. If we could ask a micro-organism he (or she) would answer „I do not pay much attention to it“. Indeed the propulsion efficiency of the micro-organism is only about 1 % [10]. The organism has no economic restriction, since the chemical energy is unlimited for him. In fact it is like driving a Cadillac Sedan in the 60th. Today, our research gives the answer to the crucial question. We put the system in our focus.

Peter Pelz, Ulf Lorenz • In der Technik und der gesellschaftlichen Diskussion gibt es immer wieder Begriffe, die unpräzise sind oder aus Marketinggründen irreführend eingesetzt werden. Solch ein Begriff ist „Energieeffizienz“. Versteht man den Weg zur Energieeffizienz als ein zweistufiges Verfahren, nämlich in erster Linie eine Optimierung des Systems und in zweiter Linie eine Skalierung zum Beispiel des Wirkungsgrades einzelner Module des Systems, so kann eine Diskussion, die heute alle Ingenieurbereiche betrifft, sachlich geführt werden.

Als Beispiel dient ein Thema, welches jedem vertraut ist, nämlich ein Wasserrad in einem fließenden Gewässer: Im Jahr 1846 schreibt der Begründer des wissenschaftlichen Maschinenbaus in Deutschland, Ferdinand Redtenbacher, im Vorwort seiner Monographie „Theorie und Bau der Wasserräder“ [1]: „Ein Werk über die Wasserräder mit horizontalen Achsen ist zwar im gegenwärtigen Augenblick keine zeitgemäße Erscheinung, denn diese Räder sind durch die rapide Verbreitung der Turbinen fast eine Antiquität geworden. Allein wenn auch ihre Bedeutung nicht mehr so gross ist, als sie es noch vor einigen Jahren



war, so sind und bleiben dieselben doch noch immer nützliche Kraftmaschinen, die durch die Turbinen wohl nie ganz verdrängt werden können.“ Heute, 165 Jahre nachdem Ferdinand Redtenbacher dies geschrieben hat, sind Wasserräder prak-



tisch vollständig verschwunden. Warum ist dies so? Wie weiter unten ausgeführt und in [6] gezeigt, sind bei gleicher Leistungsumsetzung der Materialbedarf und damit die Kosten für ein Wasserrad größer im Vergleich zu einer schnellläufigen Tur-

bine. Trotz alledem erleben Wasserräder heute eine Renaissance und werden für Kleinwasserkraftwerke < 0.1 MW propagiert. Als Argument für Wasserräder wird allein deren hydraulischer Wirkungsgrad herangezogen.

Elemente eines Fluidarbeitsystems im Labor Fluidsystemtechnik: Luftführung mit Drossel.



Abbildung 1
Skalieren von
Antriebssystemen am
Beispiel des Ruderns.



Abbildung 2
Ferdinand
Redtenbacher.

Über dieses Beispiel hinaus stellt sich die Frage, ob der Wirkungsgrad generell das Bewertungsmaß für Energieeffizienz ist? Um die Antwort vorwegzunehmen: Sie lautet „Nein“!

Die Wirkungsgradbetrachtung ist immer Teil einer **Skalierungsaufgabe** eines Moduls. Deutlich wichtiger und damit vorrangig ist die **Optimierungsaufgabe** des Systems. Diese entscheidet im Wesentlichen über die leistungsspezifischen Investitionskosten und damit über den Erfolg oder Misserfolg einer Technologie.

Optimierung und Skalierung von Fluidsystemen

Im Folgenden werden die vier Fluidkraftsysteme Wind-, Wasser-, Wellenkraft und Energiegewinnung aus einem Druckspeicher im Kontext von Optimierung und Skalierung betrachtet. Die hier dargestellte Aufteilung zwischen Optimierung und Skalierung gilt für Fluidarbeitssysteme (Lüftungssysteme, Wasserversorgung, verfahrenstechnische Anlagen, ...) ganz entsprechend. Der Unterschied liegt in der funktionellen Aufgabe des Systems. Bei Fluidkraftsystemen steht ein Energieangebot am Anfang und es ist Aufgabe pro Zeiteinheit

möglichst viel der angebotenen Energie in mechanische Energie zu wandeln. Bei Fluidarbeitssystemen steht eine Nachfrage nach Luft, Wasser, ... pro Zeiteinheit im Vordergrund.

Um in den Abschnitt einzuführen, ist auch hier ein Blick in die Vergangenheit nützlich. Im Jahr 1920 veröffentlichte Albert Betz [2] eine noch heute grundlegende und weit genutzte Arbeit über Windräder, die die Optimierungsaufgabe exemplarisch darlegt.

Die Optimierungsaufgabe

Heute sind Windräder alltägliche Erscheinungen. Man stellt sich leicht die Strömung durch die Rotorebene eines Windrades vor. Die Strömung ist durch zwei Extreme geprägt, bei denen die umgesetzte Leistung klein ist. Im ersten Fall stört das Windrad die Luftströmung zu sehr, im zweiten Fall so wenig, dass keine Druckänderung über das Windrad stattfindet und die Leistung als Produkt von Volumendurchsatz pro Zeiteinheit und Druckdifferenz verschwindet. In diesem Intervall findet sich das Optimum. Durch Ausnutzung grundlegender Axiome (Impulssatz, Kontinuität) konnte Betz in einer sehr einfachen und eleganten Rechnung zeigen, dass das Optimum dann erreicht ist, wenn das Windrad die Strömungsgeschwindigkeit gerade auf $1/3$ der ungestörten Anströmungsgeschwindigkeit reduziert. Von der theoretisch verfügbaren aerodynamischen Leistung, von Betz als Fluss der kinetischen Energie durch die von den Rotorblättern aufgespannte Kreisscheibe der Fläche A mit $P_{\text{avail}} = \rho/2 u_1^3 A$ (die Dichte der Luft ist mit ρ bezeichnet) definiert, kann hiervon selbst bei

Institut für Fluidsystemtechnik, Fachbereich Maschinenbau
Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Tel. 06151/16 2153
E-Mail: peter.pelz@fst.tu-darmstadt.de
www.fst.tu-darmstadt.de

Forschungsbereich Optimierung, Fachbereich Mathematik
PD Dr. rer. nat. Ulf Lorenz
E-Mail: lorenz@mathematik.tu-darmstadt.de
www3.mathematik.tu-darmstadt.de/index.php?id=537



Abbildungen 3 a, b
Windturbine und
Wasserturbine.

Abbildung 4
Leistungsziffer
für ein
Windkraftsystem.

Abbildung 5
Leistungsziffer
für ein
Wasserkraftsystem.

verlustfreier Strömung (Wirkungsgrad η gleich Eins) nur der Anteil $16/27 = 0.59$ pro Zeiteinheit in mechanische Energie gewandelt werden. Die verbleibenden 41 % sind als kinetische Energie im Nachlauf des Windrades enthalten.

Das Verhältnis von abgeführter mechanischer Leistung zur verfügbaren Leistung, Leistungsziffer oder Erntefaktor C_p genannt, ist in Abbildung 4 für die Windturbine über der einen unabhängigen Veränderlichen $u_+ = u_2/u_1$ aufgetragen. In dieser Darstellung ist die **Optimierungsaufgabe** für das System Windkraft selbsterklärend und bei bekannter Funktion $C_p(u_+)$ und dem aerodynamischen Wirkungsgrad ohne Probleme durchführbar. Das Modul Windturbine wird ergänzt durch das mechanische und hydrodynamische Getriebe und dem Generator. Die dissipativen Verluste in diesen Systemkomponenten werden wiederum durch Wirkungsgrade beschrieben.

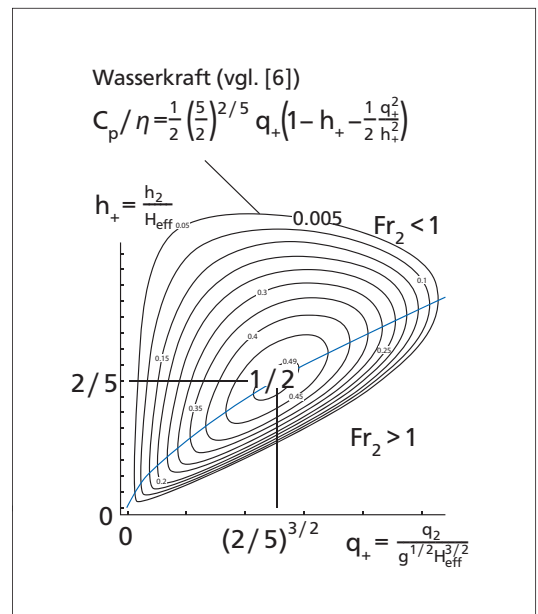
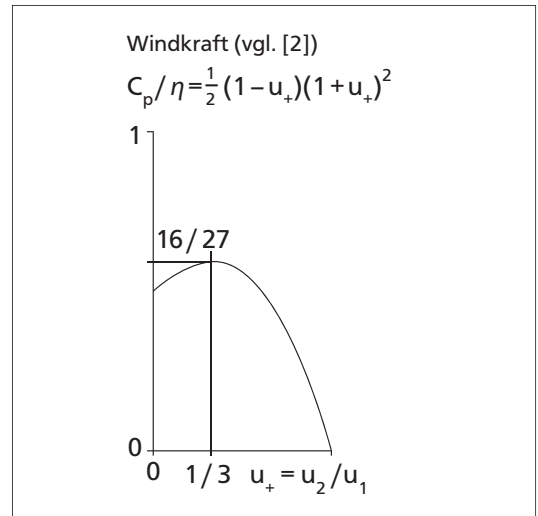
Der Nutzen der Betzschen Analyse hat zwei Aspekte:

Erstens ist eine klare Messlatte für die Energieausbeute einer Windströmung gegeben und zwar unabhängig von der Art der Maschine (z. B. horizontale oder vertikale Drehachse).

Zweitens wird das Betzsche Ergebnis genutzt, um Windräder gezielt auszuliegen.

So zeigte bereits Betz, dass mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit im Verhältnis zur Anströmgeschwindigkeit der Materialbedarf sinkt, wodurch die leistungsspezifischen Investitionskosten reduziert werden [3].

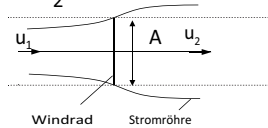
Die Abnahme der Baugröße und damit des Materialbedarfs mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit



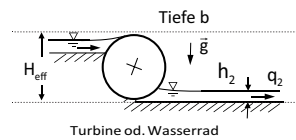
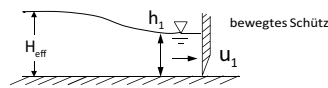
keit passt wie der Wirkungsgrad unter das Stichwort „Skalierung“. Das für Windräder geltende, gilt genauso für hydraulische Maschinen. Wasserräder sind im Kern hydrostatische Maschinen, die langsam drehen. Bei gleichem Gefälle und Volumenstrom ist der Materialeinsatz für Turbomaschinen deutlich reduziert (bei hydrostatischen Antrieben gilt dieses so nicht, da der Druck nur durch die Materialfestigkeit begrenzt ist). Der hohe Materialbedarf ist der eigentliche Grund dafür, dass heute praktisch keine Wasserräder mehr zu finden sind. Bei gleicher Leistungsumsetzung sind die Investitionskosten bei Turbinen signifikant kleiner (vgl. auch [4], [6]). Die historische Entwicklung demonstriert die Wichtigkeit der leistungsspezifischen Investitionskosten, welche bei Kleinwasserkraftwerken um den Faktor 6 über denen von Windturbinen liegen [5].

Windkraft (Betz vgl. [2])

$$P_{\text{avail}} := \frac{\rho}{2} u_1^3 A$$



Wasserkraft (Pelz vgl. [6])

ideale Maschine ($h_2=0$)

$$P_{\text{avail}} := 2\rho H_{\text{eff}}^{5/2} \left(\frac{2}{5}\right)^{5/2} g^{3/2} b$$

Modell eines Wellenkraftwerks



Vor diesem Hintergrund ist die Optimierungsfrage zu stellen:

Welche mechanische Leistung kann maximal aus einer Wasserströmung mit freier Oberfläche gewonnen werden?

Die Antwort auf diese Frage ist in dreifacher Hinsicht von Interesse:

Erstens können technisch-konstruktiv unterschiedliche hydraulische Maschinen auf einer objektiven Basis verglichen werden. Dies ist für eine seriöse ingenieurwissenschaftliche Diskussion unerlässlich. **Zweitens** kann die Gesellschaft, d. h. Politik und Investoren, auf der Basis realistischer oberer Grenzen Entscheidungen fällen.

Drittens und letztens: Wie bei Windkraftmaschinen dient die Obergrenze als ein Anreiz, Maschinen mit geringen leistungsspezifischen Investitionskosten zu entwickeln.

Interessant ist, dass die Frage bis vor kurzem nicht gestellt wurde. Tatsächlich ist sie für große Wasserkraftanlagen bzw. große Gefälle nicht relevant. Für Wasserkraftwerke mit kleiner Leistung aber umso mehr!

Die Frage nach der zur Verfügung stehenden Leistung ist bei einer Wasserkraftanlage schwieriger zu beantworten als bei einer Windkraftanlage. Die ideale Maschine ist eine Maschine ohne Unterwasser, wie sie Abbildung 6b unten zeigt. Im Gedankenexperiment [6] stellt man sich das Gerinne aufgestaut bis zur effektiven Höhe vor. Die effektive Höhe ist der ungestörten Windgeschwindigkeit beim System Windkraft analog und beschreibt das Energieangebot.

Abbildung 6a, b
Windkraft- und Wasserkraftsystem.

Unten links in der Abbildung: Jakob Ackeret, Ludwig Prandtl, Albert Betz und Adolf Busemann vor einem Modell des Flettner Rotorschiffes.

Abbildung 7
Modell eines Wellenkraftwerks am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt.

Eine Analyse zeigt: Wird das Schütz mit $\sqrt{2}/2$ der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bewegt, dann wird gerade die in Abbildung 6 gezeigte verfügbare Leistung erreicht, welche die Bezugsgröße zur Definition der Leistungsziffer (Erntefaktor) ist.

In Abbildung 6b rechts ist die **Optimierungsaufgabe** für die Wasserkraftanlage dargestellt [6]. Ungeachtet von gesetzlichen Vorgaben (z. B. durch das Wasserrecht) sind prinzipiell die Spiegelhöhe des Unterwassers und der Volumenstrom pro Tiefeneinheit im Unterwasser frei einstellbar. Wichtiges Ergebnis ist die maximal erreichbare Leistungsausbeute von $\eta \rho g^{3/2} H_{\text{eff}}^{5/2} (2/5)^{5/2} b$, welche selbst bei einem Wirkungsgrad η von Eins exakt die Hälfte der idealen Maschine ohne Unterwasser ausmacht (Massenkraft der Schwere g , Wasserdichte ρ , Breite des Gerinnes b , effektive Höhe H_{eff})!

Betrachtet man andere Fluidkraftsysteme so trifft man immer wieder analoge Optimierungsaufgaben. Bei dem in Abbildung 5 dargestellten Zweimassenschwinger, der als Modell für ein Wellenkraftwerk dient, ist die dem System entziehbare Leistung dann maximal, wenn das System in der Resonanz arbeitet und die Kraft des Absorbers (das hydrostatische arbeitende, rote Bauteil in Abbildung 7 stellt den Absorber dar) optimal eingestellt ist.

Will man die potentielle Energie eines Gasspeichers in mechanische Leistung umsetzen, so ist die Leistung dann maximal, wenn das Gas nach der Entspannung durch eine Turbine Umgebungs-

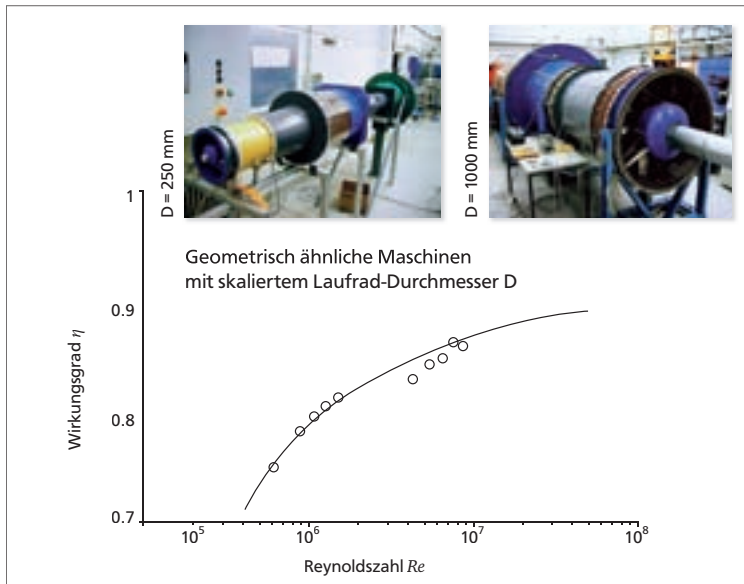


Abbildung 8
Die Skalierungsaufgabe am Beispiel von Axialmaschinen. Je größer die Maschine, je größer die Drehzahl, desto größer der Wirkungsgrad.

druck und Umgebungstemperatur erreicht. Auch dies ist eine Optimierungsaufgabe in dem oben beschriebenen Sinne über welche die Exergie eines Gases definiert ist [7].

Die Skalierungsaufgabe im Kontext der Fertigungskosten

Mit dem Wirkungsgrad aber auch mit der Schnelligkeit (dimensionslose Drehzahl) der Maschine kommt die zweite Aufgabe ins Spiel, die **Skalierungsaufgabe**. Es wurde deutlich, dass die Optimierungsaufgabe immer das System betrifft. Hieraus folgen die Anforderungen an das Modul, d. h. hydraulische Maschine, Absorber, Im Modul können die physikalischen Parameter Durchmesser, Drehzahl, Rauheit, Spalt usw. skaliert werden.

Der Wirkungsgrad ist ein Maß für die dissipativen Reibungsverluste bezogen auf die Gesamtleistung. Generell gilt: Je kleiner der Anteil der dissipativen Reibungskräfte an den gesamten (Strömungs-) Kräften, desto höher ist der Wirkungsgrad. Bei Strömungsvorgängen ist das angesprochene Verhältnis durch den Kehrwert der Reynolds-Zahl beschrieben. Die Reynolds-Zahl ist bei einer rotierenden Maschine proportional dem Quadrat des Durchmessers, proportional der Drehzahl und umgekehrt proportional der kinematischen Viskosität. Daraus folgt zwangsläufig: Mit zunehmendem Maschinendurchmesser und mit zunehmender Drehzahl wächst der Wirkungsgrad asymptotisch bis zu einem Grenzwirkungsgrad.

Von ökonomischer Bedeutung ist hierbei die Frage nach dem Einfluss der Fertigung und Fertigungs-

qualität auf den Wirkungsgrad. Je kleiner der relative Spalt zwischen rotierenden Schaufeln und Gehäuse, desto größer ist der Wirkungsgrad und desto geringer ist in der Regel auch die Schallabstrahlung. Auf der anderen Seite ist ein enger Spalt technische aufwendiger herzustellen als ein weiter Spalt was sich in den Bauteilkosten niederschlägt. Analoges gilt für die relative Rauheit. Hier ist zu beachten: Ist die typische Rauheit kleiner als die sogenannte viskose Unterschicht der turbulenten Strömung, dann verbessert eine weitere Reduktion der Rauheit den Wirkungsgrad durch Fertigungsschritte nicht mehr. Vergleicht man Abbildung 8 mit Abbildung 4 so ist der Unterschied zwischen Skalierung und Optimierung nochmals deutlich. Im letzten Fall muss man optimal auf ein Energieangebot (für ein Fluidkraftsystem) bzw. eine (Volumenstrom-) Forderung für ein Fluidarbeitssystem reagieren.

Skalierung von Antriebssystemen

Im Kontext von Skalieren muss auch über das **Skalieren von Antriebssystemen** gesprochen werden welches aus folgendem Grund zur oben genannten Skalierung unterschiedlich ist: Bei Antriebssystemen (Luft-, Wasser-, Landfahrzeuge) ist zu beachten, dass mit zunehmender Antriebsleistung auch das Gewicht des Antriebes steigt, d.h. trivialerweise muss sich der Antrieb selbst bewegen. System und Modul sind nicht derart trennbar wie bei Fluidarbeits- und Fluidkraftsystemen. Mit welchen Methoden solche Skalierungsprobleme behandelt werden soll wiederum an einem anschaulichen Beispiel, dem Rudern, gezeigt werden [9].



Peter Pelz ist seit 2006 Professor an der TU Darmstadt. Er leitet das Institut für Fluidsystemtechnik im Fachbereich Maschinenbau.



Ulf Lorenz ist seit 2007 an der TU Darmstadt, seit 2008 als Privatdozent. Er leitet eine eigene kleine Arbeitsgruppe innerhalb der Diskreten Optimierung im Fachbereich Mathematik.

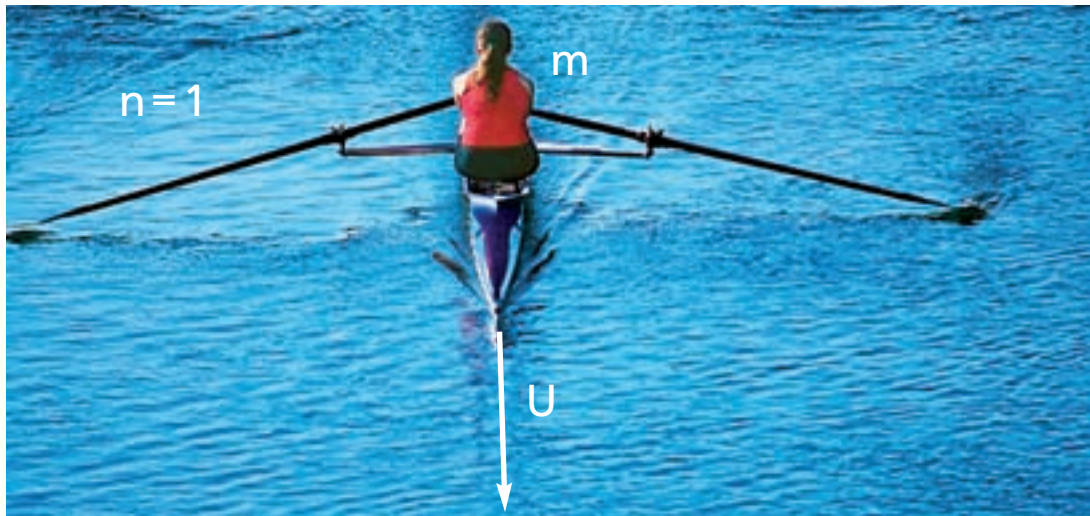


Abbildung 9
Wie hängt die Bootsgeschwindigkeit U von der Zahl der Ruderer n , dem Geschlecht und der Masse des einzelnen Ruderers m ab?

Beim Rudern nimmt die Zahl der (biologischen) Antriebseinheiten die Werte 1 (Einer), 2, 4 oder 8 (Achter) an. Das Einführungsbild, Abbildung 1, zeigt einen Doppelvierer, der von $n = 4$ Ruderern angetrieben wird. Bei rein technischen Systemen ist n z.B. die Zahl der Motoren, Zylinder,

Es stellt sich die Frage um wie viel das Boot mit n Ruderern schneller ist als das Boot mit einem Ruderer oder einer Ruderin.

(Dabei wird der in der Psychologie bekannte Ringelmann-Effekt nicht beachtet.) Eine geometrische Analyse zeigt, dass Ruderboote zueinander geometrisch ähnlich sind. Damit führt eine Dimensionsanalyse zu dem Ergebnis, dass die Bootsgeschwindigkeit wie die Zahl der Ruderer hoch $1/9$ wächst. Man gelangt zu diesem Ergebnis sehr elegant, wenn neben Zeit, Masse und Länge auch die Zahl der Ruderer als physikalische Basisgröße definiert wird.

Literatur

[1] Redtenbacher, F.: Theorie und Bau der Wasserräder, Friedrich Bassermann; Mannheim; 1846

[2] Betz, A.: Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren; Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen; 20. September 1920

[3] Betz, A.: Einführung in die Theorie der Strömungsmaschinen; Braun; Karlsruhe; 1959

[4] Cordier, O.: Ähnlichkeitsbedingungen für Strömungsmaschinen; VDI; Berlin 1955

[5] Giesecke J., et. al.: Wasserkraftanlagen - Grundsätze der Planung und Projektierung; Springer; Berlin; 2009

[6] Pelz, P. F.: On the upper limit for hydropower in an open channel flow; ASCE Journal of Hydraulic Engineering; 2011

[7] Becker, E.: Technische Thermodynamik; Teubner; Stuttgart; 1985

[8] Spurk, J. H.: Dimensionsanalyse in der Strömungslehre; Springer; Berlin; 1992

[9] Mang, J.: Ähnlichkeitstheorie beim Wettkampfrudern; Diplomarbeit am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt; 2008

Im Ergebnis ist ein Achter um 16 % schneller als ein Zweier welcher mit vergleichbaren „Antriebseinheiten“, das sind die Ruderer, bewegt wird.

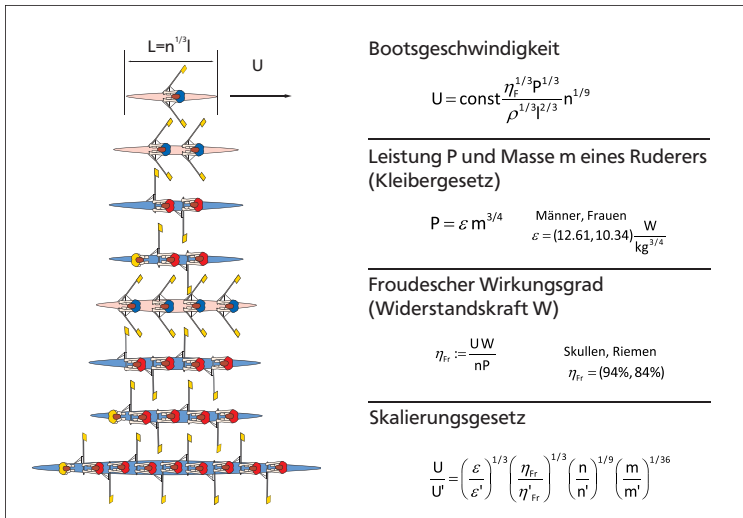
Nun ist der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit als wesentliches Funktionsmerkmal eines Ruderbootes und Masse des Ruderers von Interesse. Spannend ist, dass sich die Leistungsumsetzung von biologischen Systemen mit der (biologischen) Masse hoch $3/4$ skaliert. In der Tat zeigt unsere Forschung, dass das Gesetz durch Leistungssportler sehr gut bestätigt wird und wir so die Proportionalitätskonstante sowohl für Frauen als auch für Männer anhand von geruderten Siegerzeiten bei Olympischen Spielen und Weltmeisterschaften mit kleiner Varianz bestimmen konnten. Im Resultat folgt daraus ein sehr allgemeines Skalierungsgesetz für die Bootsgeschwindigkeit mit dem erstaunlichen Ergebnis, dass ein 95 kg schwerer Ruderer eine Strecke von 2000 m nur 1 % schneller rudert als ein 73 kg schwerer Ruderer. Im Ergebnis macht das einen Zeitunterschied von etwa 4 Sekunden aus. Die von uns angewendeten Methoden, das heißt physikalische Modellbildung, Dimensionsanalyse und Messungen sind für andere Antriebssysteme völlig analog anwendbar.

Die Optimierungsaufgabe in der aktuellen Forschung

Fluidsysteme trifft man als Fluidkraftsysteme bei der Wandlung von hydraulischer bzw. aerodynamischer Leistung in mechanischer Leistung so wie oben beschrieben. Fluidarbeitssysteme sind Lüftungssysteme, Wasserversorgungssysteme und Systeme der Verfahrenstechnik.

Hinsichtlich des Energieverbrauchs sind diese Systeme signifikant: Die genannten Fluidarbeitssysteme verbrauchen ca. 10 % der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung.

Vergleicht man ein Fluidarbeitssystem wie die Wasserversorgung eines großen Gebäudes oder gar



einer Metropole, so ist der Unterschied in der Komplexität offensichtlich. Das oben beschriebene Windrad hat eine einfache Topologie bestehend aus Zuströmung, Windrad, Abströmung. In der Regel ist die Topologie bei Fluidarbeitssystemen deutlich komplexer. Zusätzlich erschwerend ist, dass die Bedarfshistorie (Wasser, Frischluft, ...) mit Unsicherheiten behaftet ist.

Diese Fragestellungen erfordern, wie im durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereich 805 „Unsicherheiten in lasttragenden Systemen“ (Sprecher Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka), praktiziert, eine kooperative Forschung zwischen Mathematik und Ingenieurwissenschaften. Erste Schritte in diese Richtung sind getan.

Zusammenfassung und Ausblick

Für alle Ingenieurbereiche ist der Begriff Energieeffizienz wichtig aber unpräzise. Versteht man den Weg zur Energieeffizienz als ein zweistufiges Verfahren, nämlich in erster Linie eine Optimierung des Systems und in zweiter Linie eine Skalierung (des Wirkungsgrades), so kann eine Diskussion sachlich geführt werden.

Ein altes und schönes Beispiel, ein Wasserrad, welches jedem vertraut ist, zeigt, dass Präzisierung hilfreich und notwendig sind.

Bei fluidtechnischen Systemen besteht die Herausforderung heute unseres Erachtens weniger in der Verbesserung des Wirkungsgrades einzelner Module eines Systems, als vielmehr darin, das Gesamtsystem zu optimieren (**Optimierungsaufgabe**). Erst hieraus lassen sich wieder umgekehrt die technischen Anforderungen an das Modul ableiten. Die physikalisch technische **Skalierungsaufgabe** im Sinne der Dimensionsanalyse [8] hat hier insbesondere eine ökonomische Relevanz, denn häufig sind leistungsspezifische Kosten für den Markt dominante Entscheidungskriterien.

Abbildung 10
Die Skalierung eines Antriebssystems am Beispiel von Ruderbooten. Froudescher Wirkungsgrad η_{fr} und Kleiberkonstante ϵ sind über die Siegerzeiten auf 2000 m bei Weltmeisterschaften und Olympischen Spielen bestimmt [9].

University Relations



Unser kostenloses Angebot für die TU Darmstadt:

Durchführung von praxisnahen Lehrprojekten im all-inclusive-Paket. Wir unterstützen Sie umfassend - vor, während und nach der Projektdurchführung.

- Kostenlose Softwarelizenzen.
- Innovationsförderung und Forschungsk Kooperation im Rahmen von strategischen Partnerschaften.
- Gastvorträge und Firmenbesuche.
- Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten.
- Praktika und Werkstudentenstellen in unserem Head-quarters.

Wir freuen uns auf Sie.
www.softwareag.com/jobs
www.softwareag.com/university

Software AG ist weltweit führend im Bereich Business Process Excellence. Seit über 40 Jahren steht unser Name für Innovation: Adabas, die erste transaktionale Hochleistungsdatenbank, ARIS, die erste Plattform zur Analyse von Geschäftsprozessen, und webMethods, der erste B2B-Server und die erste SOA-basierte Integrationsplattform.

Wir liefern unseren Kunden Produkte, Lösungen und Services für das Management von Geschäftsprozessen (BPM), die sich durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit bei niedriger Total-Cost-of-Ownership auszeichnen und die vollständige Lieferkette abdecken. Unsere branchenführenden Marken ARIS, webMethods, Adabas, Natural, CentraSite und IDS Scheer Consulting fügen sich zu einem einzigartigen Portfolio zusammen. Wir bieten Software und Services für den Entwurf von Prozess-Strategien sowie das Design, die Implementierung und die Überwachung von Prozessen; SOA-basierte Integration und Datenmanagement; prozessgesteuerte SAP-Implementierung sowie strategische Prozessberatung und Dienstleistungen.

Software AG | Uhlandstraße 12 | 64297 Darmstadt
www.softwareag.com