

## Optimale Körperformen mit minimalem Strömungswiderstand

**Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Bühler**  
Fakultät Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik (M+V)

Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel.: 0781 205-268  
E-Mail: k.buehler@fh-offenburg.de

**1948:** Geboren in Achern  
Lehre als Mechaniker  
**1971:** Ing. (grad.) Ingenieurschule Offenburg  
**1975:** Diplom Maschinenbau Universität Karlsruhe  
**1979:** Promotion über Thermokonvektion  
**1985:** Habilitation über Rotierende Strömungen,  
Privatdozent Universität Karlsruhe  
**1986:** Professor Universität Karlsruhe  
**Seit 1991:** Professor an der Hochschule Offenburg  
**Seit 1994:** Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF)  
der Hochschule Offenburg  
**1999, 2009:** Forschungsaufenthalt an der University of Colorado  
at Boulder, USA

Zahlreiche Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Thermo- und Fluidodynamik, darunter Strömungsmechanik (Springer 1991), Grundzüge der Strömungslehre (Teubner 2008), Hütte-Grundlagen der Ingenieurwissenschaften (Kap. Strömungsmechanik)

**Forschungsgebiete:** Strukturbildung in der Thermo- und Fluidodynamik, Anwendungen der Computeralgebra, Numerische Strömungssimulation CFD



**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel**  
Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik (M+V)  
Prodekan und Studiendekan  
Maschinenbau (Bachelor)

Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel.: 0781 205-167  
E-Mail: gerhard.kachel@fh-offenburg.de

**1962:** Geboren in Heilbronn/Neckar, Studium Allgemeiner Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Schwerpunkte: Technische Mechanik/Dynamik, Strömungslehre/Gasdynamik  
**1988:** Diplom Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Mitarbeiter der Daimler-Benz-AG, Stuttgart  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)  
**1997:** Promotion zum Thema „Rechnerische Auslegung, Analyse und Optimierung einer mechanischen variablen Ventilsteuerung“, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Robert Bosch GmbH, Bereich „Fahr-dynamische Regelsysteme“, Aufgaben: Sicherheitsarchitektur, Funktions- und Software-Entwicklung, zuletzt funktionale Verantwortung für fahrdynamische Regelsysteme als System-Projektleiter für einen Großkunden.

**Seit 2005:** Professor an der Hochschule Offenburg in der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

**Seit 2009:** Prodekan der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik und Studiendekan des Bachelor-Studiengangs Maschinenbau

**Lehrgebiete:** Technische Mechanik, Finite Elemente Methode, Maschinenelemente

**Forschungsgebiete:** Numerische Strukturanalyse und -optimierung, Numerische Strömungsoptimierung



### 3.6 Optimale Körperformen mit minimalem Strömungswiderstand

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Bühler  
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kachel  
M.Sc. Coskun Karatas

#### Abstract

Im Rahmen energieeffizienter Umströmungsprozesse sind Verfahren zur Entwicklung optimaler Körperformen notwendig. In einem Verbundforschungs-vorhaben wird mit unterschiedlichen Methoden an diesem Ziel gearbeitet.

#### Einleitung

Umströmungen von Körpern treten in Natur und Technik in vielfältigen Formen auf. Bei Tragflügeln ist der Auftrieb ein wesentliches Kriterium zur Funktion des Flugzeugs. Im Blick auf die Energieeffizienz kommt dem Widerstand immer größere Bedeutung zu. Im Rahmen eines Verbundprojekts „EUdaF-Energieeffiziente Umströmungsprozesse durch automatisierte Formoptimierung“ [1] wird nach Methoden geforscht, wie man die optimale Körperform für die Umströmung mit dem geringsten Widerstand finden kann.

Der Widerstand eines umströmten Körpers setzt sich aus zwei Anteilen, dem Reibungs- und dem Druckwiderstand zusammen. Ein entscheidender Parameter zur Charakterisierung des Stromfelds ist die Reynoldszahl

$$Re = \frac{w_{\infty} \cdot L}{\nu}$$

die als Verhältnis von Trägheitskraft und Reibungskraft gedeutet werden kann. Charakteristische Größen sind mit  $w_{\infty}$  die Anströmgeschwindigkeit, mit  $L$  eine bestimmte Länge und mit  $\nu$  die kinematische Viskosität des strömenden Fluids. Man unterscheidet folgende Bereiche:

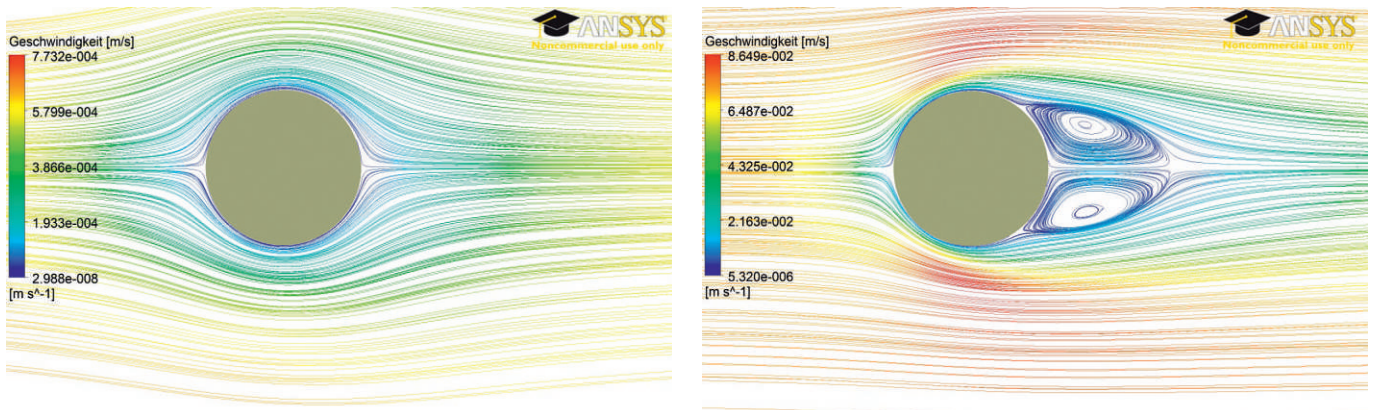


Abb. 3.6-1: Umströmung der Kugel bei verschiedenen Reynoldszahlen. a)  $Re=1$  links und b)  $Re=100$  rechts

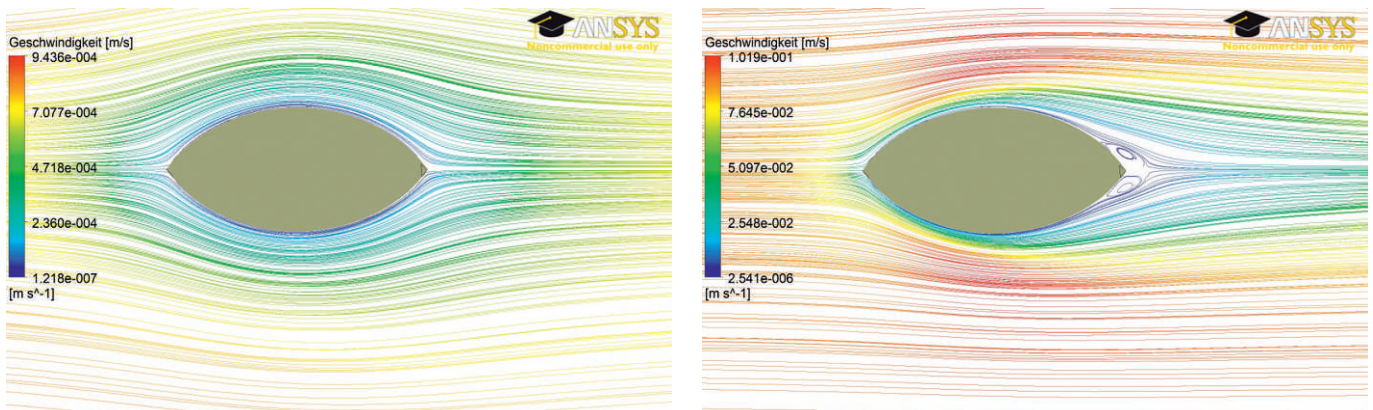


Abb. 3.6-2: Umströmung des Optimalkörpers bei verschiedenen Reynoldszahlen. a)  $Re=1$  links und b)  $Re=100$  rechts

$0 < Re < 1$  schleichende Strömung,  
 $1 < Re < Re_{krit}$  laminare Strömung und  
 $Re_{krit} < Re$  turbulente Strömung.

Die kritische Reynoldszahl hängt von der Definition der charakteristischen Größen  $w_\infty$  und  $L$  ab und liegt bei Umströmungsproblemen bei  $Re_{krit} \approx 10^5$ .

Bei diesen hohen Reynoldszahlen ist der Einfluss der Reibung auf eine dünne, wandnahe Schicht, die sogenannte Grenzschicht, begrenzt. Dieses von L. Prandtl im Jahr 1904 eingeführte Grenzschichtkonzept hat zu einer stürmischen Entwicklung der Strömungsmechanik geführt [2].

Es lässt sich damit nicht nur der Reibungswiderstand berechnen, sondern auch die Ursache für die Ablösung erklären, die bei der Widerstandsoptimierung vermieden werden muss.

### Umströmung von Kugel und Optimalkörper

Die Umströmung der Kugel ist über einen weiten Reynoldszahlenbereich experimentell untersucht worden [3,4].

Für den Grenzfall  $Re_D = w_\infty D / \nu \rightarrow 0$  lässt sich der Widerstand berechnen zu

$$F_w = 3\pi\eta D w_\infty = \frac{\rho}{2} w_\infty^2 \frac{\pi D^2}{4} c_w$$

$$\text{mit } c_w = \frac{24}{Re_D},$$

wobei  $\rho$  die Dichte und  $\eta = \rho\nu$  die dynamische Viskosität des Fluids charakterisiert. Diese Beziehung ist als Stokes'sche Widerstandsformel bekannt.

Mit dem CFD-Programm ANSYS-CFX wurden unterschiedliche Strömungszustände numerisch simuliert [5].

Die Abbildung 3.6-1 zeigt a) links die Kugelumströmung bei der Reynoldszahl  $Re=1$ . Die Visualisierung des nahezu symmetrischen Stromfelds ist durch die Stromlinien mit konstanter Stromfunktion gut zu sehen. Die Farbe charakterisiert die Geschwindigkeit, wobei blau kleinen und rot großen Werten entspricht. Im Teil b) rechts ist die Umströmung bei einer Reynoldszahl  $Re=100$  zu sehen. Die Anströmung erfolgt von links. Im rückwärtigen Bereich hat sich

ein Rückströmungsgebiet ausgebildet. Im Ablösepunkt verlässt die Wandstromlinie die Oberfläche und umschließt das Rückströmungsgebiet, das bis zum stromab liegenden Staupunkt reicht.

In der Abbildung 3.6-2 sind die Stromlinienbilder eines Optimalkörpers dargestellt. Diese Körperform hat im Grenzfall  $Re \rightarrow 0$  den kleinsten und damit optimalen Widerstand. Das Stromlinienbild im linken Teil a) der Abbildung 3.6-2 ist ebenso gleichförmig wie bei der Kugel. Bei der Reynoldszahl  $Re=100$  im Teil b) rechts hat sich auch bei dieser Körperform ein Rückströmungsgebiet im rückwärtigen Teil des Körpers ausgebildet. Dies zeigt, dass diese Körperform für sehr kleine Reynoldszahlen optimal ist, mit steigender Reynoldszahl aber diese Eigenschaft verliert. Hier setzt das Forschungsprogramm an, um geeignete Methoden zu finden, die für die jeweilige Reynoldszahl zur optimalen Körperform mit dem geringsten Widerstand führen.

### Optimale Körperform durch parameterfreie Optimierung

Der Schwerpunkt der Hochschule Offenburg in EUdaF liegt bei der automatisierten parameterfreien Formoptimierung auf Basis sog. Optimalitätskriterien, während man an der Hochschule in Karlsruhe dieselbe Aufgabenstellung mit Hilfe diffuser Grenzflächenmodelle angeht. Parameterfrei bedeutet hier, dass die Geometrie im Rahmen der gewählten Vernetzungsdichte des Simulationsmodells frei verändert werden kann. Diese Anpassung erfolgt durch einen Regelalgorithmus auf Basis überwiegend heuristischer Optimalitätskriterien. Als einfaches Beispiel aus der Strukturmechanik, wo sich solche Verfahren bereits etabliert haben, sei das Kriterium der Spannungshomogenisierung an der Bauteiloberfläche genannt, das zu maximaler Steifigkeit und Tragfähigkeit des Bauteils bei minimalem Gewicht führt. Im Bereich der Strömungsmechanik, wo man sich noch am Anfang der Entwicklung befindet, wurde als erstes Optimalitätskriterium die Vermeidung von Rückströmung eingeführt [6, 7] und vom Projektpartner FE-Design GmbH in der Software TOSCA-Fluid implementiert.

Die beiden zentralen Forschungsziele von EUdaF sind verkürzt dargestellt eine Erweiterung der Optimalitätskriterien auf Basis strömungsmechanischer Überlegungen und der Korrelation lokaler Strömungsgrößen mit den globalen Optimierungszielen sowie die Berücksichtigung von Turbulenz im Optimierungsgebiet. Hierzu werden zunächst geeignete Referenz-Aufgabenstellungen (vgl. Abschnitt 2) untersucht, die einen guten Einblick in die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge sowie im weiteren Verlauf eine einfache Beurteilung der Konvergenz und der Stabilität der erzielten Optimierungsergebnisse erlauben. In einer späteren Projektphase ist die Verifizierung der erarbeiteten Methoden anhand von praktischen Anwendungsbeispielen der Industriepartner unter Einbeziehung von Fertigungsrestriktionen etc. geplant.

Aus den in Abschnitt 2 gezeigten Simulationsergebnissen können bereits interessante Schlüsse gezogen werden. So ist beispielsweise allein auf Basis der Vermeidung von Rückströmung zu erwarten, dass sich der Optimalkörper für schleichende Strömung bei höherer Re-

Zahl stromabwärts verlängert. Ebenso ist aber bekannt, dass sich die Form der der Anströmung zugewandten „Nase“ des Körpers in Richtung einer Tropfenform verändert. Hierfür ist aber das lokale Rückströmungskriterium offenbar nicht ausreichend, da an der Nase unabhängig von der Re-Zahl keine Rückströmung auftritt.

Diese und andere Beobachtungen bilden den Ausgangspunkt für eine systematische Untersuchung der Korrelationen und die Formulierung und Erweiterung neuer Optimalitätskriterien für die parameterfreie Strömungsoptimierung.

### Referenzen/References

- [1] EUdaF – Energieeffiziente Umströmungsprozesse durch automatisierte Formoptimierung. Verbundforschungsvorhaben der Hochschulen Offenburg und Karlsruhe, 2009
- [2] Gersten K.: Die Bedeutung der Prandtl'schen Grenzschichttheorie nach 85 Jahren. Z. Flugwiss. Weltraumforschung 13 (1989) 209 – 218
- [3] Zierep J., Bühler K.: Strömungsmechanik. Berlin/Heidelberg/New York – Springer 1991
- [4] Zierep J., Bühler K.: Grundzüge der Strömungslehre. 7. Aufl. Wiesbaden-Teubner 2008
- [5] Karatas, C.: Numerische Simulation der Umströmung von Körpern unterschiedlicher Geometrie. Master-Thesis, Hochschule Offenburg, 2009
- [6] Klimetzek, F. R.; Paterson, J.; Moos, O.: AutoDuct: Topology Optimization for Fluid Flow, 1. Konferenz für angewandte Optimierung in der virtuellen Produktentwicklung, 21./22. März 2006, Karlsruhe
- [7] Häußler, P.; Bangert, C.; Allinger, P.: Innovative Produktentwicklung durch Struktur- und Strömungsoptimierung, SimPEP Kongress 14./15. Juni 2007 in Würzburg, FVA 2007