

VORLESUNGEN

Strömungslehre

5

Angewandte
Strömungsmechanik

Math. Methoden
der Strömungslehre

6

Numerische
Strömungsmechanik

7

Trainings-Kurs

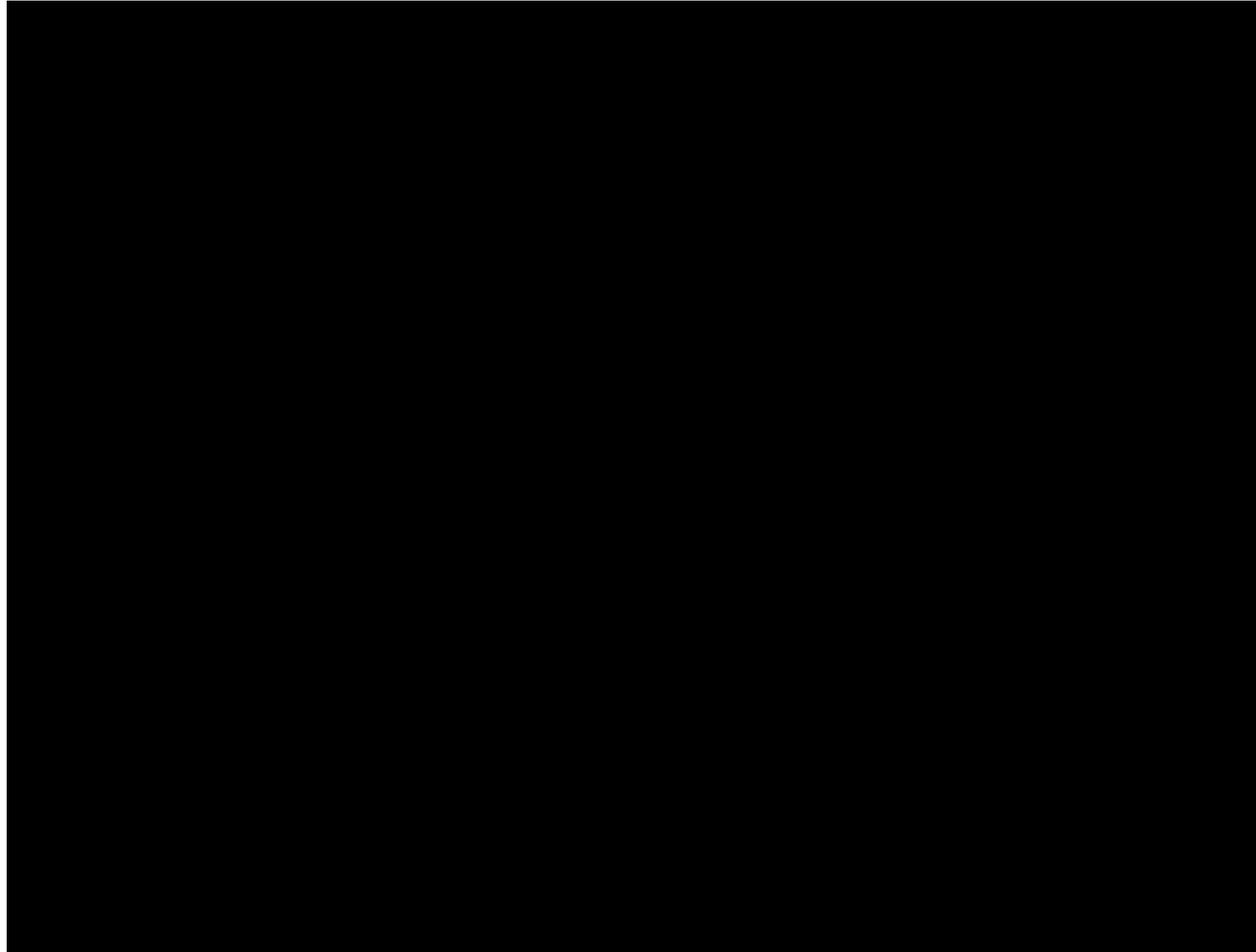
8

Diplomarbeit

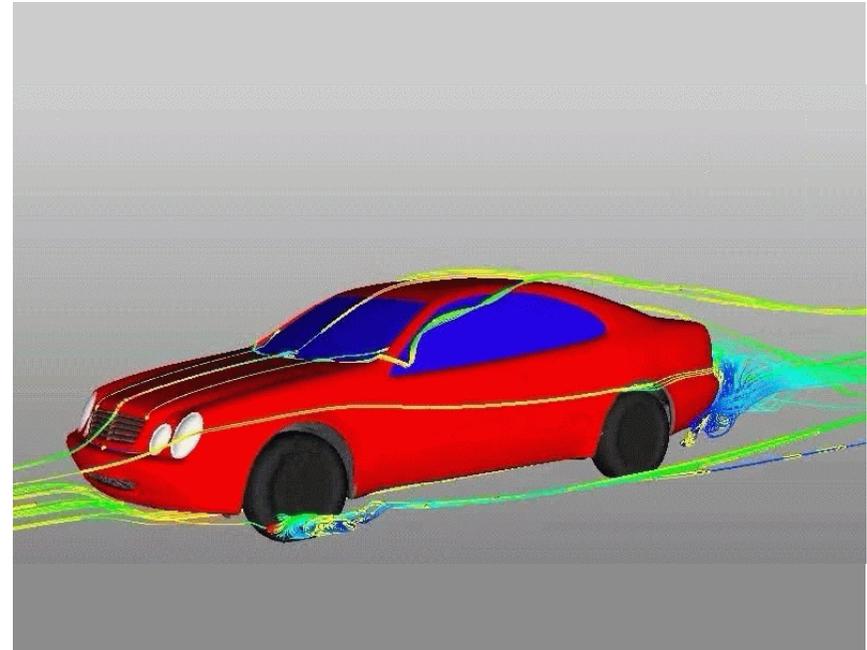
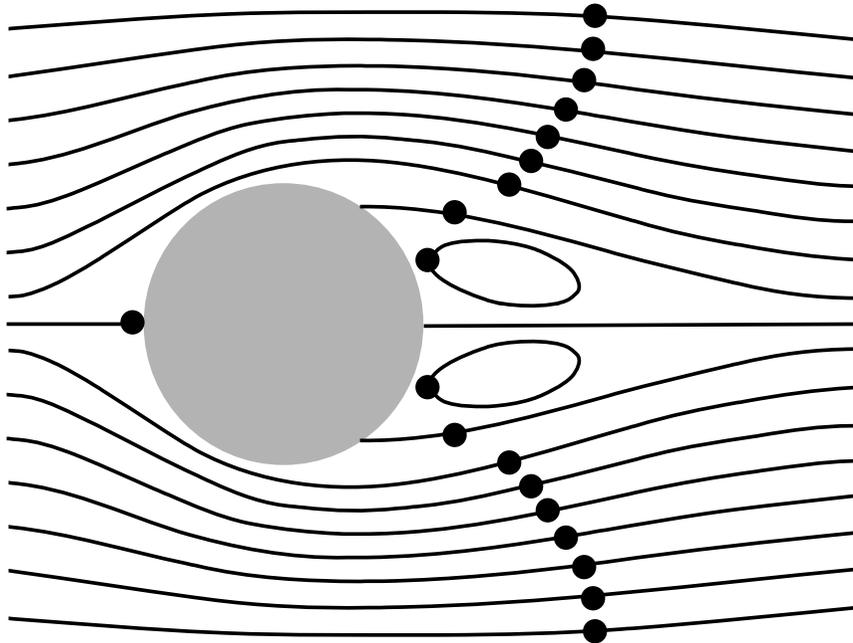
Strömungsmechanik Kolleg



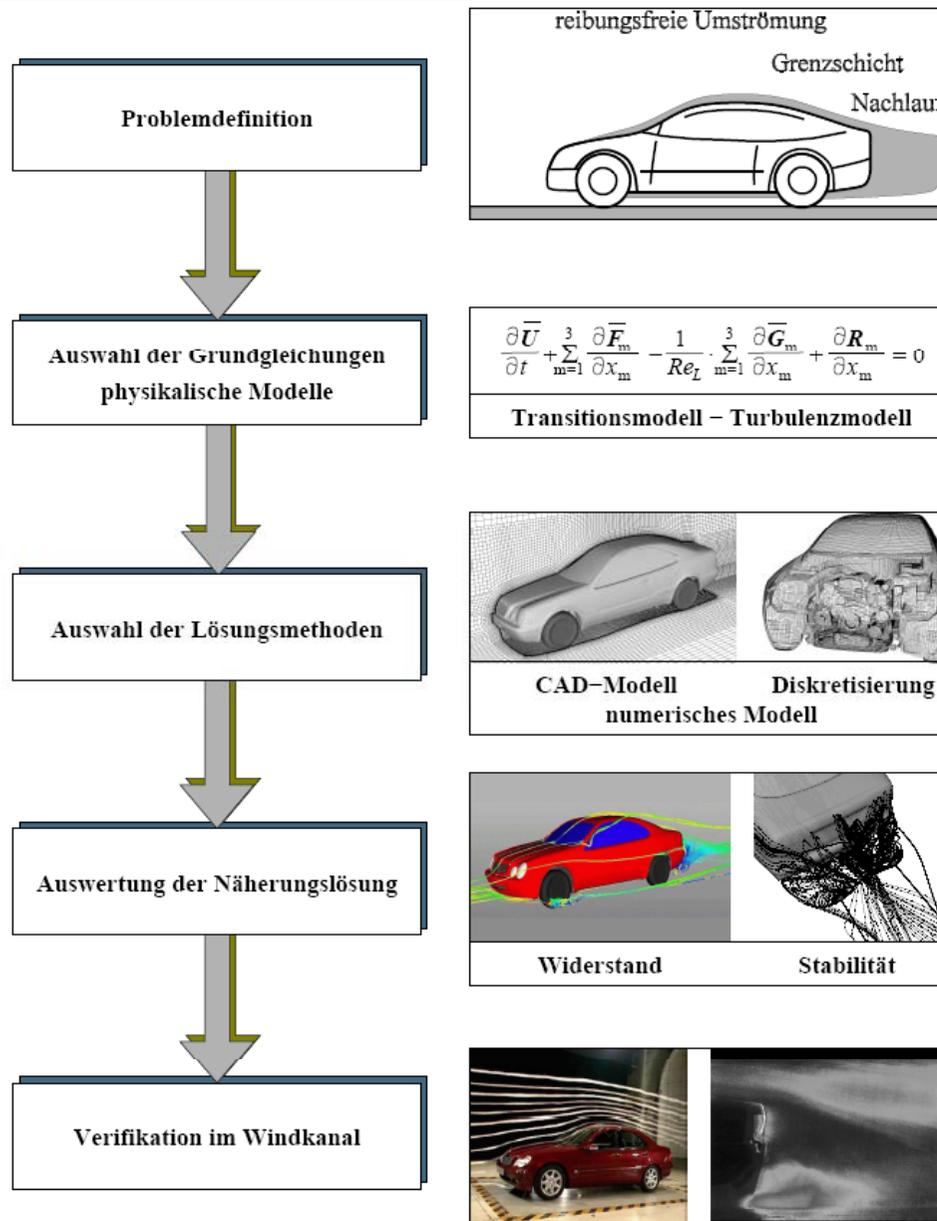
Mathematische Methoden der Strömungslehre



Analytische und numerische Lösungsmethoden



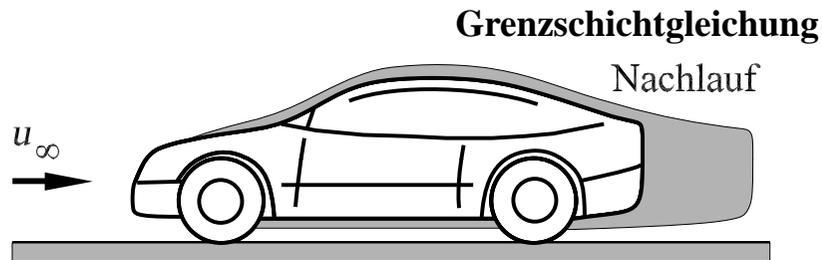
Produktentwicklung Kfz



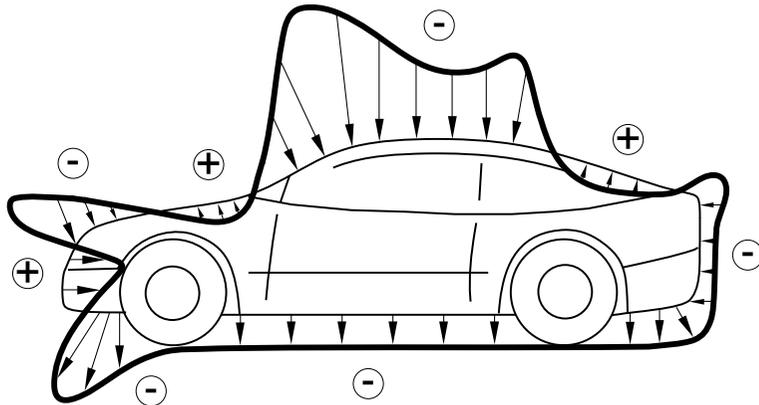
Strömungsbereiche und Grundgleichungen des Kraftfahrzeuges

Potentialgleichung

reibungsfreie Umströmung



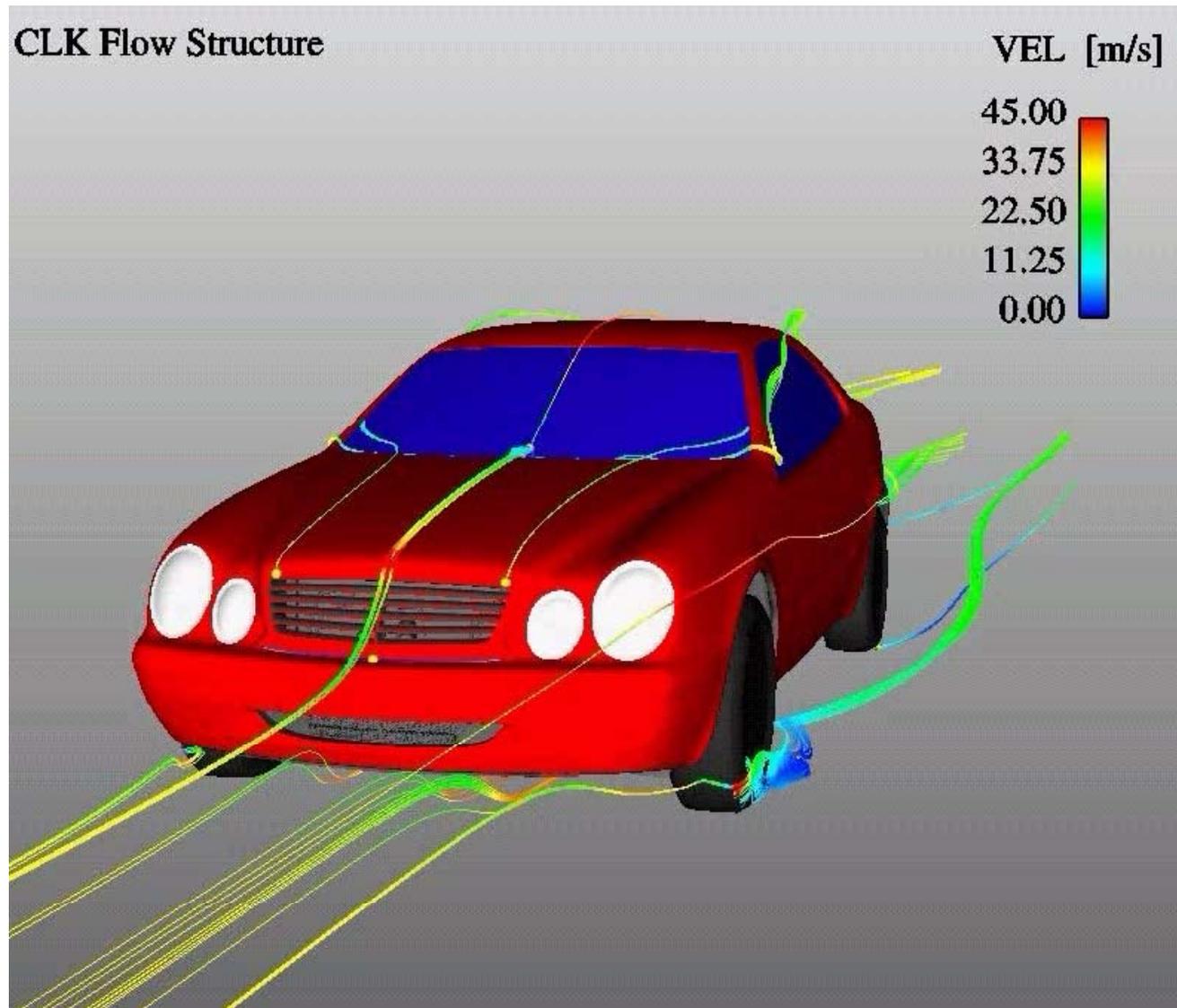
Reynolds-Gleichungen



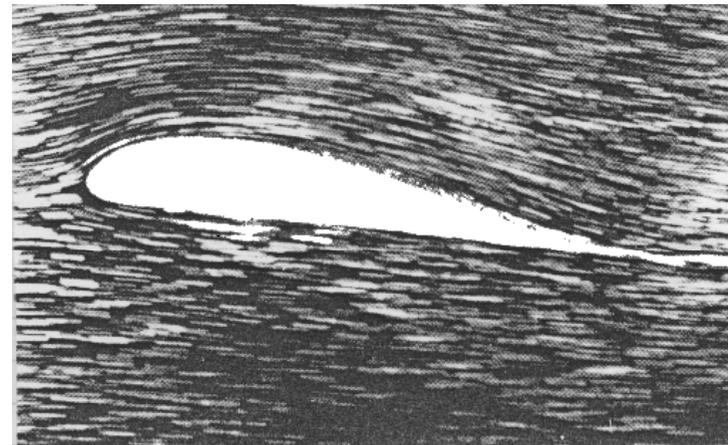
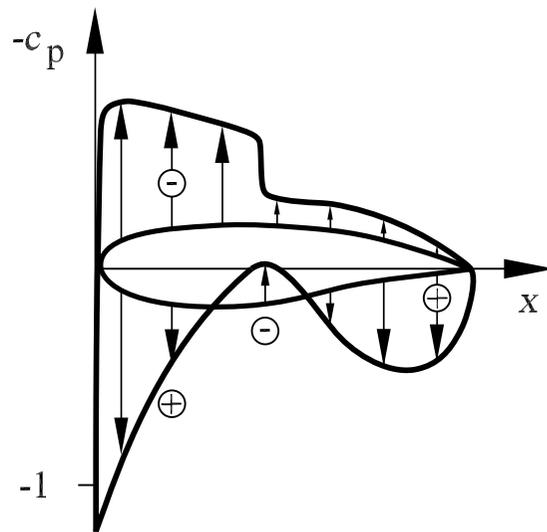
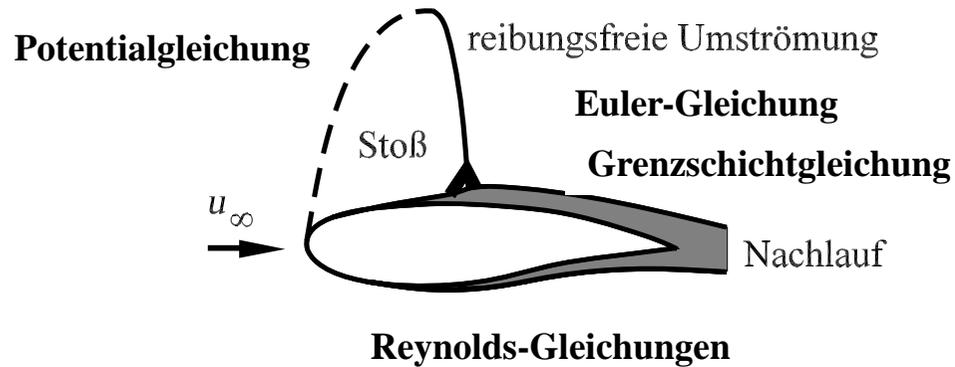
Strömungssichtbarmachung im
Nachlauf



Kfz Umströmung



Strömungsbereiche des Tragflügels eines Verkehrsflugzeuges

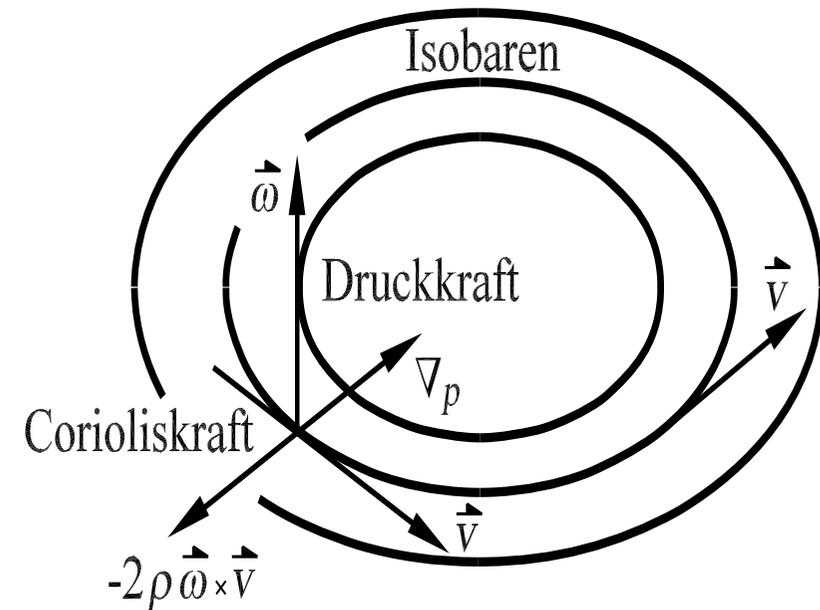
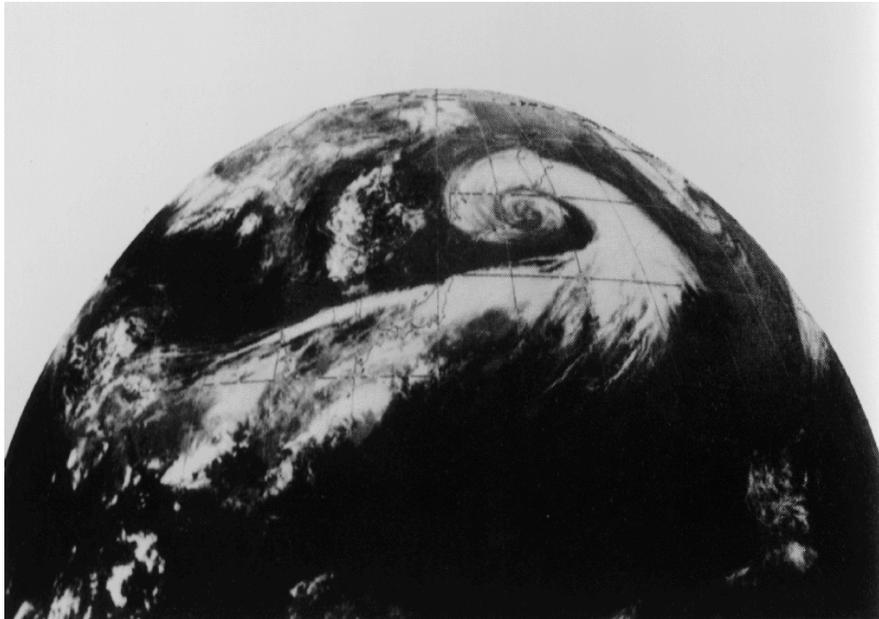


Strömungssichtbarmachung



Strömungsbereiche und Grundgleichungen der Meteorologie

Reynolds – Gleichungen in Bodennähe Grenzschichtgleichung



Strömungen in der Atmosphäre



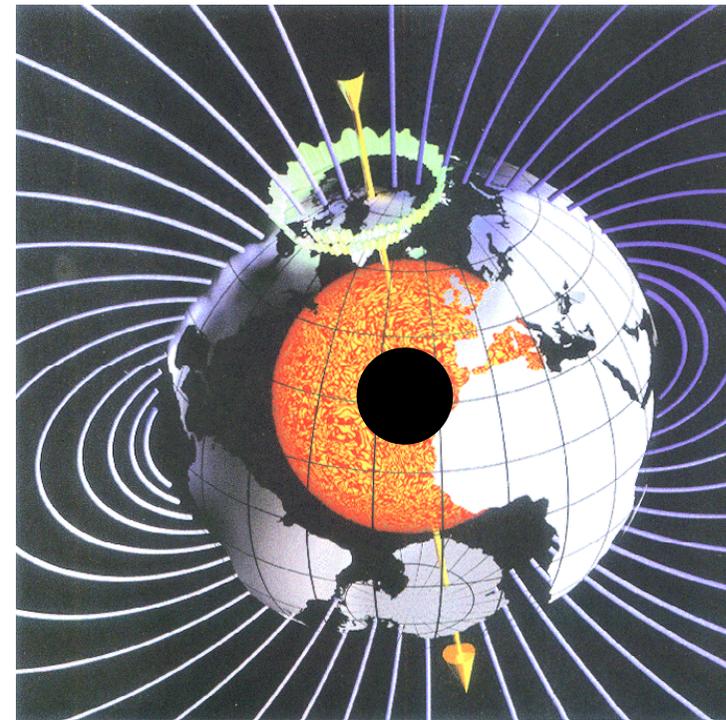
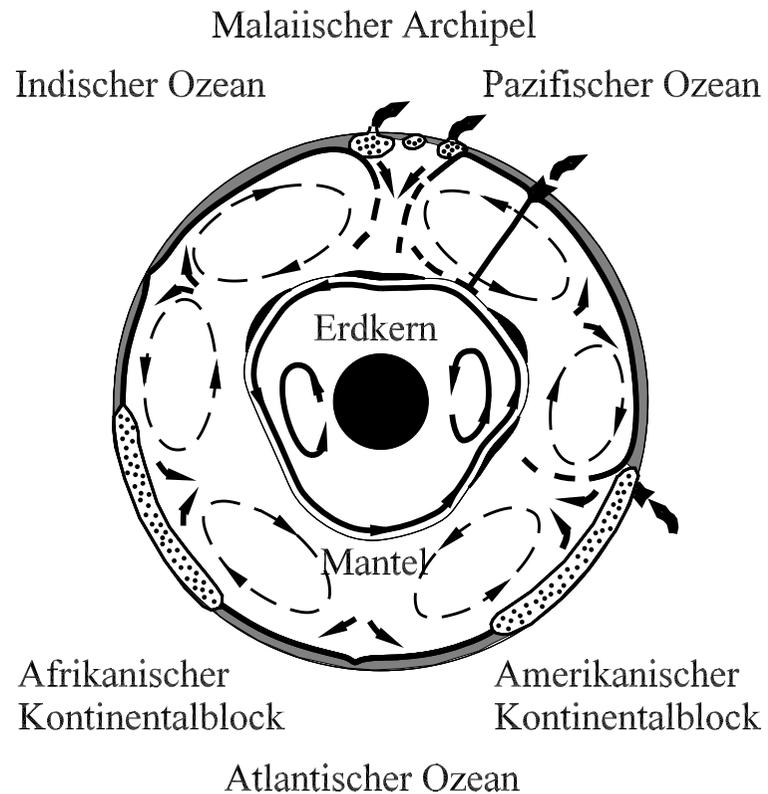
**Strömungen
in der Atmosphäre**



Strömungsbereiche und Grundgleichungen der Geophysik

Erdmantel
Navier-Stokes-Gleichung
in porösen Medien

Im Erdinneren
Reynolds-Gleichungen
Maxwell-Gleichungen



Erdmagnetfeld



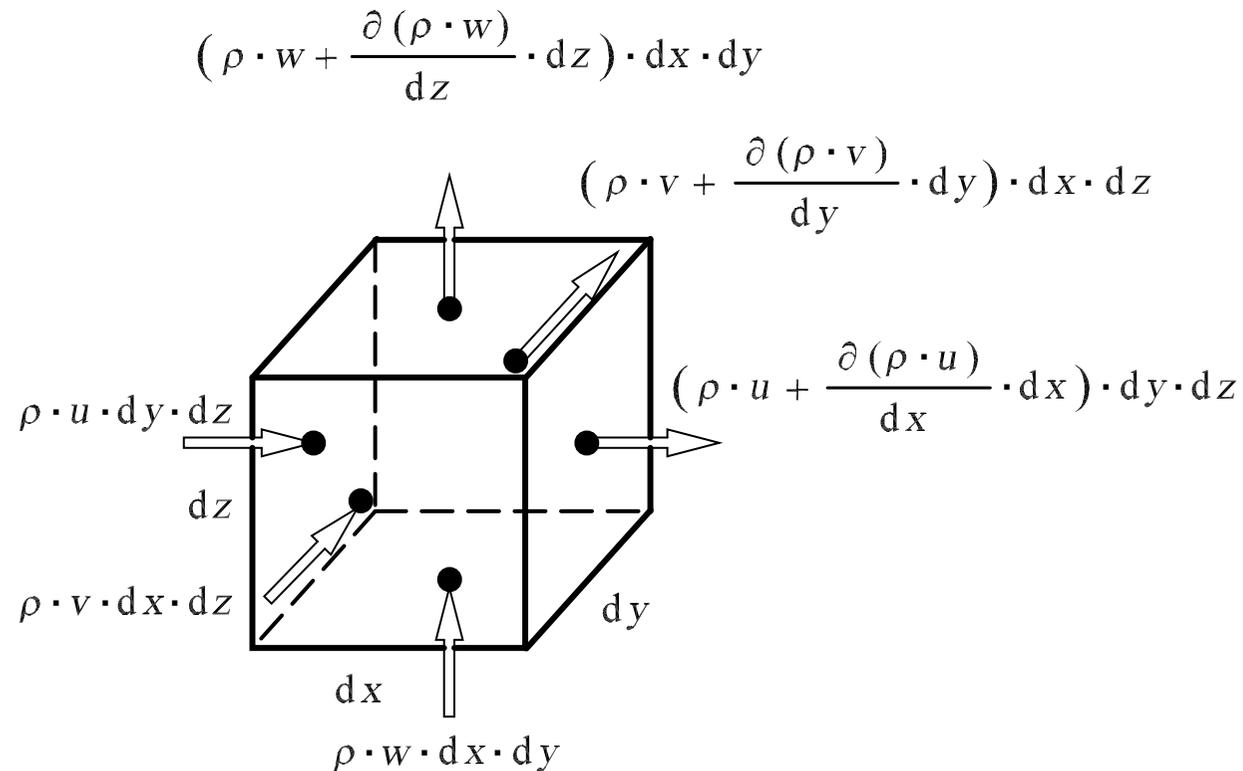


**Strömungen
im Erdinnern**



Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse)

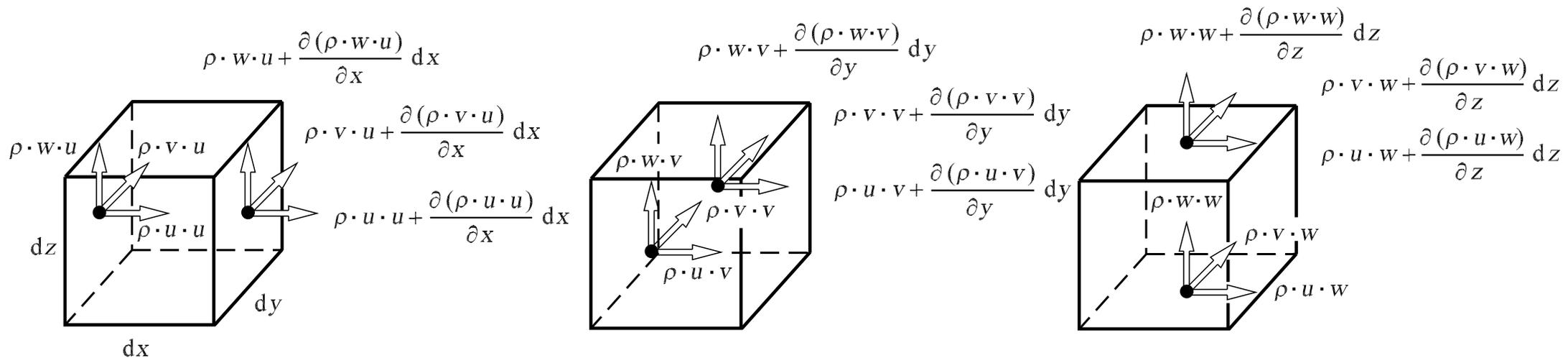
Die zeitliche Änderung der Masse im Volumenelement =
 \sum der einströmenden Massenströme in das Volumenelement –
 \sum der ausströmenden Massenströme aus dem Volumenelement



Navier-Stokes Gleichungen (Erhaltung des Impulses)

Ein- und Austretende Impulsströme

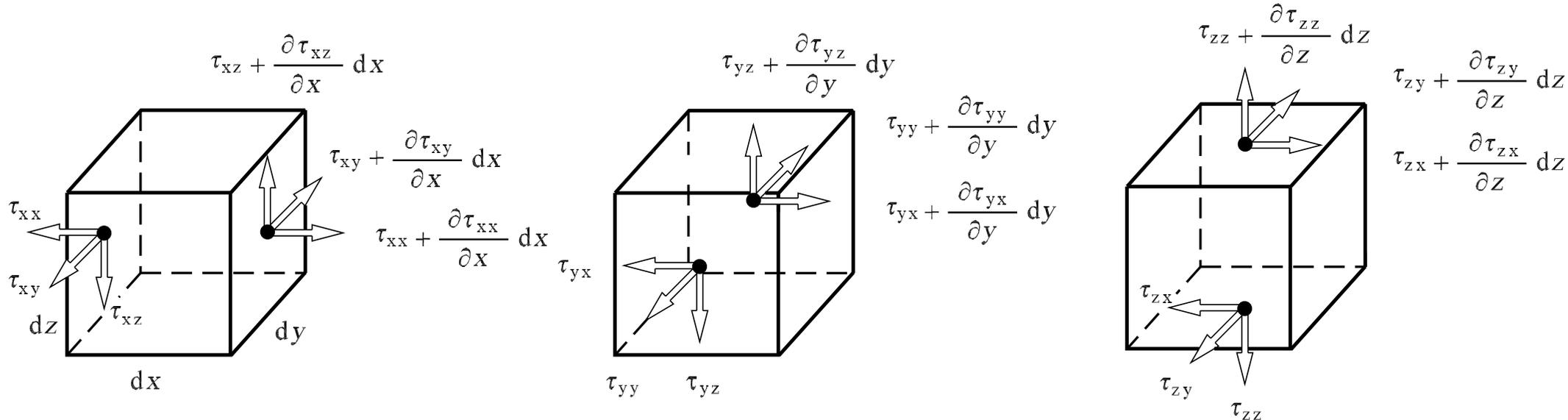
Die zeitliche Änderung des Impulses im Volumenelement =
 \sum der eintretenden Impulsströme in das Volumenelement –
 \sum der ausströmenden Impulsströme aus dem Volumenelement +
 \sum der auf das Volumenelement wirkenden Scherkräfte, Normalspannungen +
 \sum der auf die Masse des Volumenelements wirkenden Kräfte.



Navier-Stokes Gleichungen (Erhaltung des Impulses)

Normal und Schubspannungen

Die zeitliche Änderung des Impulses im Volumenelement =
 \sum der eintretenden Impulsströme in das Volumenelement –
 \sum der ausströmenden Impulsströme aus dem Volumenelement +
 \sum der auf das Volumenelement wirkenden Scherkräfte, Normalspannungen +
 \sum der auf die Masse des Volumenelements wirkenden Kräfte.



Navier-Stokes Gleichungen (Erhaltung des Impulses)

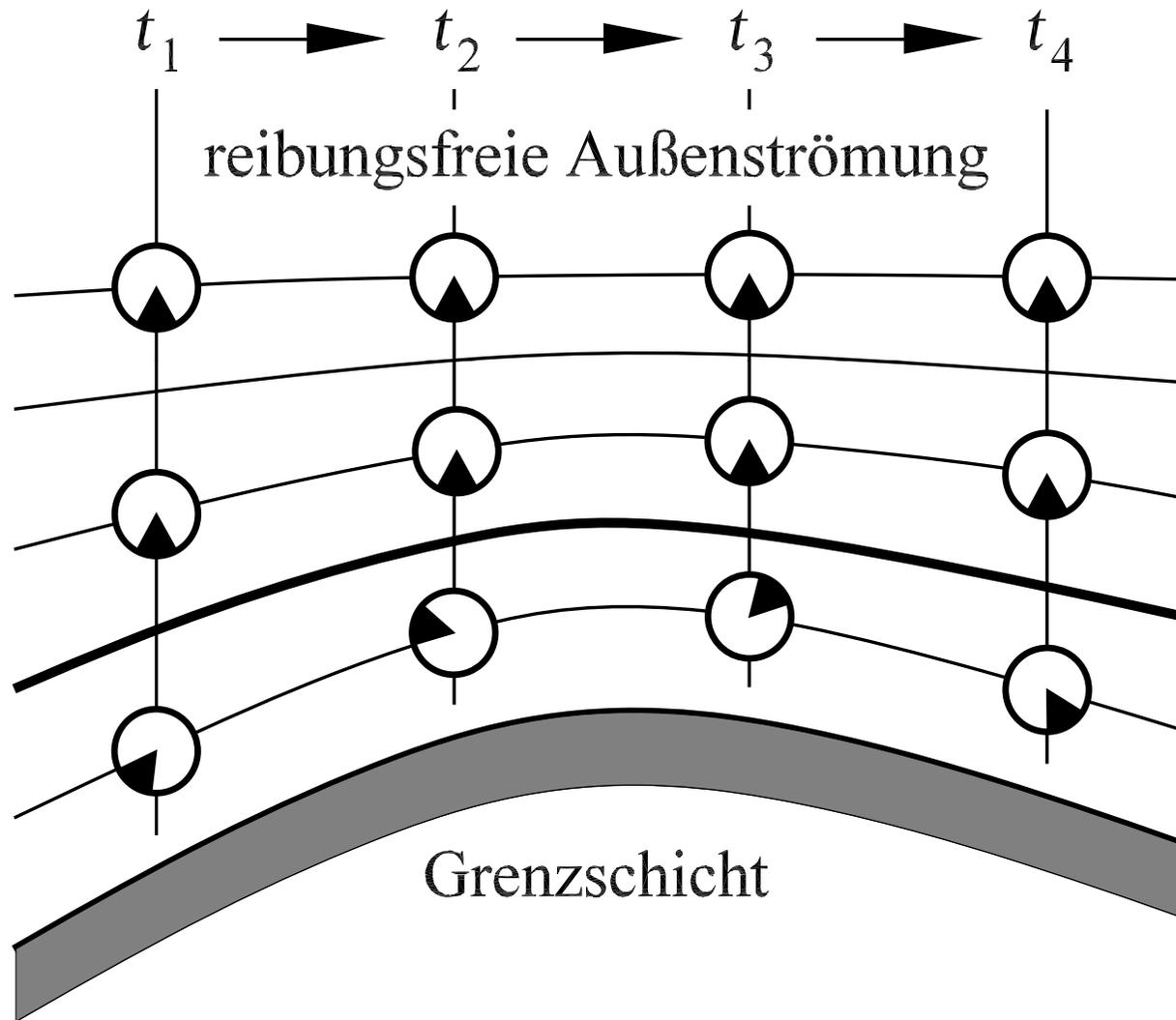
Vereinfachungen für inkompressible Strömungen

	$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + \frac{1}{Re_L} \Delta \vec{v}$			
Strömung	lokale Beschleunigung	konvektive Beschleunigung	Druck	Reibung
Rohrströmung			✓	✓
Plattengrenzschicht		✓		✓
Zylinderumströmung		✓	✓	✓
Kármánsche Wirbelstraße	✓	✓	✓	✓
Profilumströmung	✓	✓	✓	✓



Navier-Stokes Gleichungen (Erhaltung des Impulses)

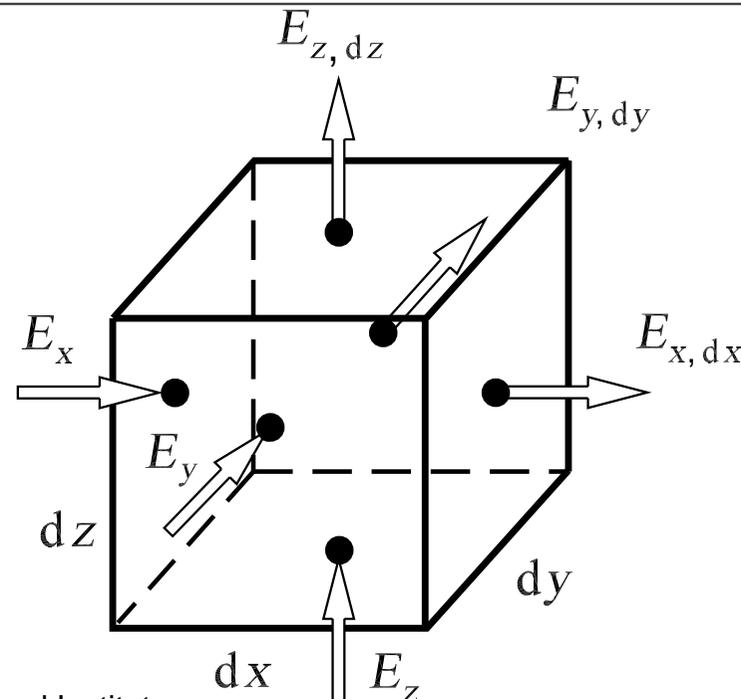
Drehung einer Strömung in einer Grenzschicht



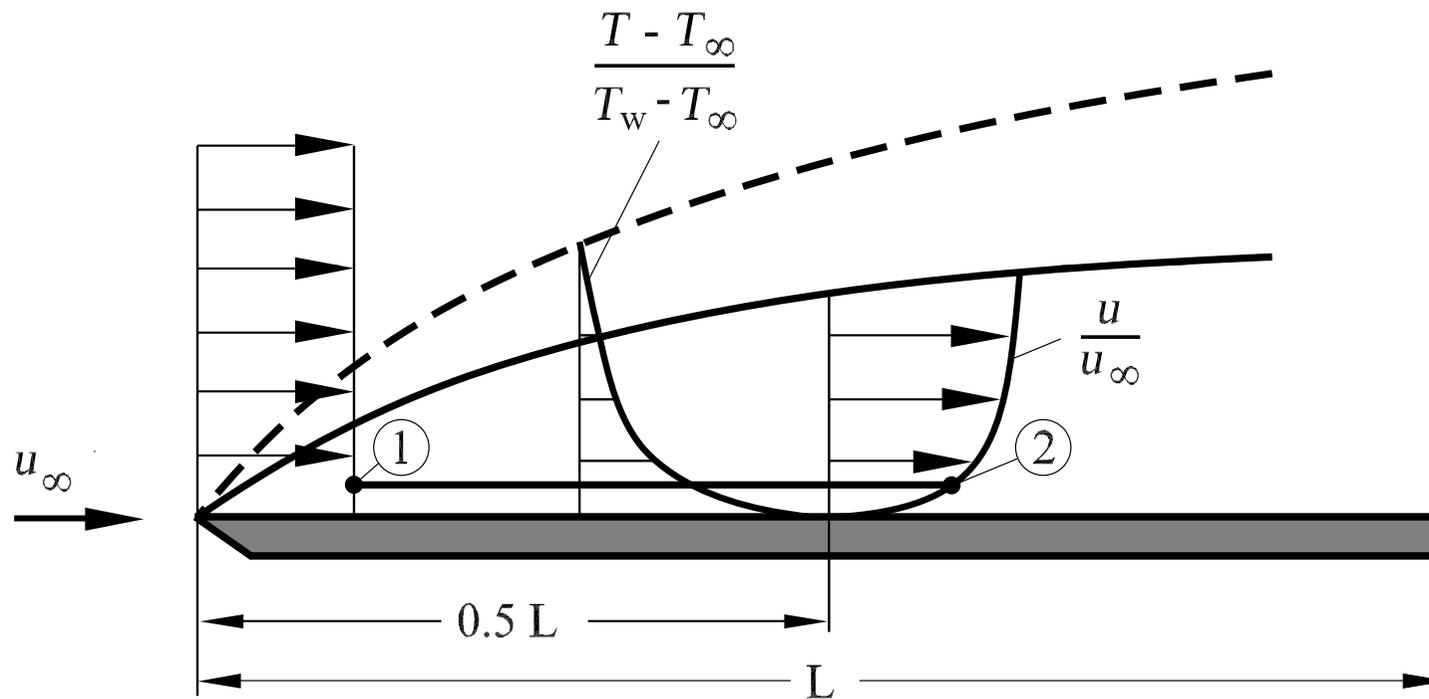
Energiegleichungen (Erhaltung der Energie)

Die zeitliche Änderung der inneren und kinetischen Energie im Volumenelement =

\sum der durch die Strömung ein- und ausfließenden Energieströme +
 \sum der durch Wärmeleitung ein- und ausfließenden Energieströme +
 \sum der durch die Druck-, Normalspannungs- und Schubspannungskräfte am Volumenelement geleisteten Arbeiten pro Zeit +
der Energiezufuhr von außen +
Arbeit pro Zeit, die durch das Wirken der Volumenkräfte verursacht wird.



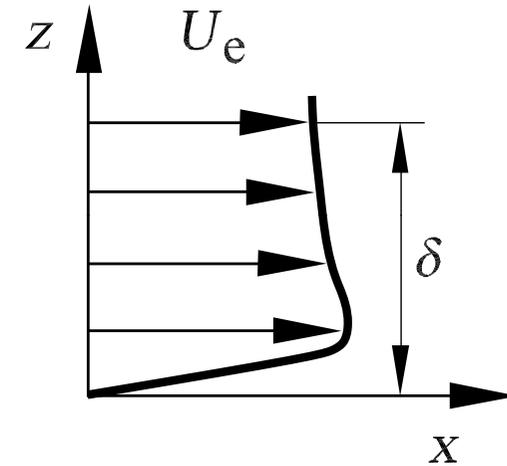
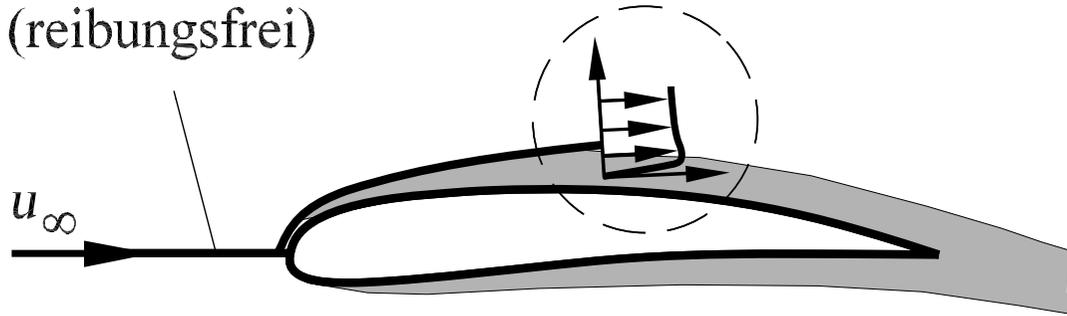
Plattengrenzschichtströmung



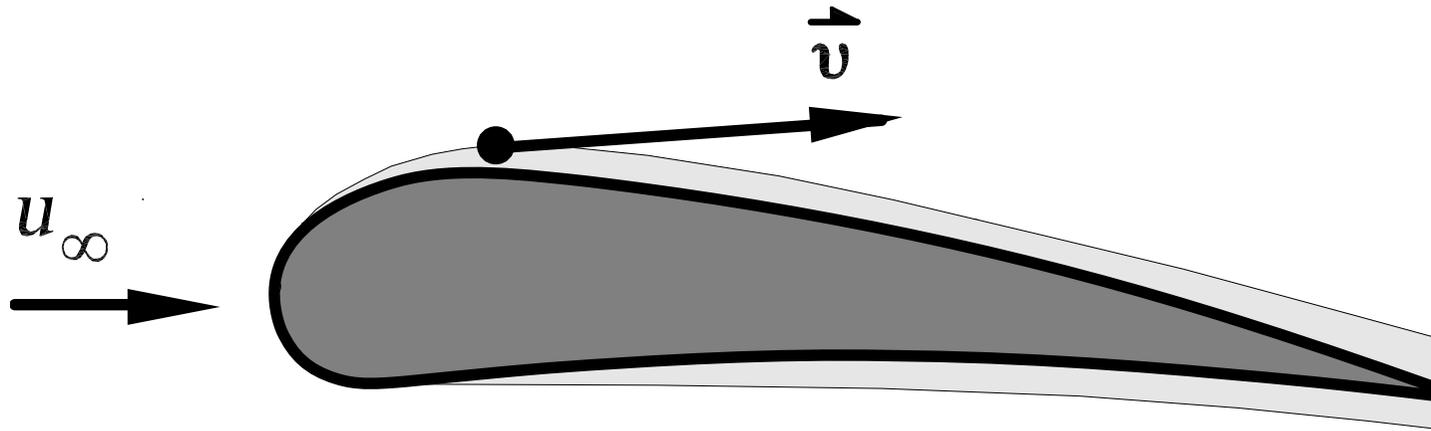
Zweidimensionale, inkompressible Grenzschicht

Stromlinie
(reibungsfrei)

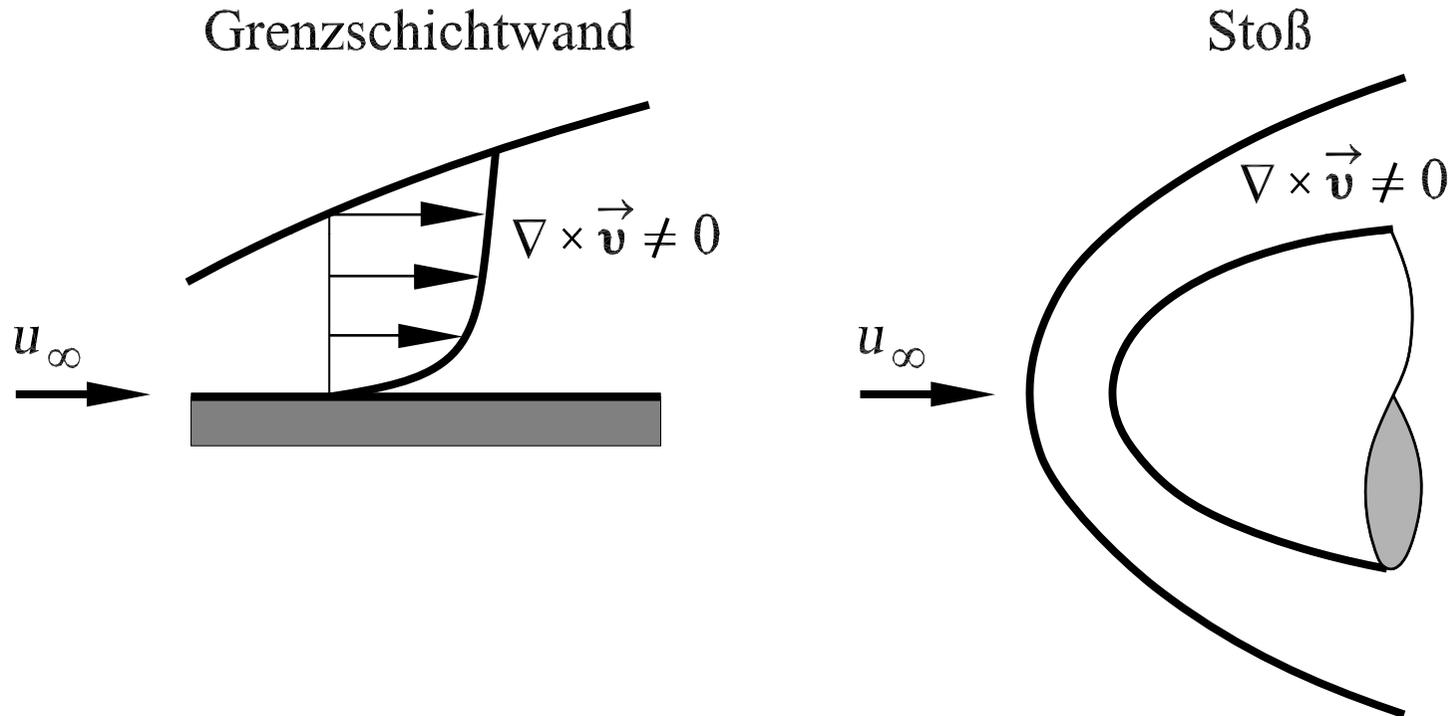
u_∞



Profilumströmung

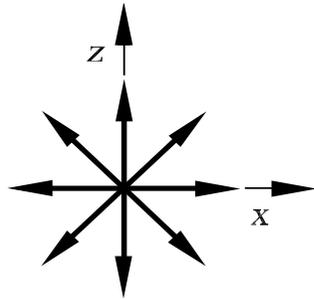


Drehungsbehaftete Strömung



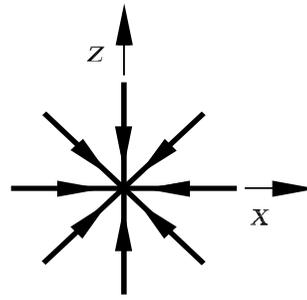
Potentialgleichungen

Elementarlösungen der Potentialgleichung



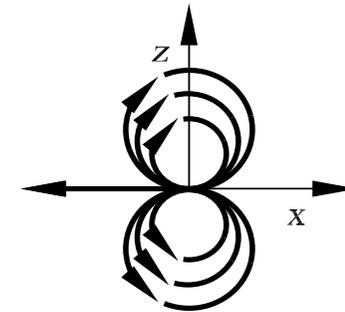
Quelle $Q > 0$

$$\varphi(x,z) = \frac{Q}{2\pi} \cdot \ln(\sqrt{x^2+z^2})$$



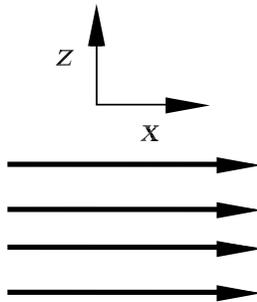
Senke $Q < 0$

$$\varphi(x,z) = \frac{Q}{2\pi} \cdot \ln(\sqrt{x^2+z^2})$$



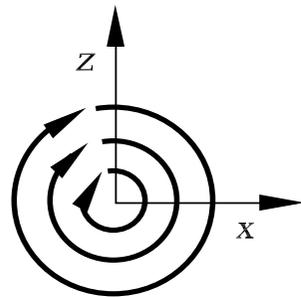
Dipol

$$\varphi(x,z) = \frac{m \cdot z}{x^2+z^2}$$



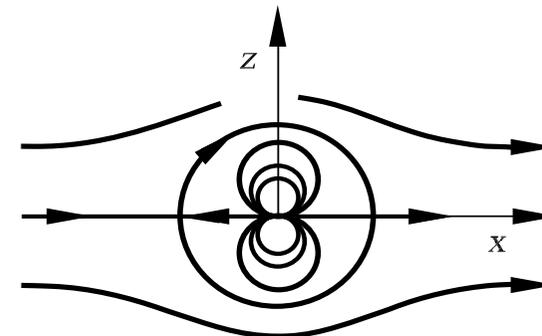
Parallelströmung

$$\varphi(x,z) = u_\infty \cdot x$$



Wirbel

$$\varphi(x,z) = -\frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \arctan\left(\frac{z}{x}\right)$$

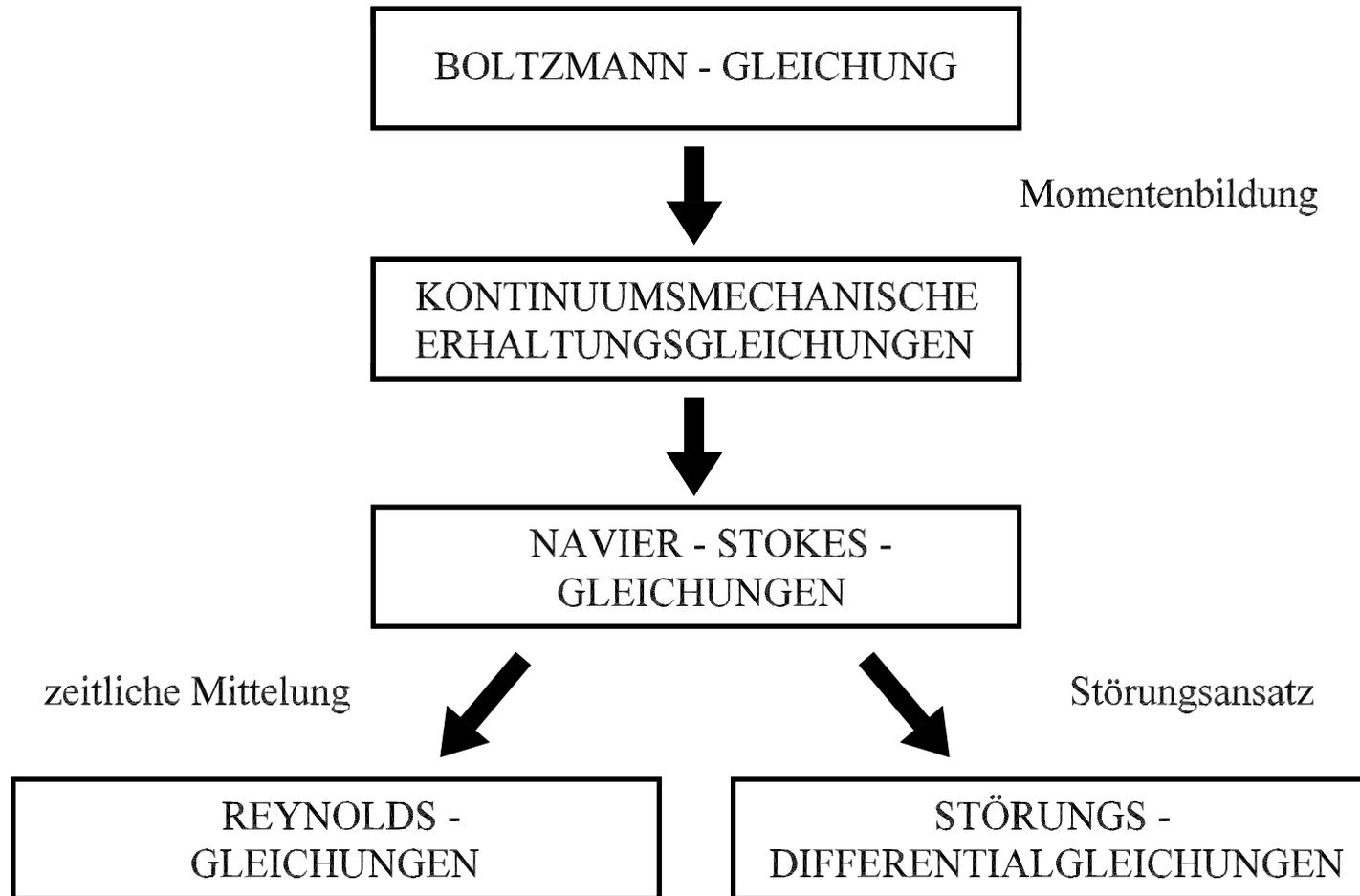


Zylinderumströmung

$$\varphi(x,z) = u_\infty \cdot x \cdot \left(1 + \frac{R^2}{x^2+z^2}\right) - \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \arctan\left(\frac{z}{x}\right)$$

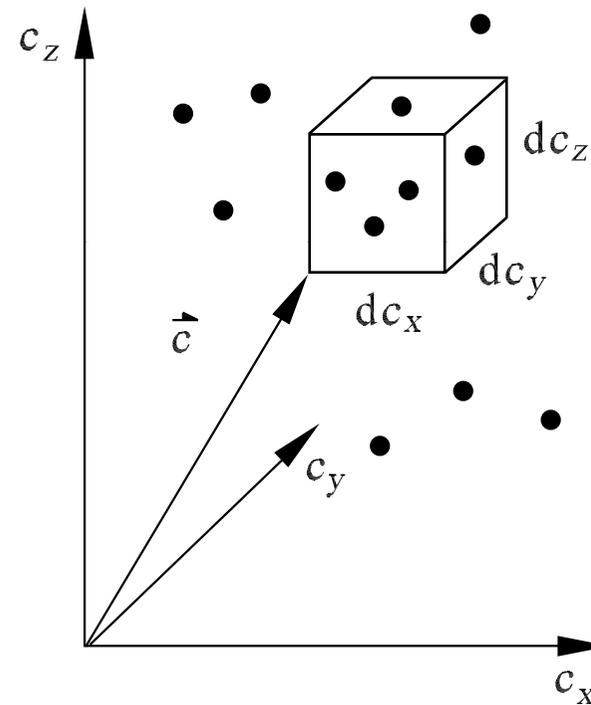
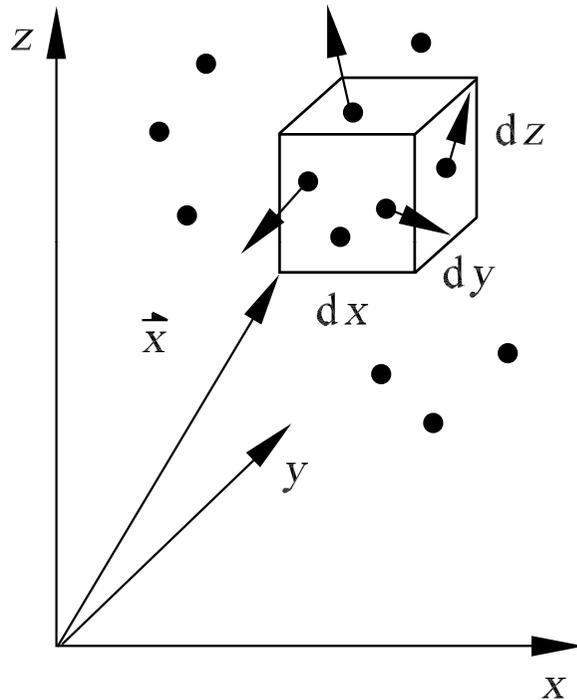


Grundgleichungen in Erhaltungsform

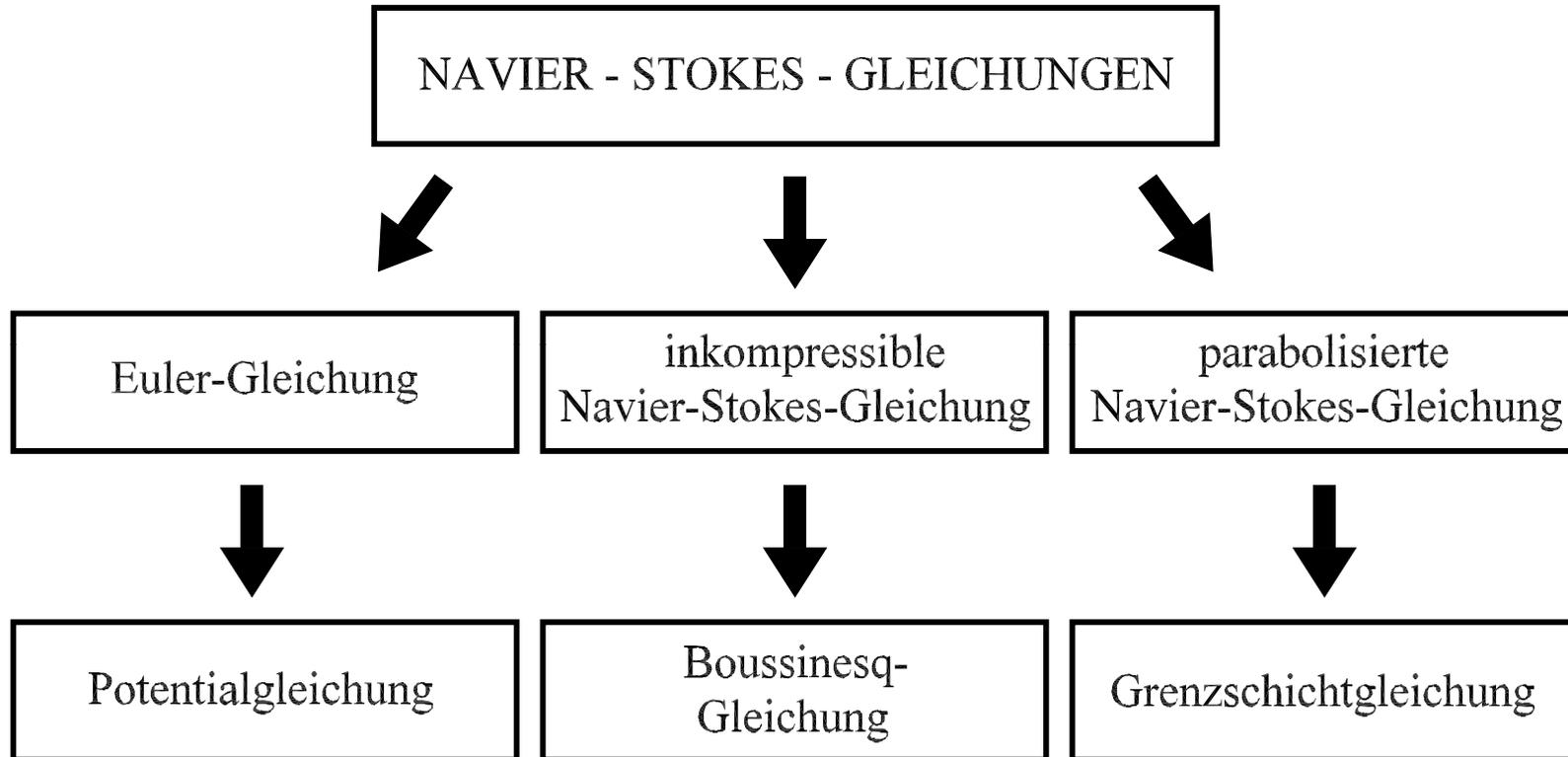


Grundgleichungen in Erhaltungsform

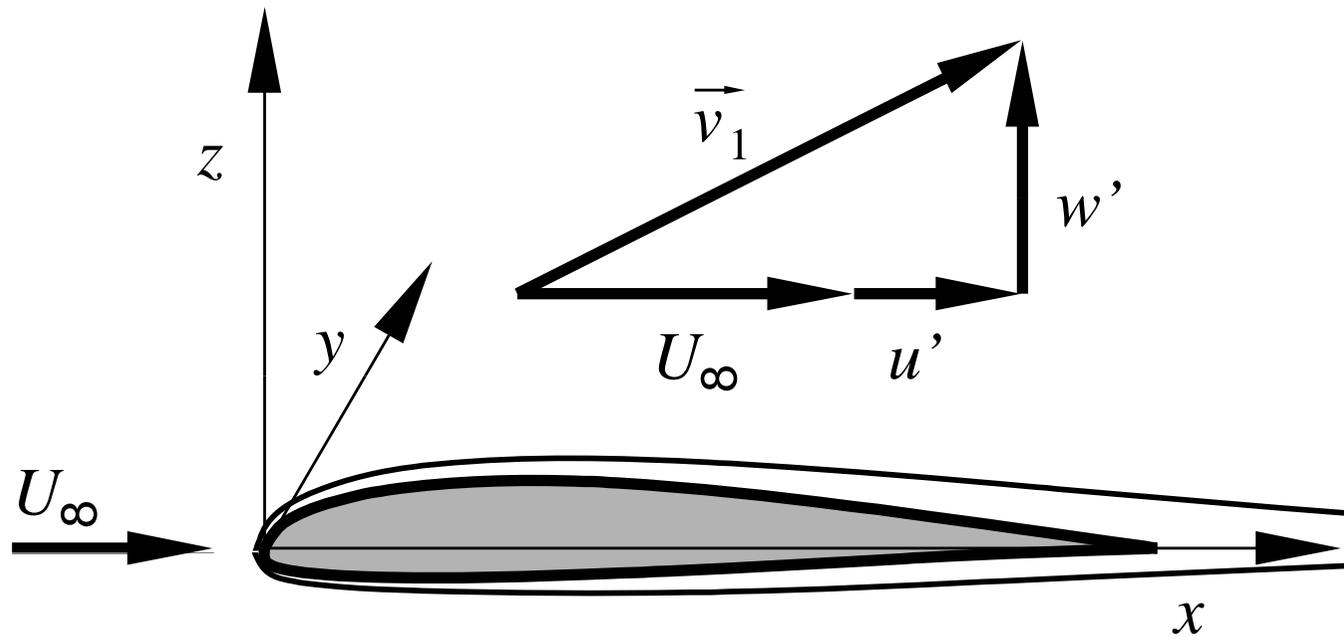
Physikalischer Raum und Geschwindigkeitsraum



Grundgleichungen in Erhaltungsform

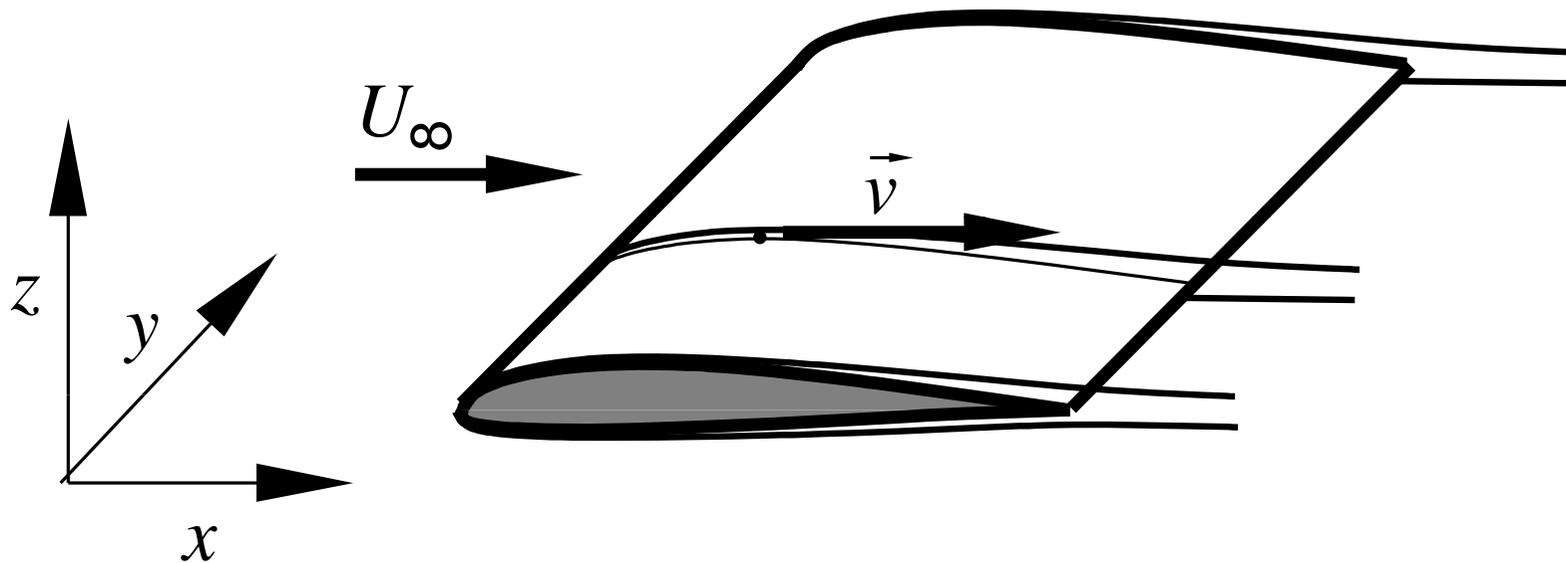


Strömung um einen schlanken Flügel



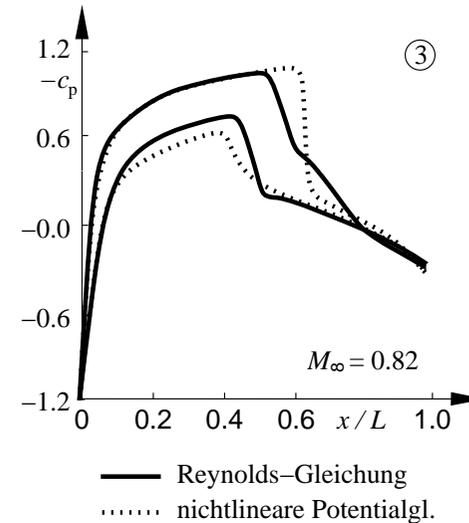
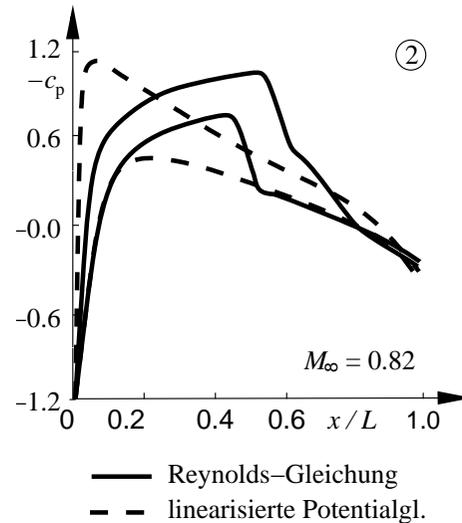
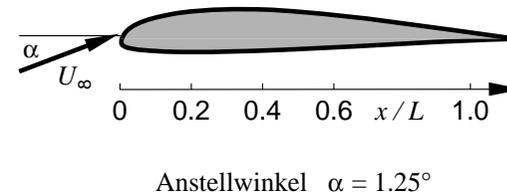
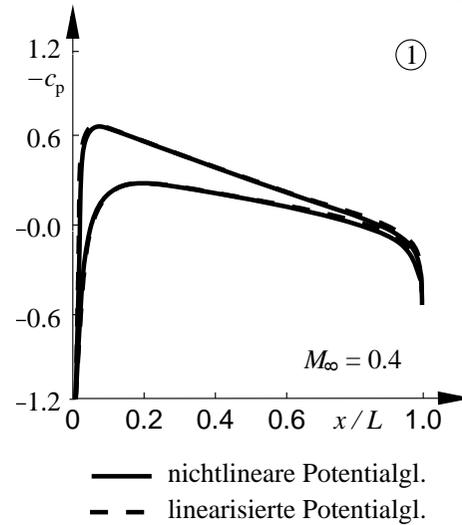
Linearisierung

Randbedingungen für einen schlanken Flügel am Grenzschichttrand

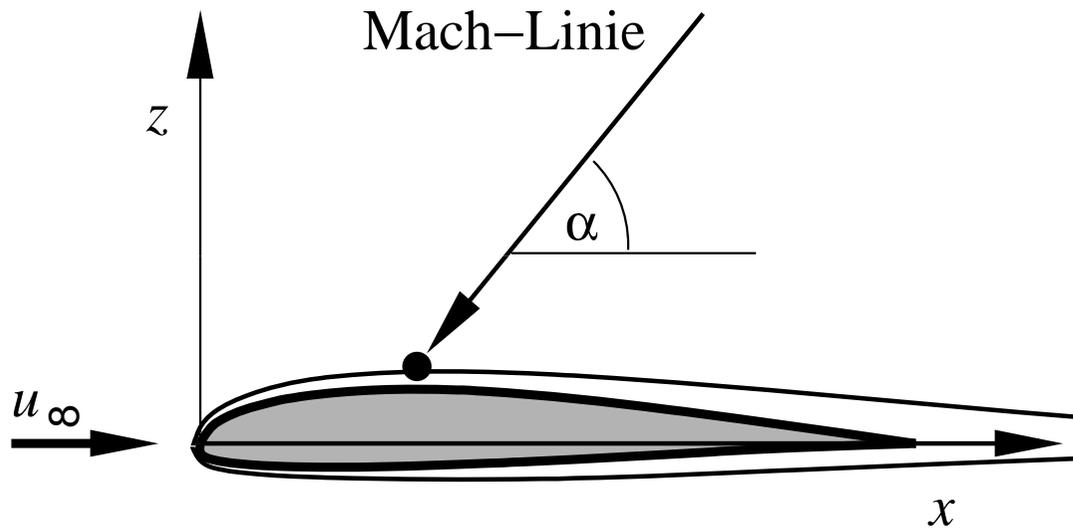


Linearisierung

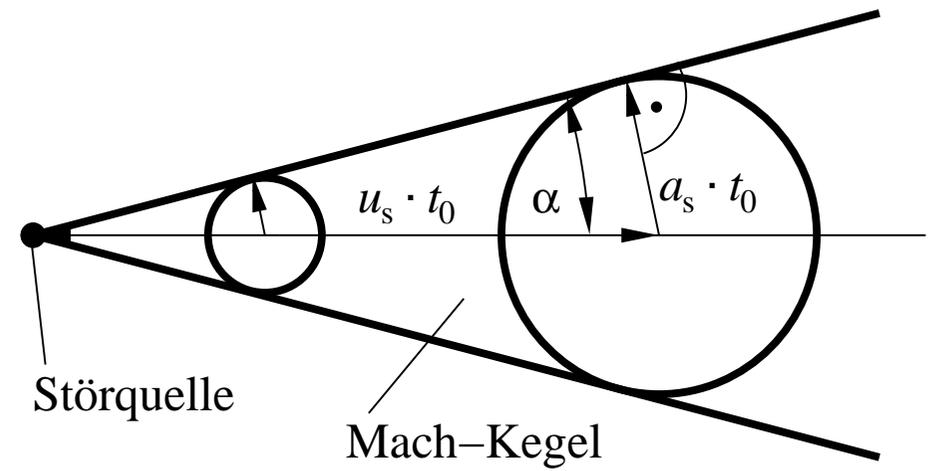
Numerische Lösung der Profilmströmung



Strömung um einen schlanken Flügel

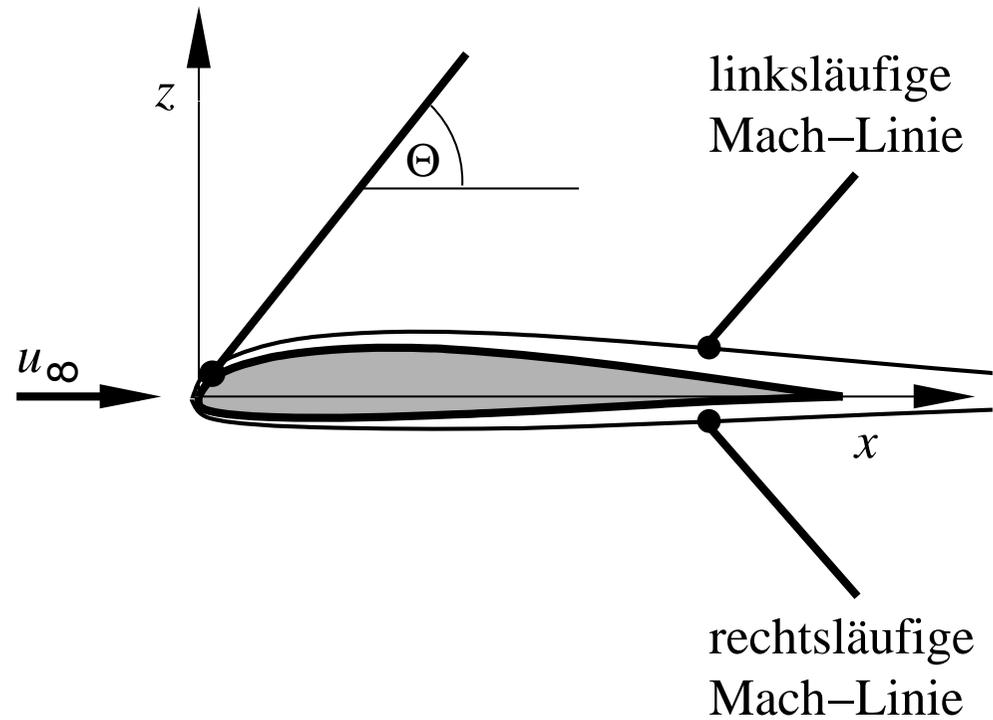


Mach-Kegel



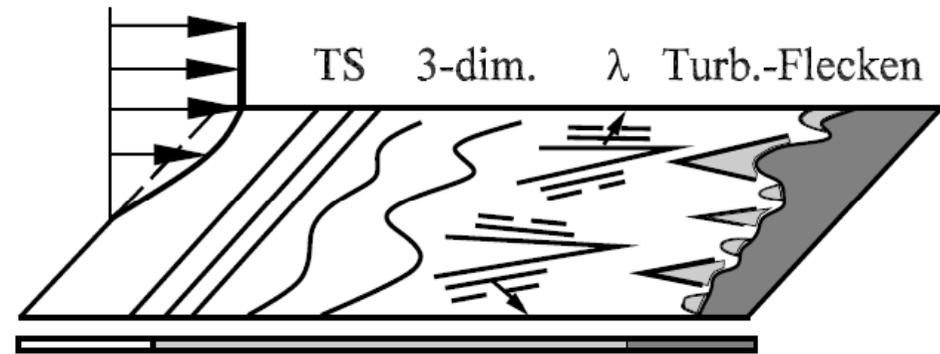
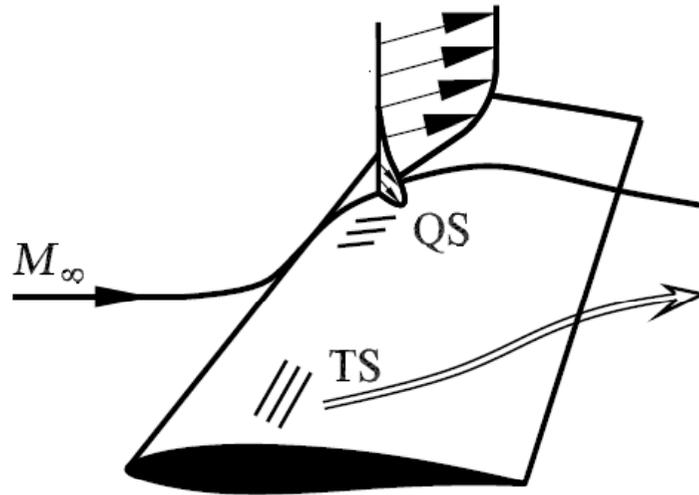
Linearisierung

Links- und rechtläufige Mach-Linie



Stabilitätsanalyse

Laminar- turbulenter Übergang in einer Tragflügel-Grenzschicht

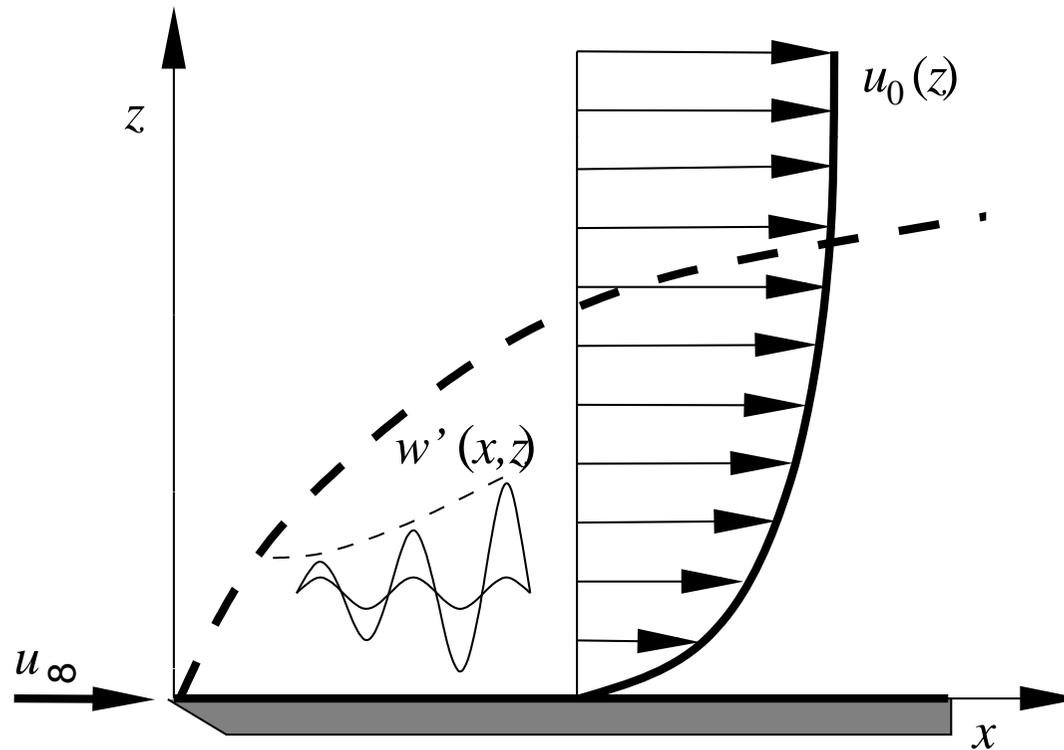


laminar transitionell turbulent

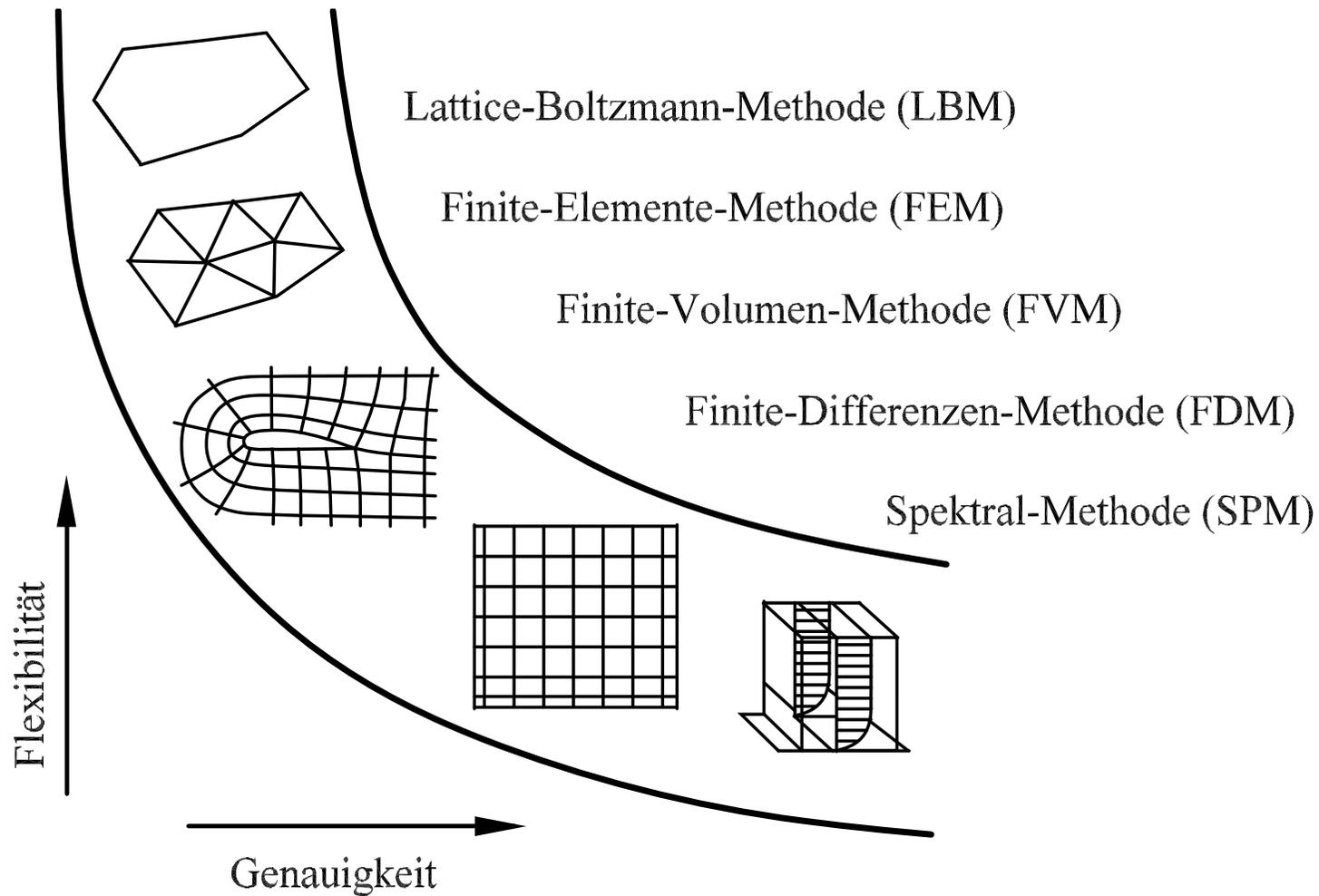


Stabilitätsanalyse

Laminar- turbulenter Übergang in der Plattengrenzschicht

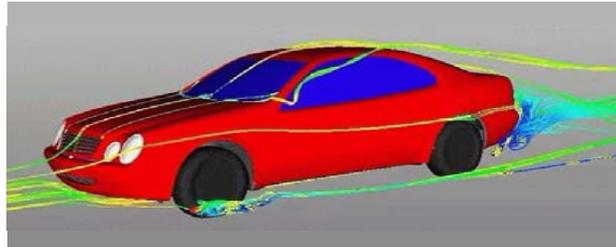


Genauigkeit und Flexibilität numerischer Lösungsmethode



Lattice-Boltzmann-Methode (LBM)

Kraftfahrzeugumströmung – Heckverschmutzung



Nachrechnung



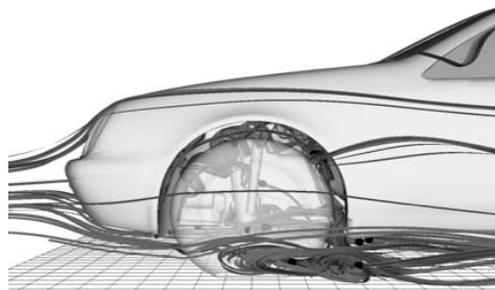
Windkanalexperiment



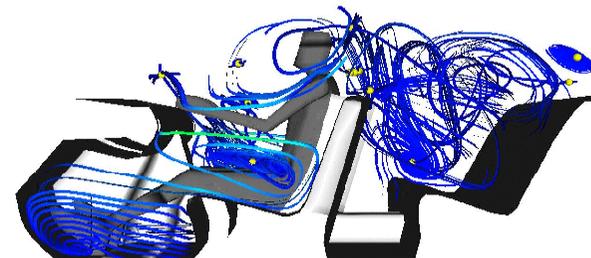
Heckspoiler (Isoflächen des Totaldrucks)



Heckverschmutzung



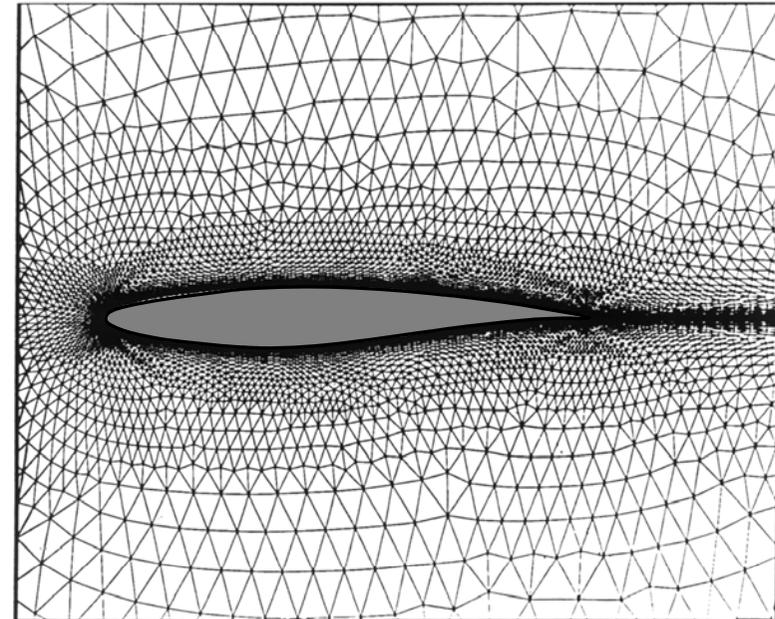
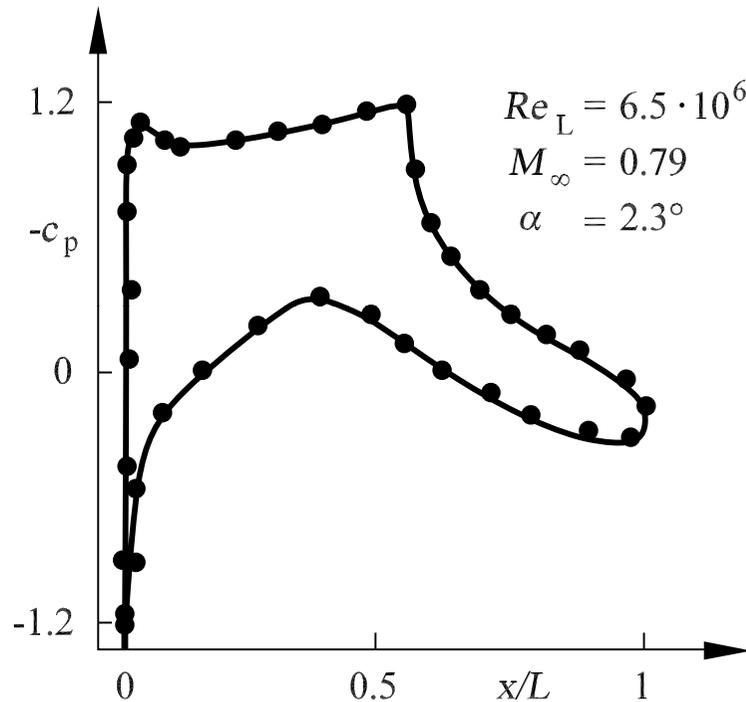
Strömungsstruktur im Radhaus



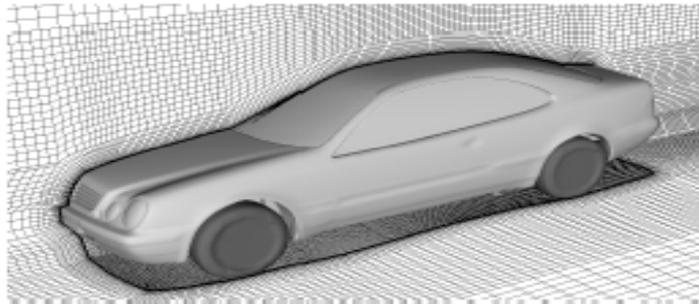
Klimatisierung des Fahrgastraumes



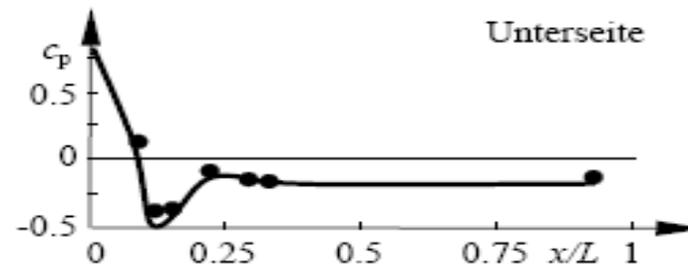
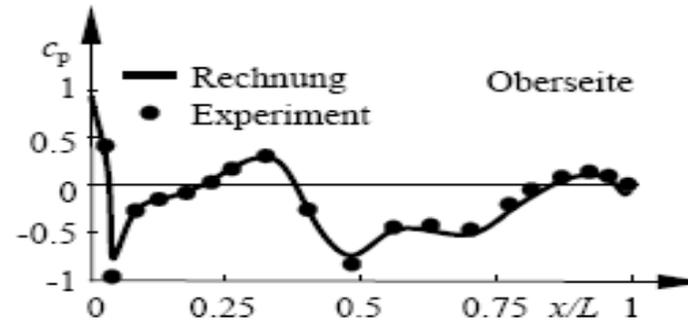
Profilumströmung



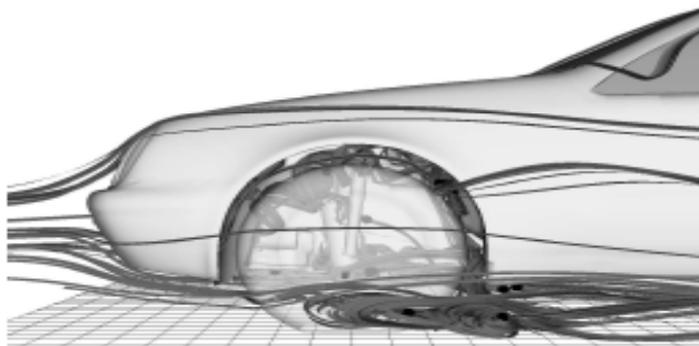
Finite-Volumen-Methode (FVM)



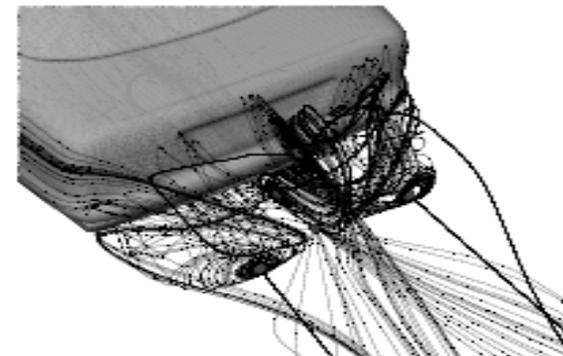
Finite-Volumen-Netz, $3.8 \cdot 10^6$ Gitterpunkte



Druckverteilungen



Strömungsstruktur im Radhaus

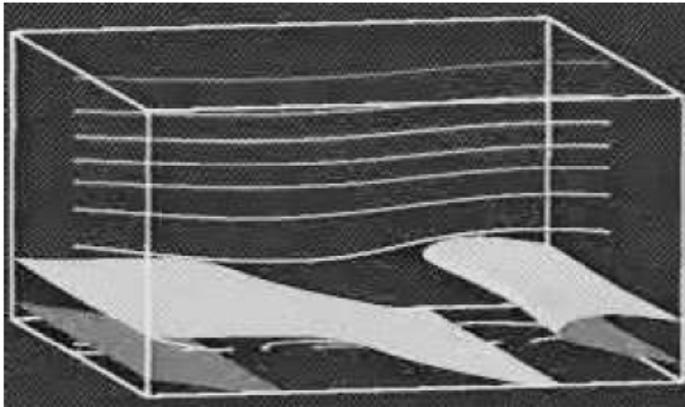


Struktur der Nachlaufströmung

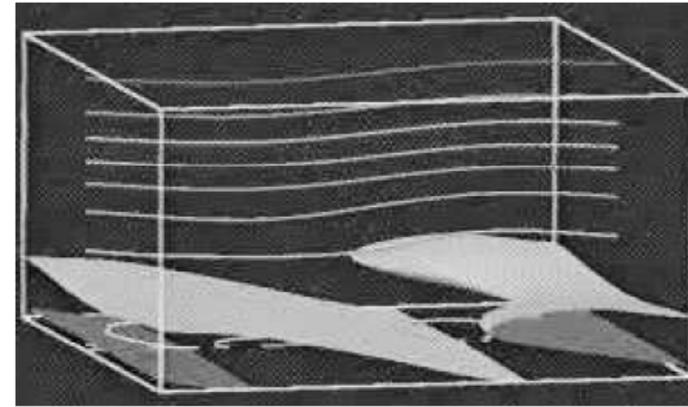


Spektralmethode

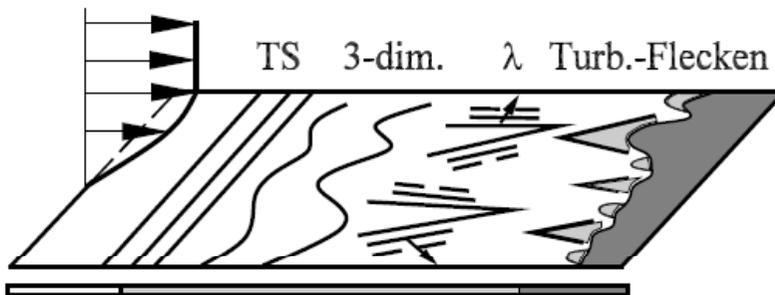
Laminar-turbulenter Übergang in der Plattengrenzschichtströmung



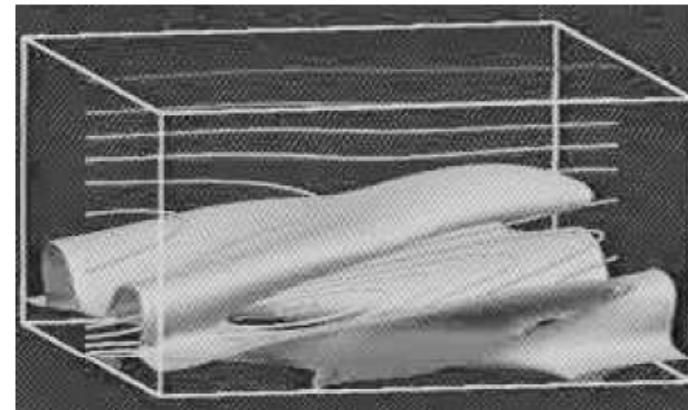
Tollmien-Schlichting-Welle



dreidimensional



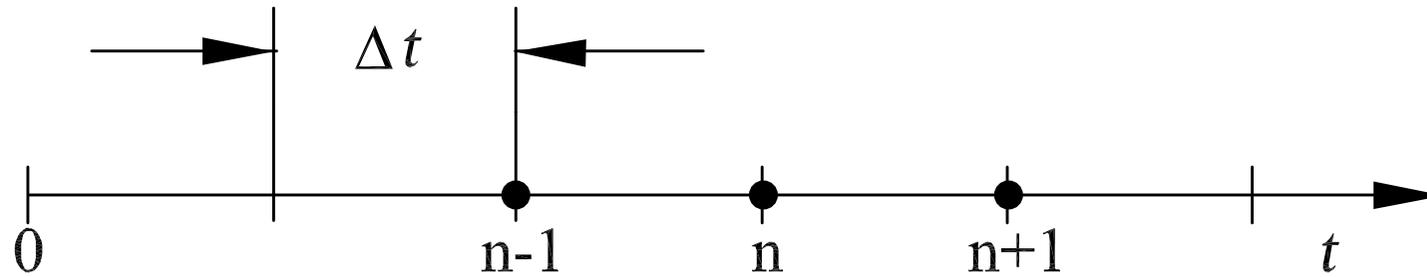
laminar transitionell turbulent



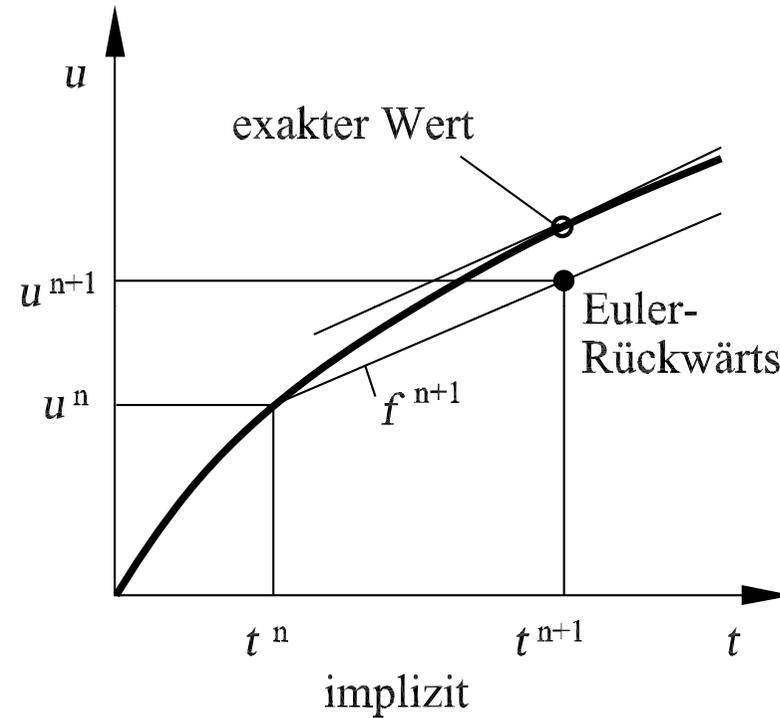
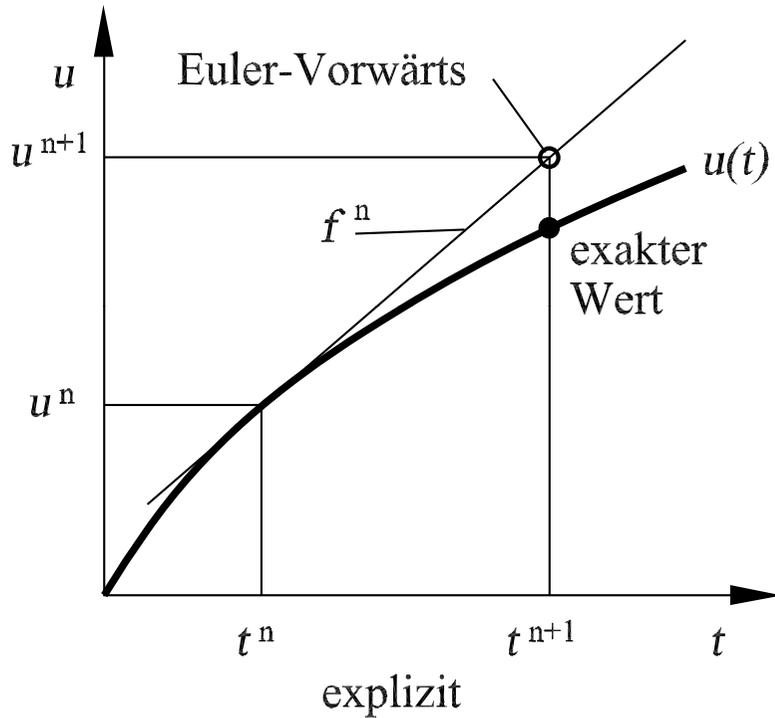
λ -Struktur



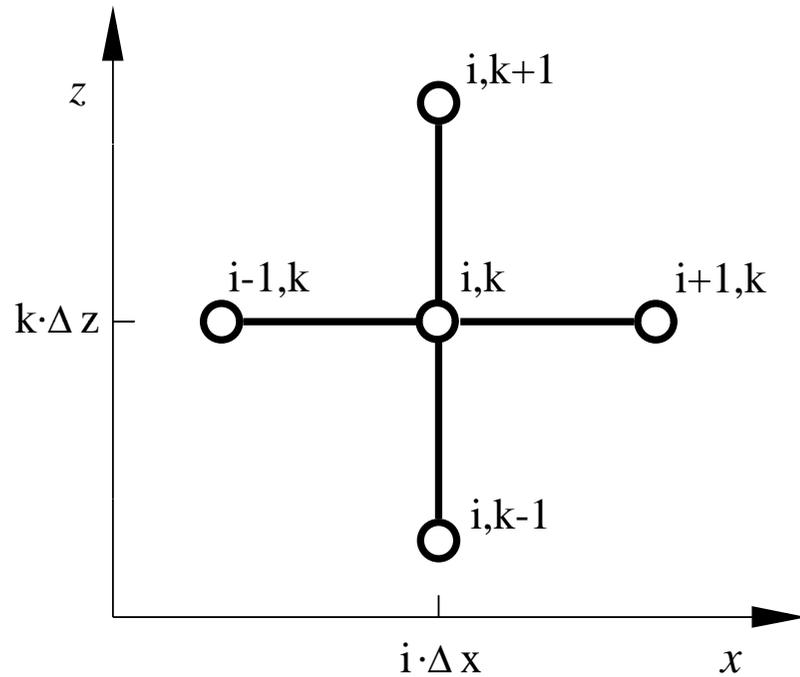
Zeitliche Diskretisierung



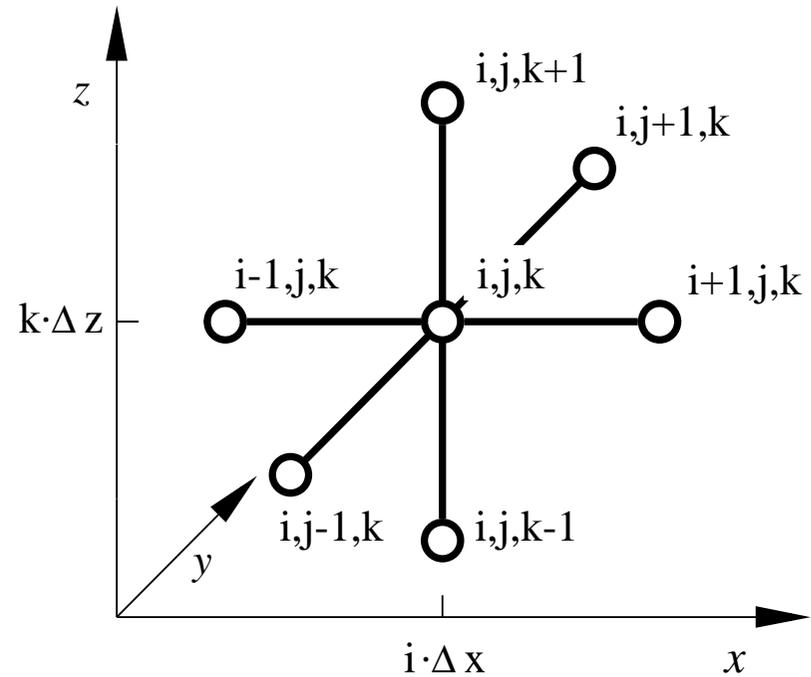
Explizite und implizite Euler-Methode



Ebene und räumliche Diskretisierung



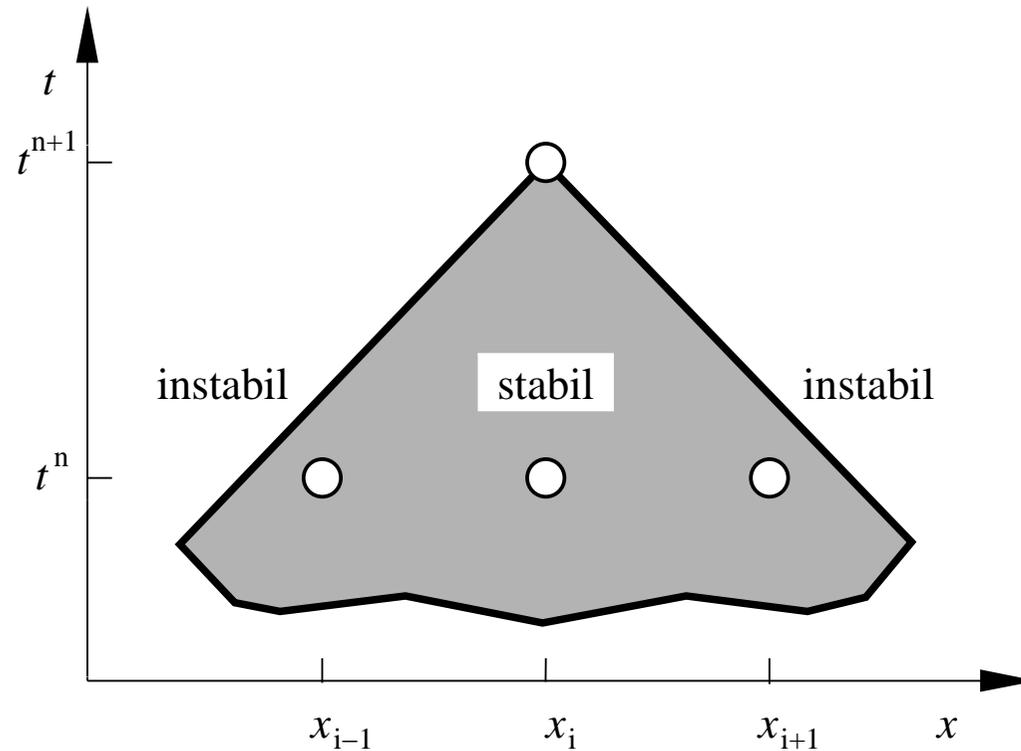
in der Ebene



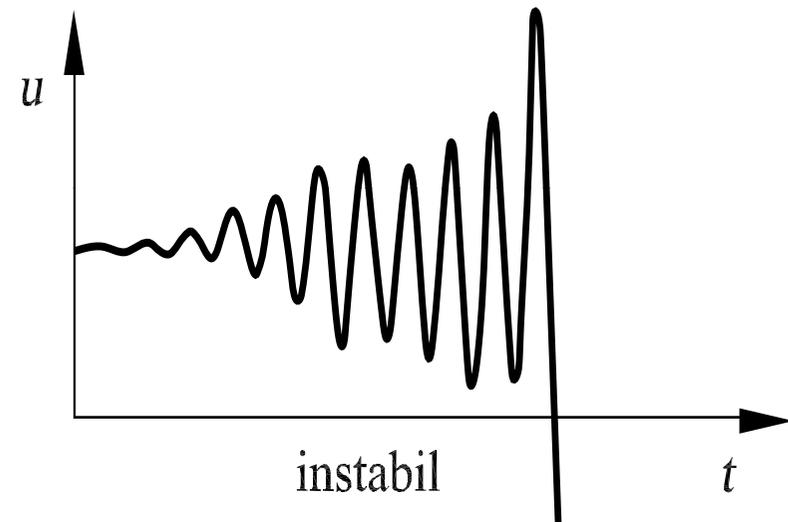
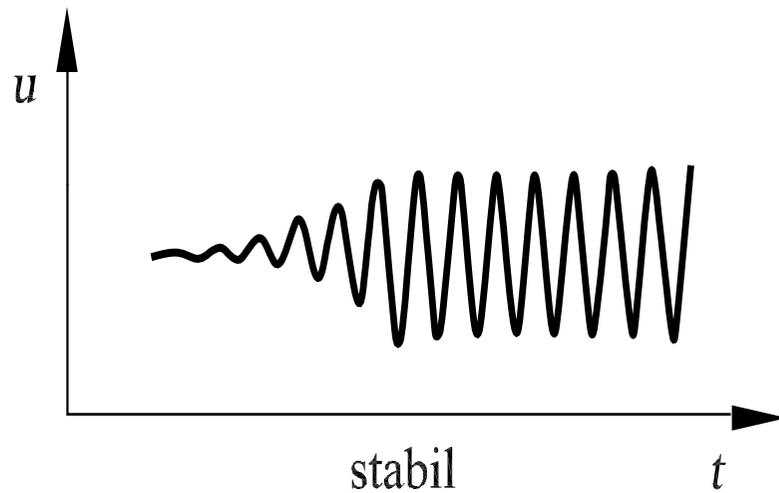
im Raum



Numerische Stabilität

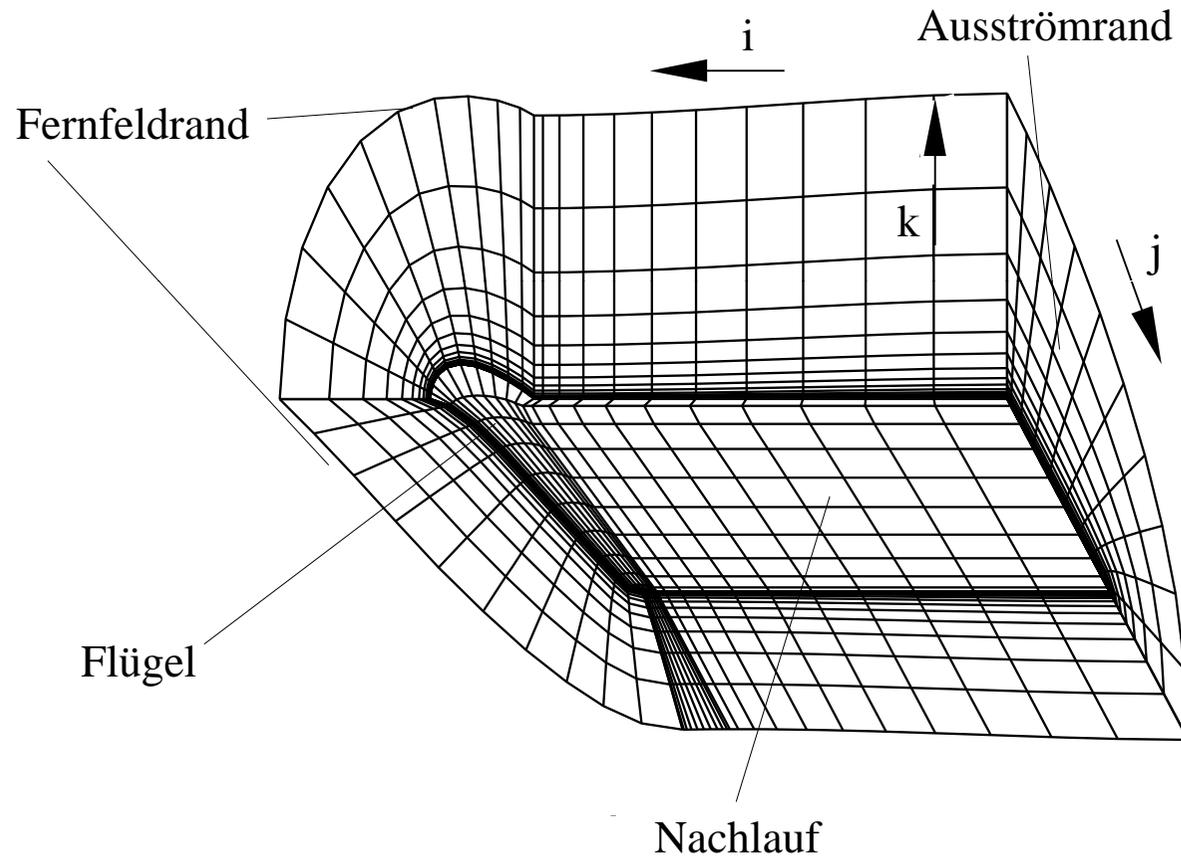


Stabile und instabile Lösung der Kármánschen Wirbelstraße

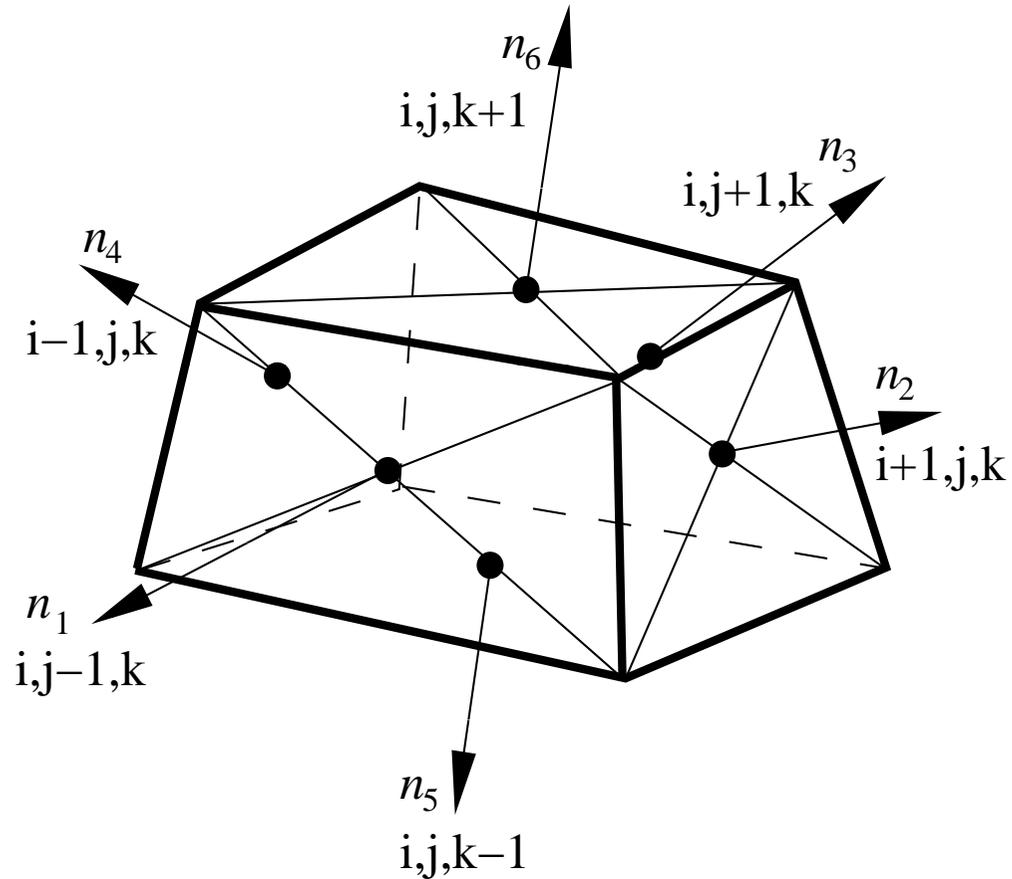


Finite-Volumen-Methode

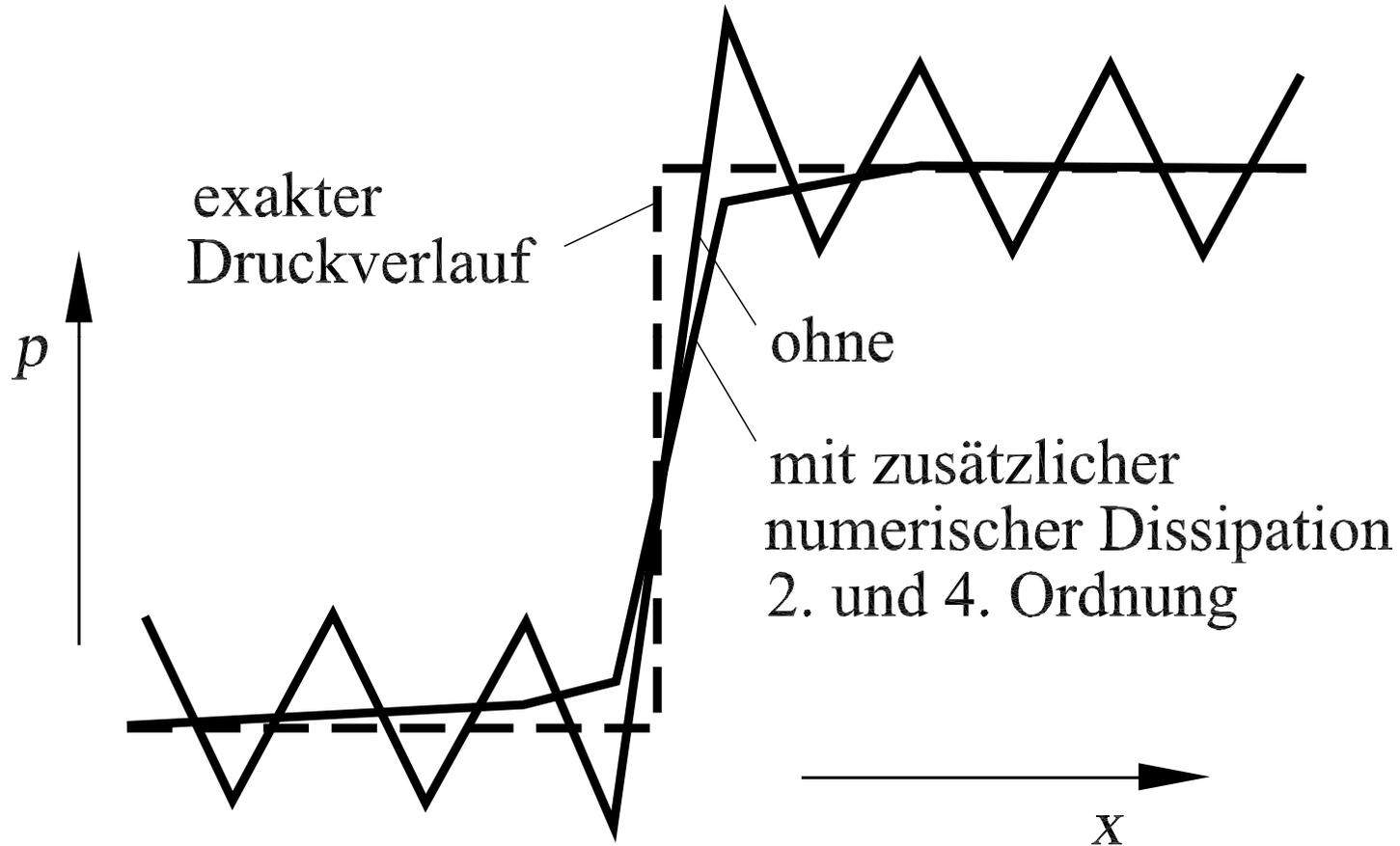
Räumliche Diskretisierung der Tragflügelumströmung in Finite Volumen



Volumenzelle und Normaleneinheitsvektoren

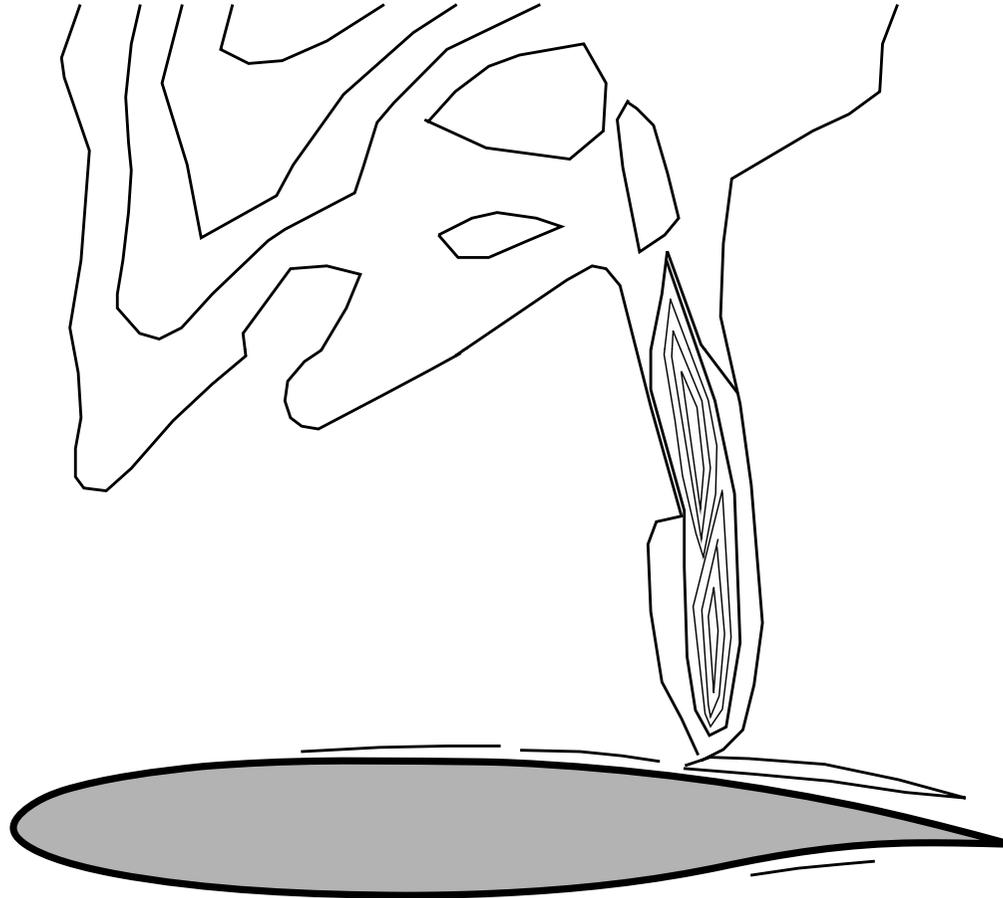


Oszillation in der Nähe eines Verdichtungsstoßes



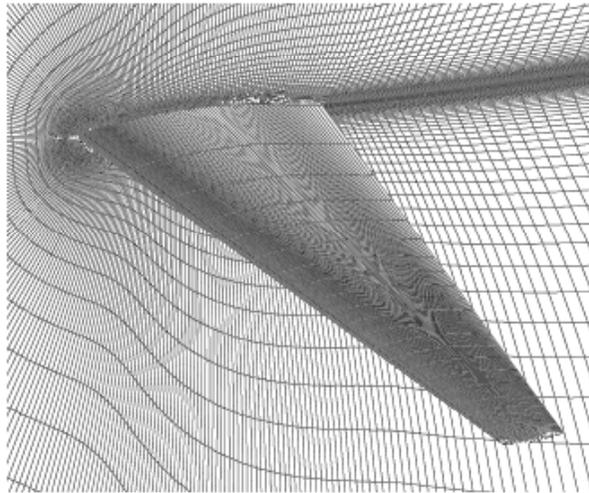
Finite-Volumen-Methode

Numerische Dissipation 2. und 4. Ordnung im Strömungsfeld eines transsonischen Profils

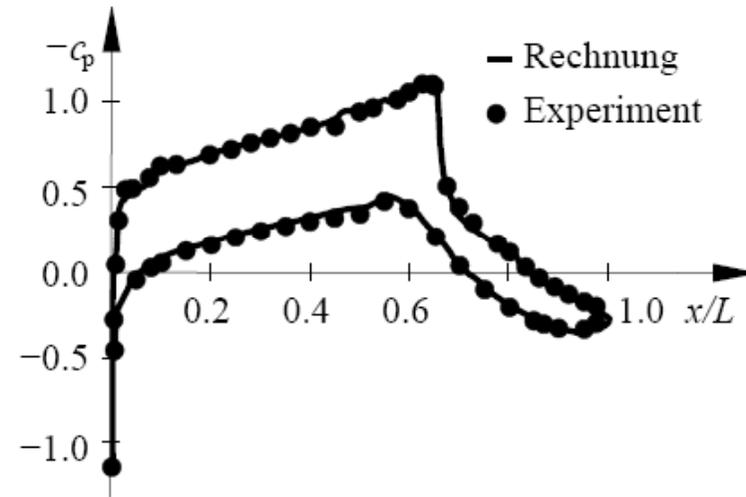


Finite-Volumen-Methode

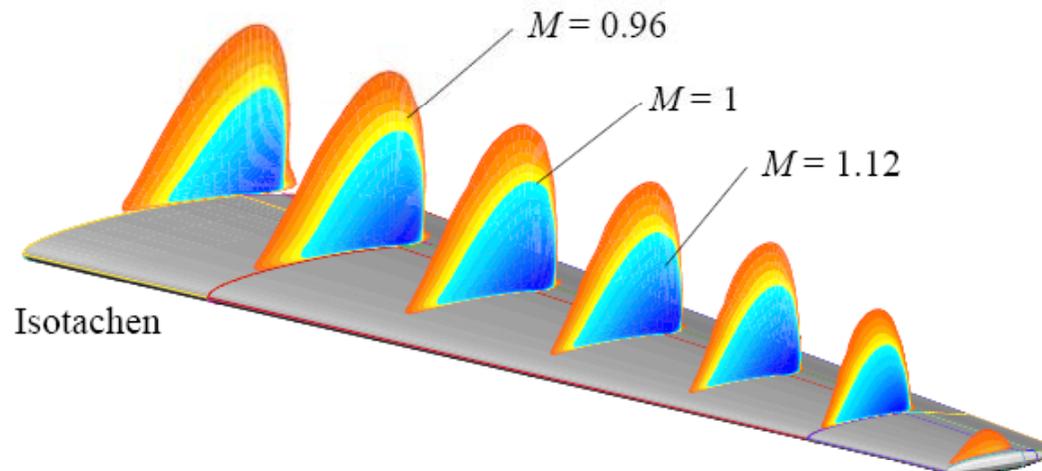
Druck- und Mach-Zahlverteilung eines transsonischen Tragflügels



Finite-Volumen-Netz, $8 \cdot 10^5$ Gitterpunkte



Druckverteilung

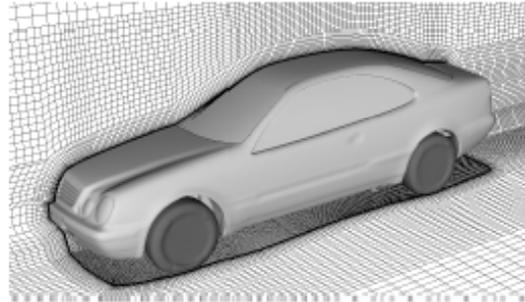


Isotachen

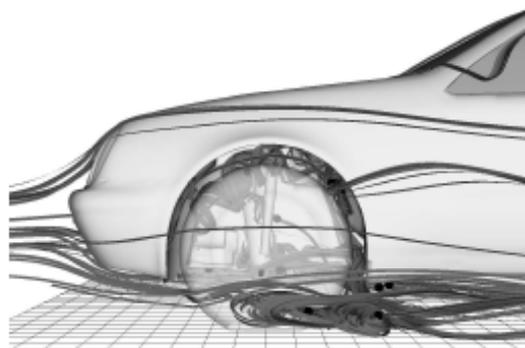


Finite-Volumen-Methode

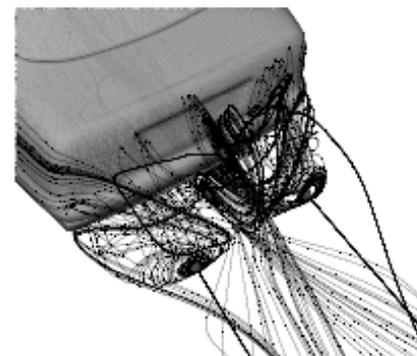
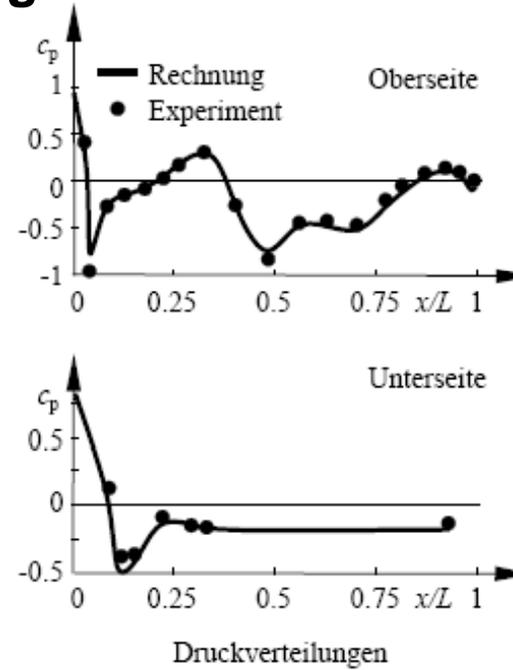
FV-Diskretisierung einer KFZ Umströmung und Druckverteilung in der Symmetrieebene



Finite-Volumen-Netz, $3.8 \cdot 10^6$ Gitterpunkte



Strömungsstruktur im Radhaus

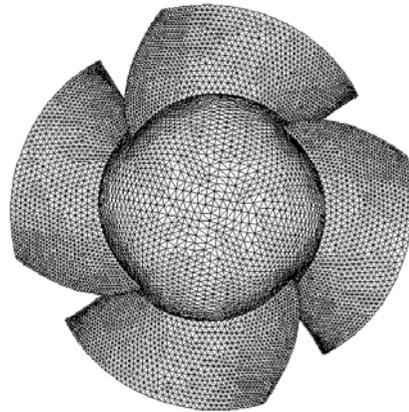


Struktur der Nachlaufströmung

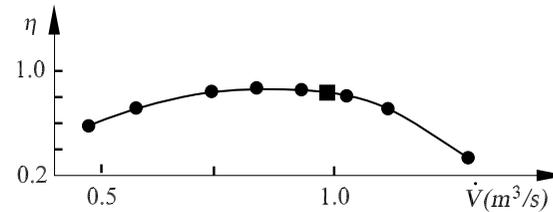


Finite-Volumen-Methode

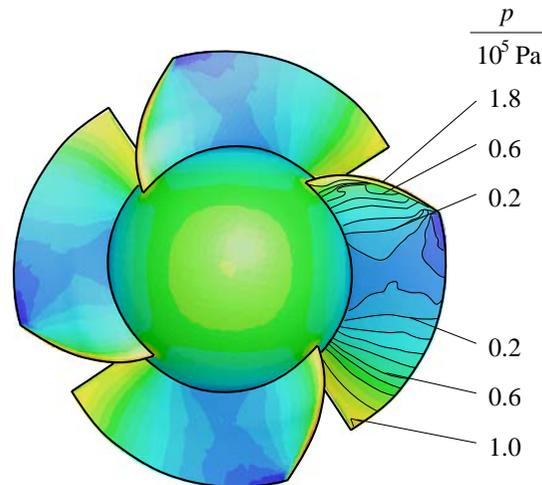
FV-Diskretisierung einer Axialpumpe und Isobaren der Druckverteilung auf dem Laufrad



Finite-Volumen-Netz, $2.8 \cdot 10^5$ Gitterpunkte



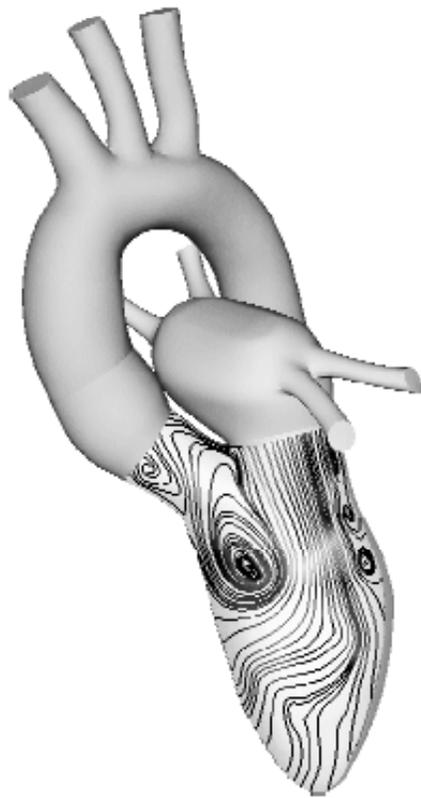
Wirkungsgrad



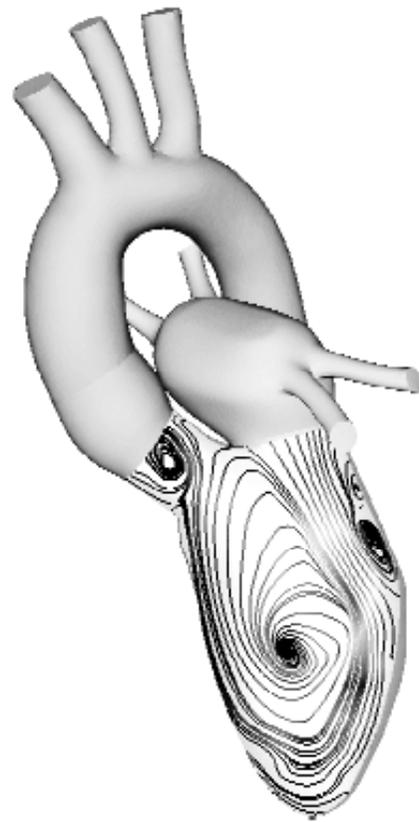
Isobaren



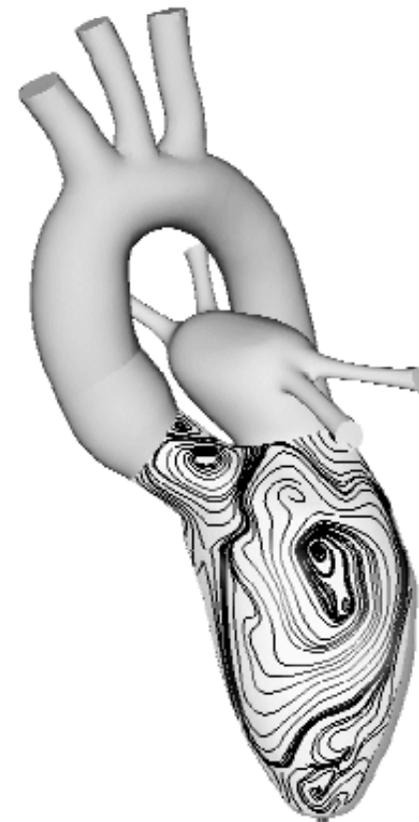
FV-Berechnung des linken Herzventrikels und der Aorta



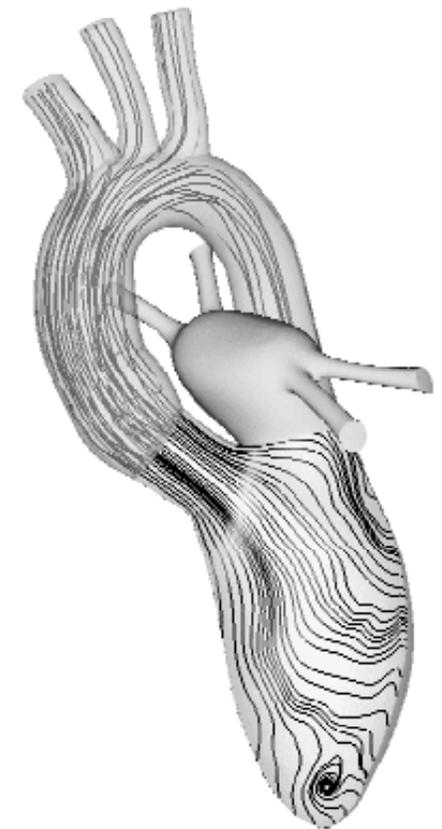
$t = 0.94$



$t = 0.06$



$t = 0.34$

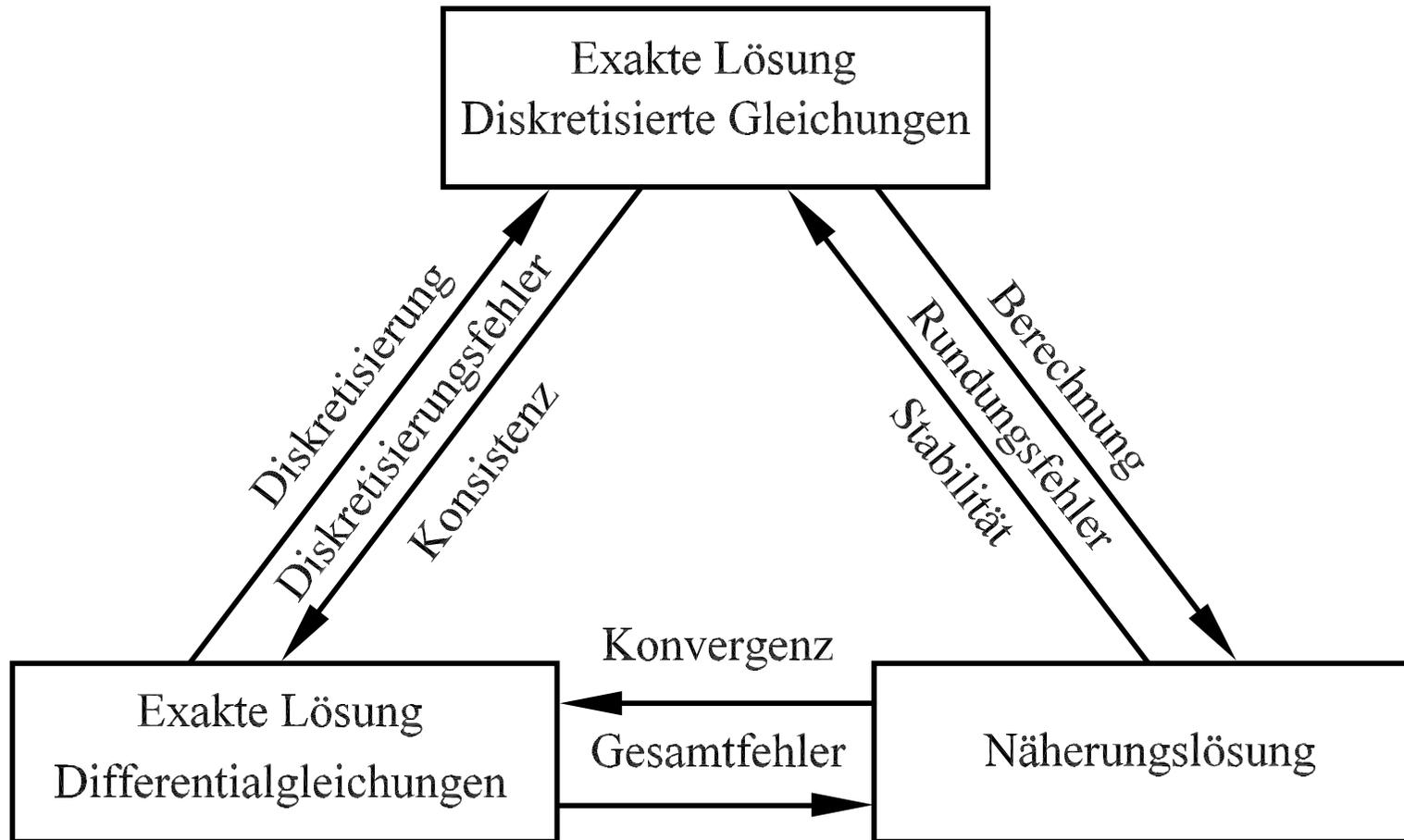


$t = 0.48$

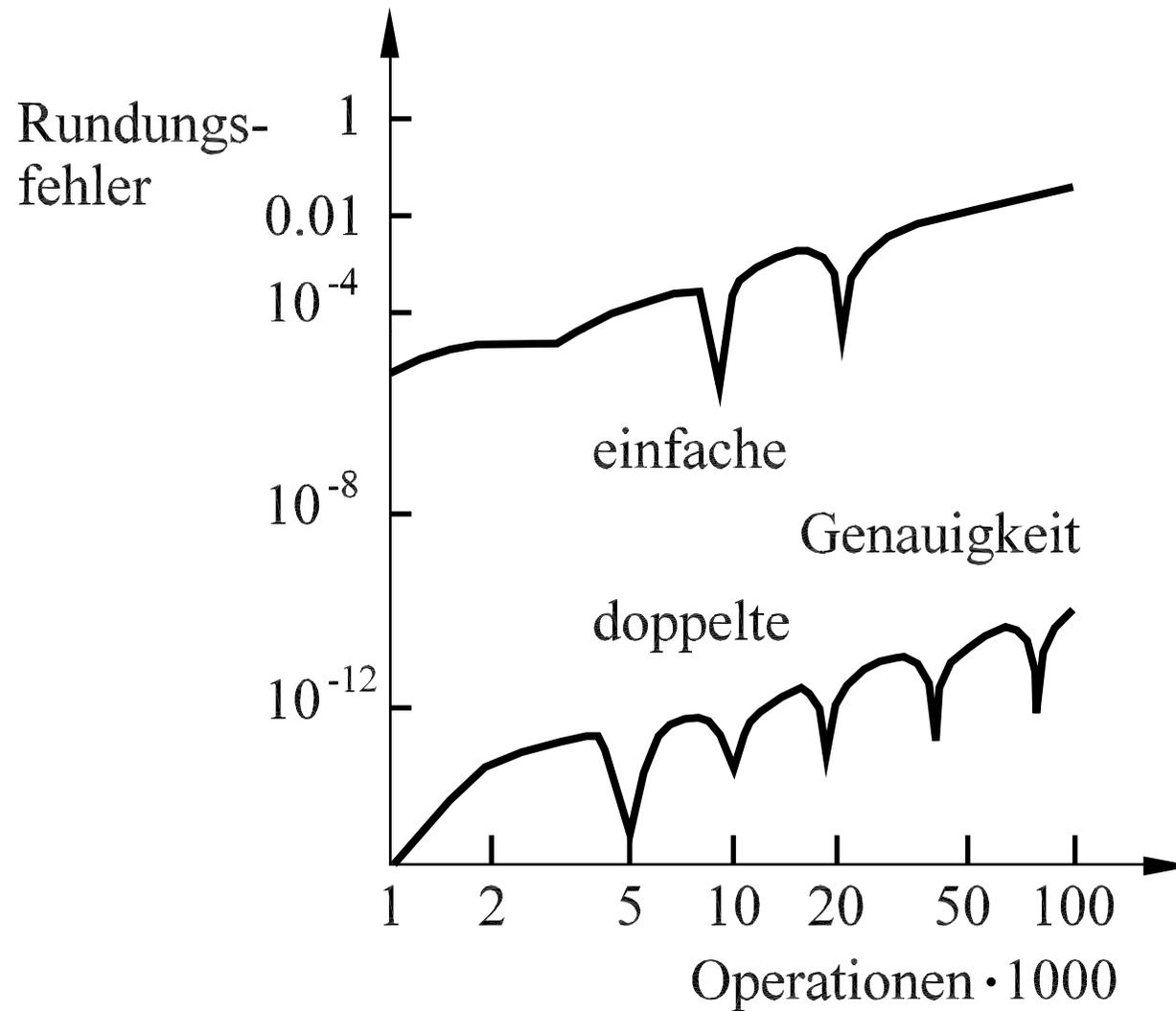


Konvergenz, Konsistenz

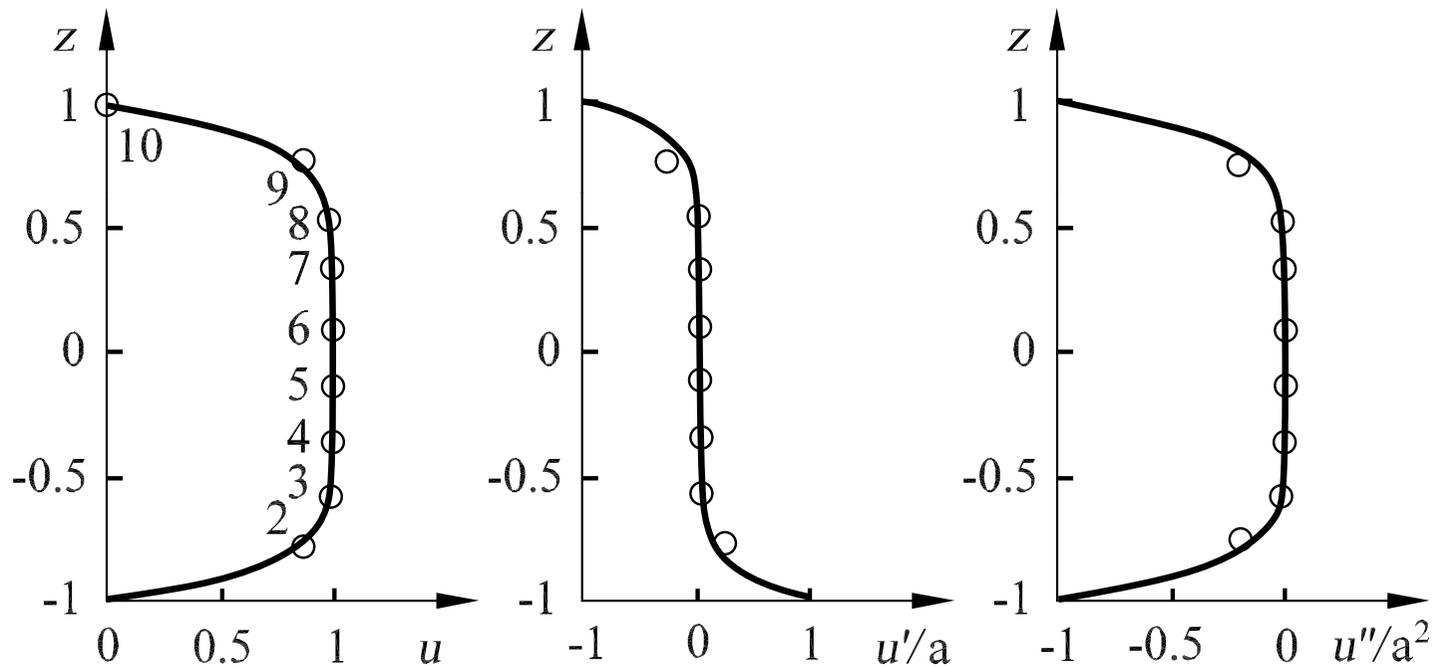
Zusammenhang zwischen Lösungen, Fehlern und Eigenschaften der Differentialgleichungen



Akkumulation von Rundungsfehlern

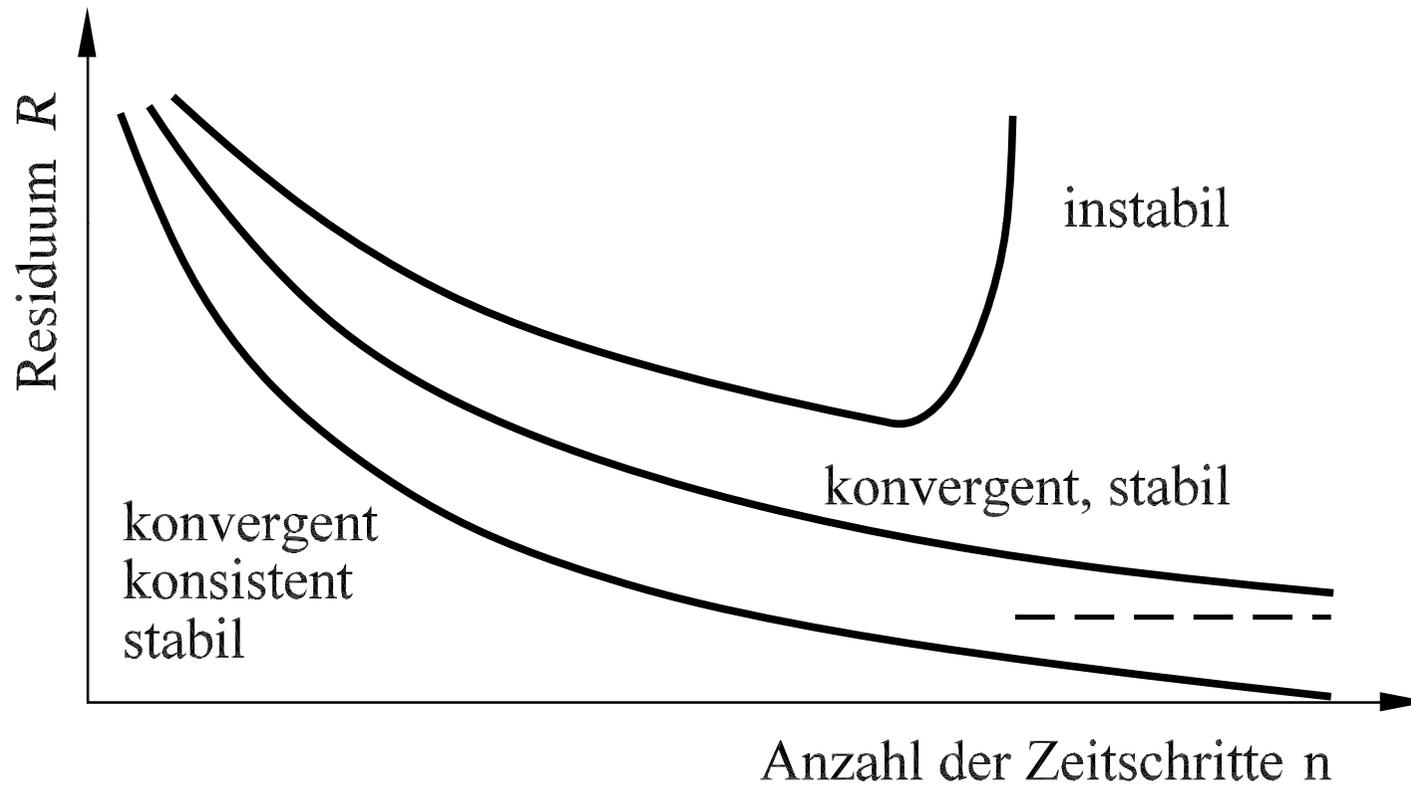


Approximationsfehler einer gegebenen Funktion



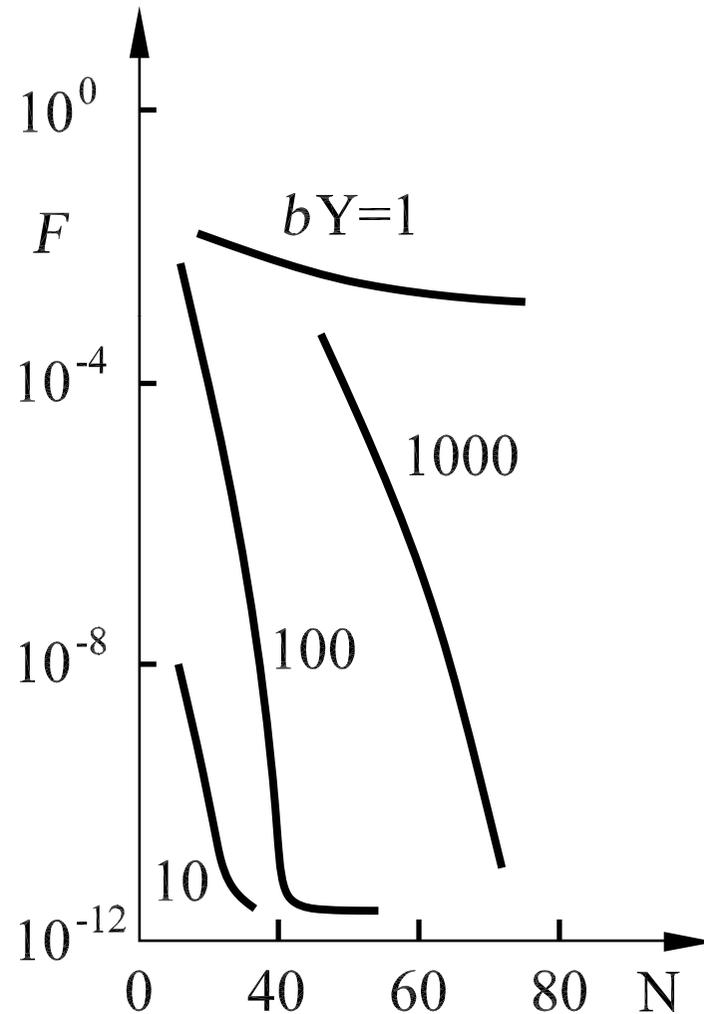
Konvergenz, Konsistenz

Konvergenz, Konsistenz und Stabilität



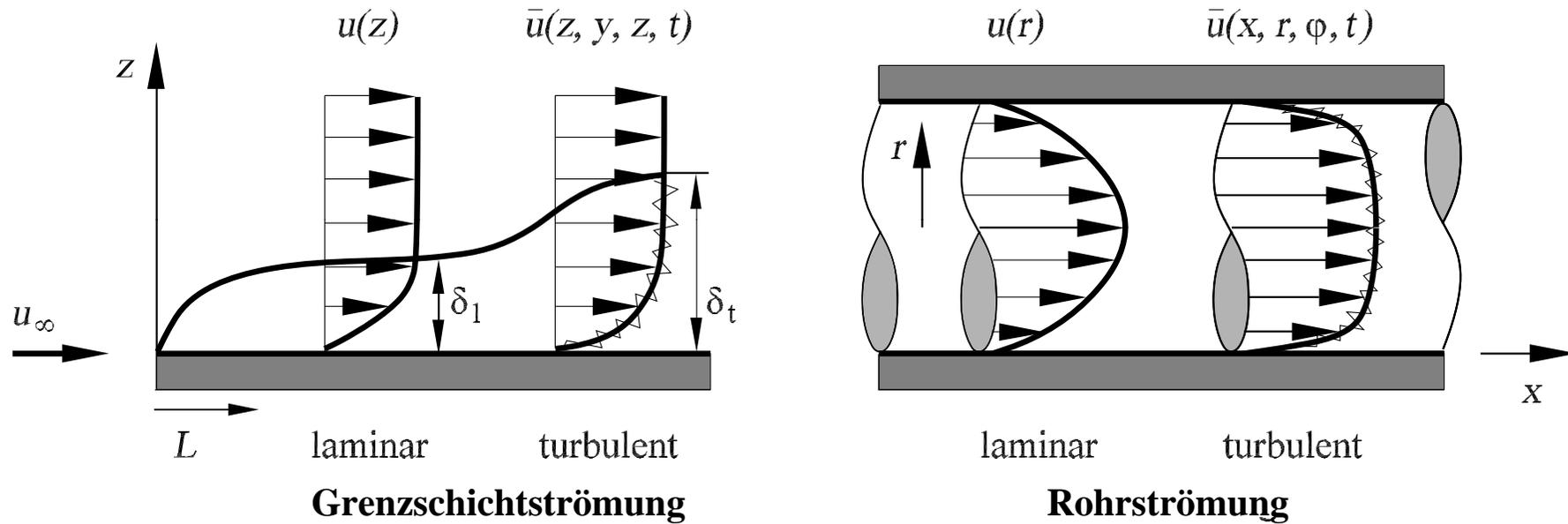
Konvergenz, Konsistenz

Ergebnisse der empirischen Konvergenzuntersuchung, Helmholtz-Testproblem

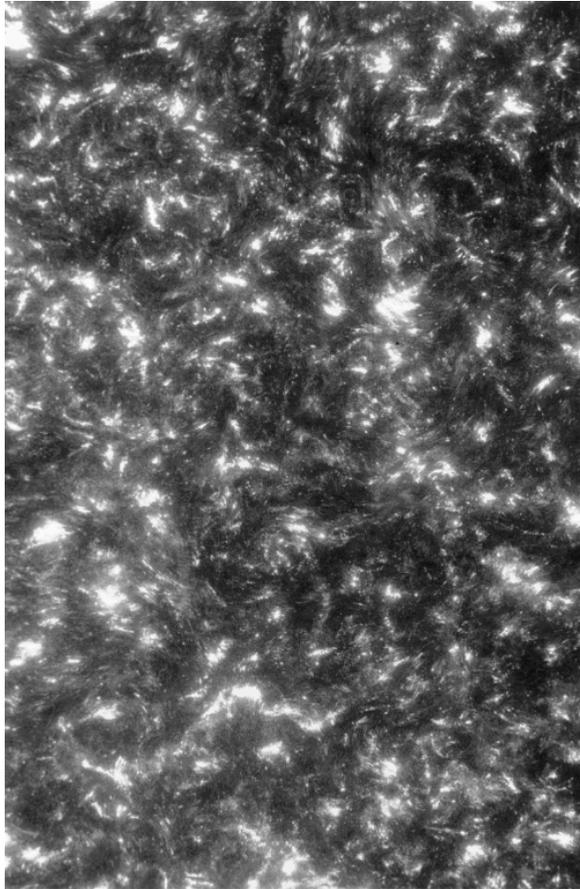


Turbulenz

Laminare und turbulente Grenzschicht- und Rohrströmung



Turbulente Strömung



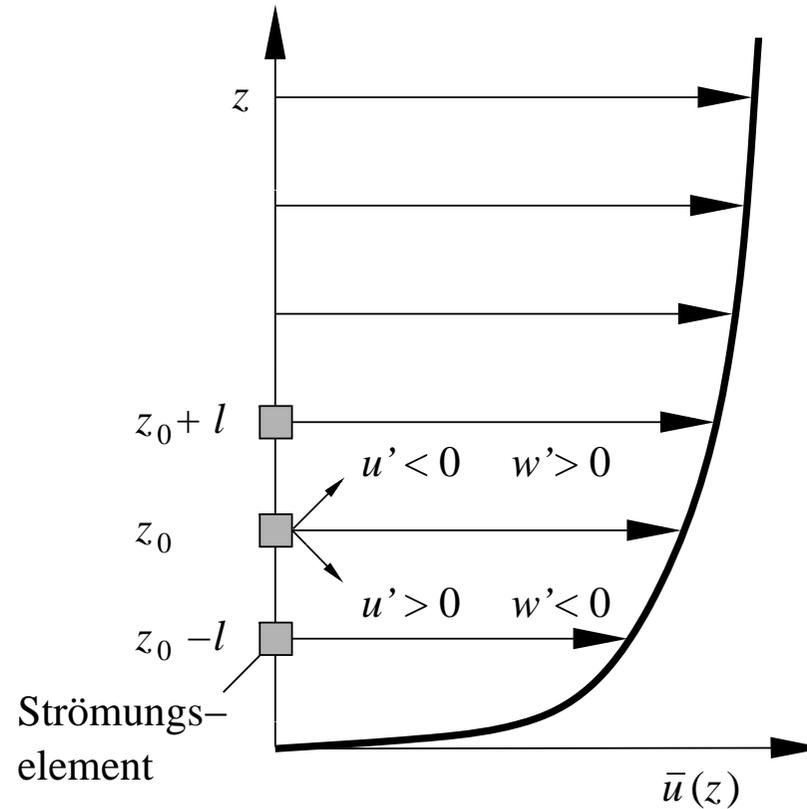
homogen isotrop



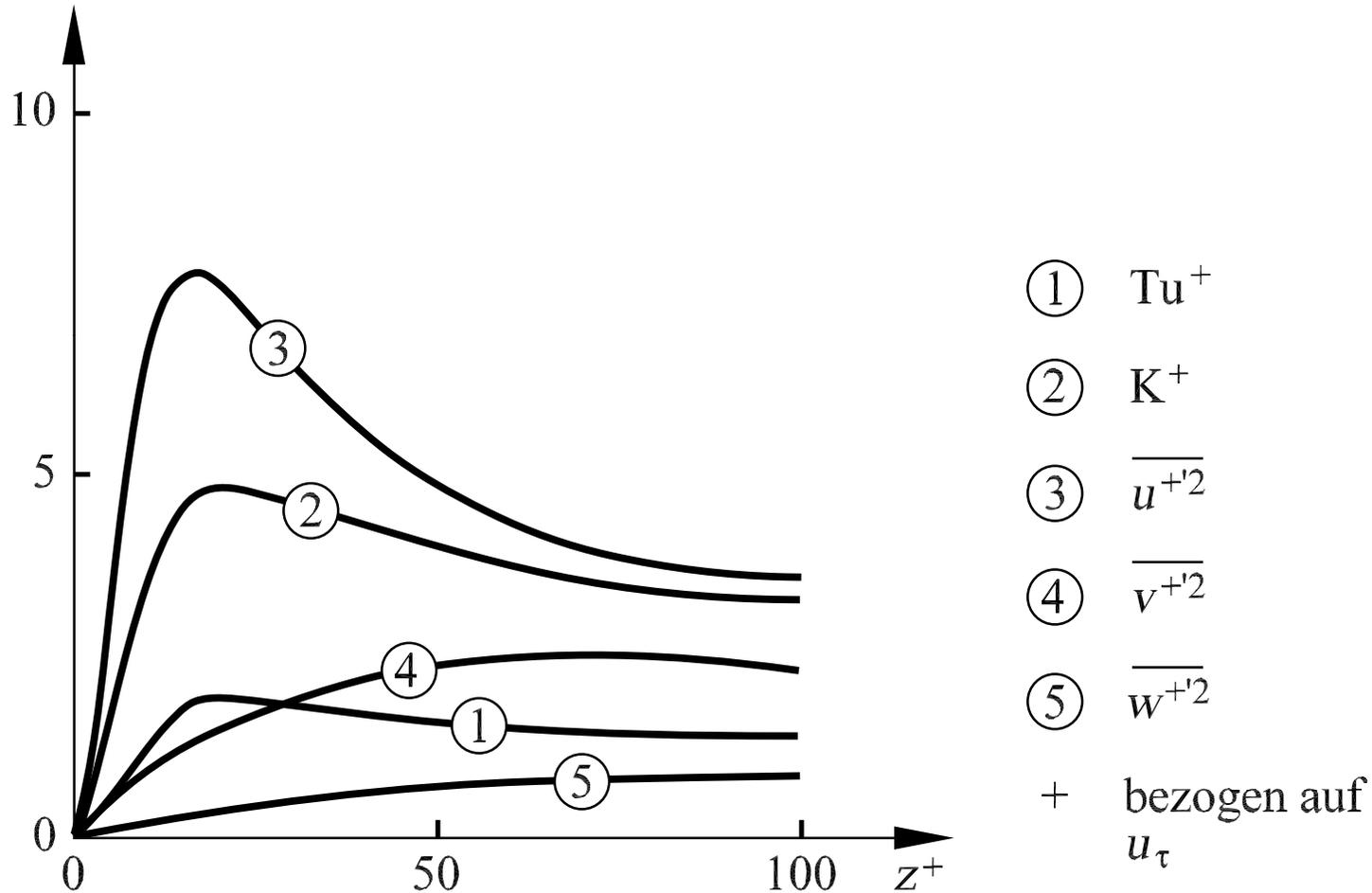
inhomogen anisotrop



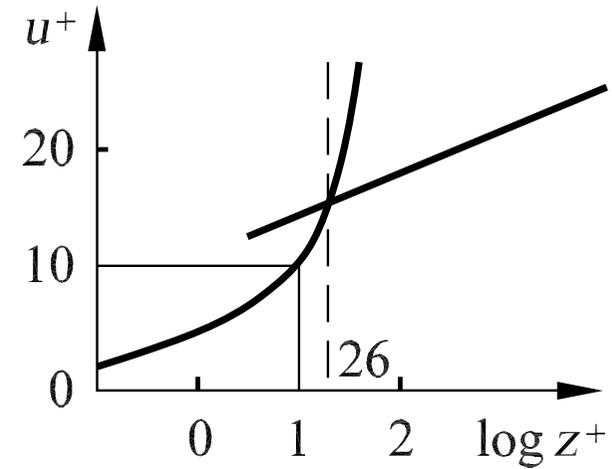
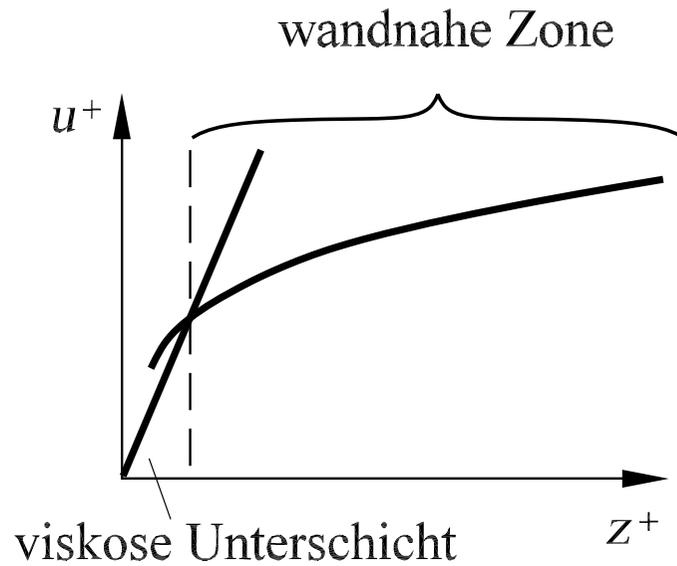
Prandtl'scher Mischungsweg



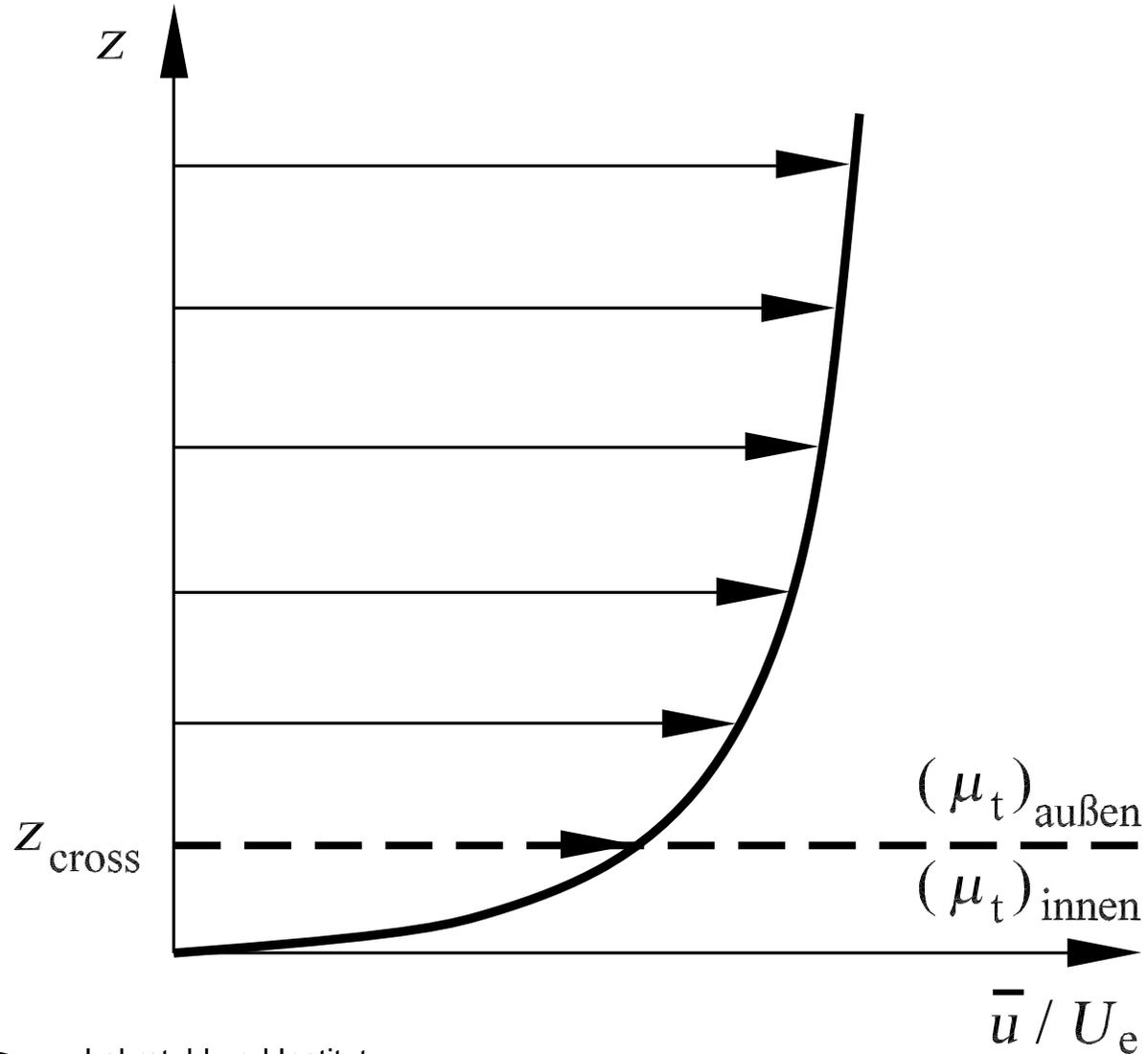
Turbulenzgradverteilung in Wandnähe



Geschwindigkeitsprofil in Wandnähe

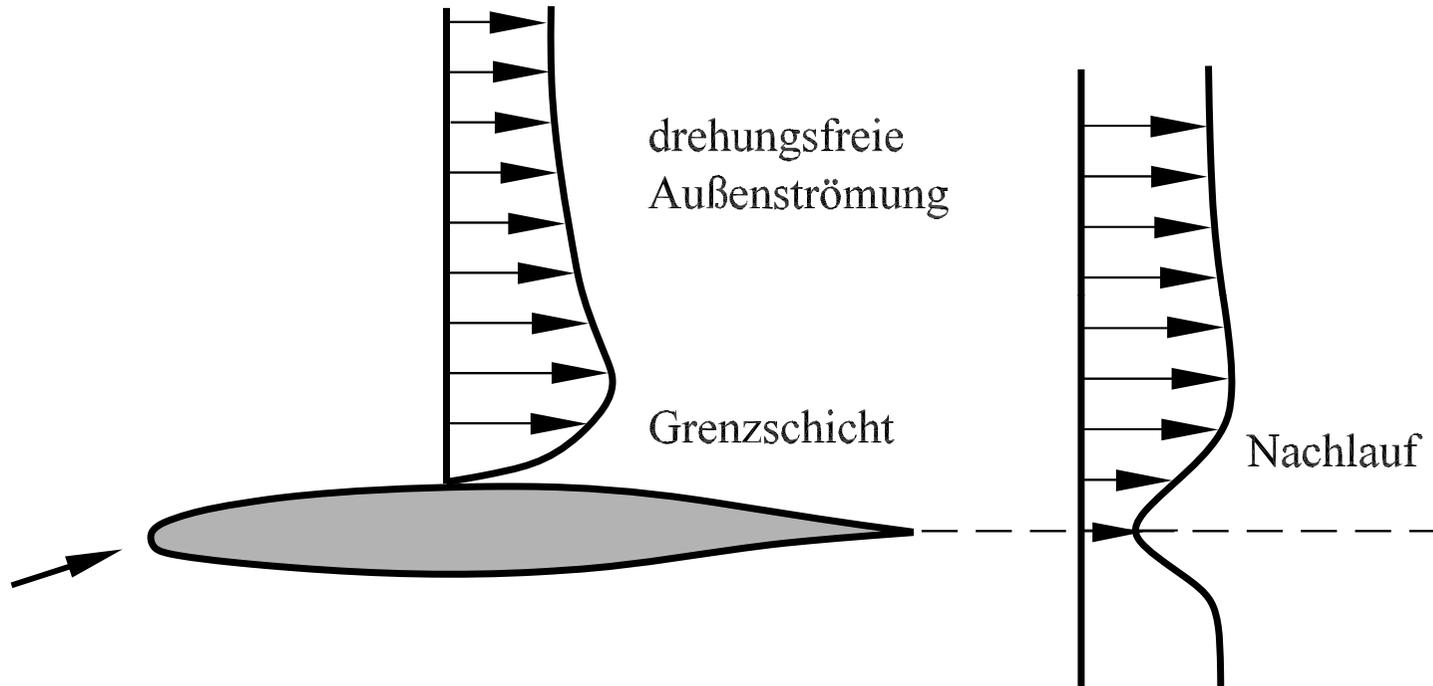


Baldwin – Lomax Turbulenzmodell



Turbulenz

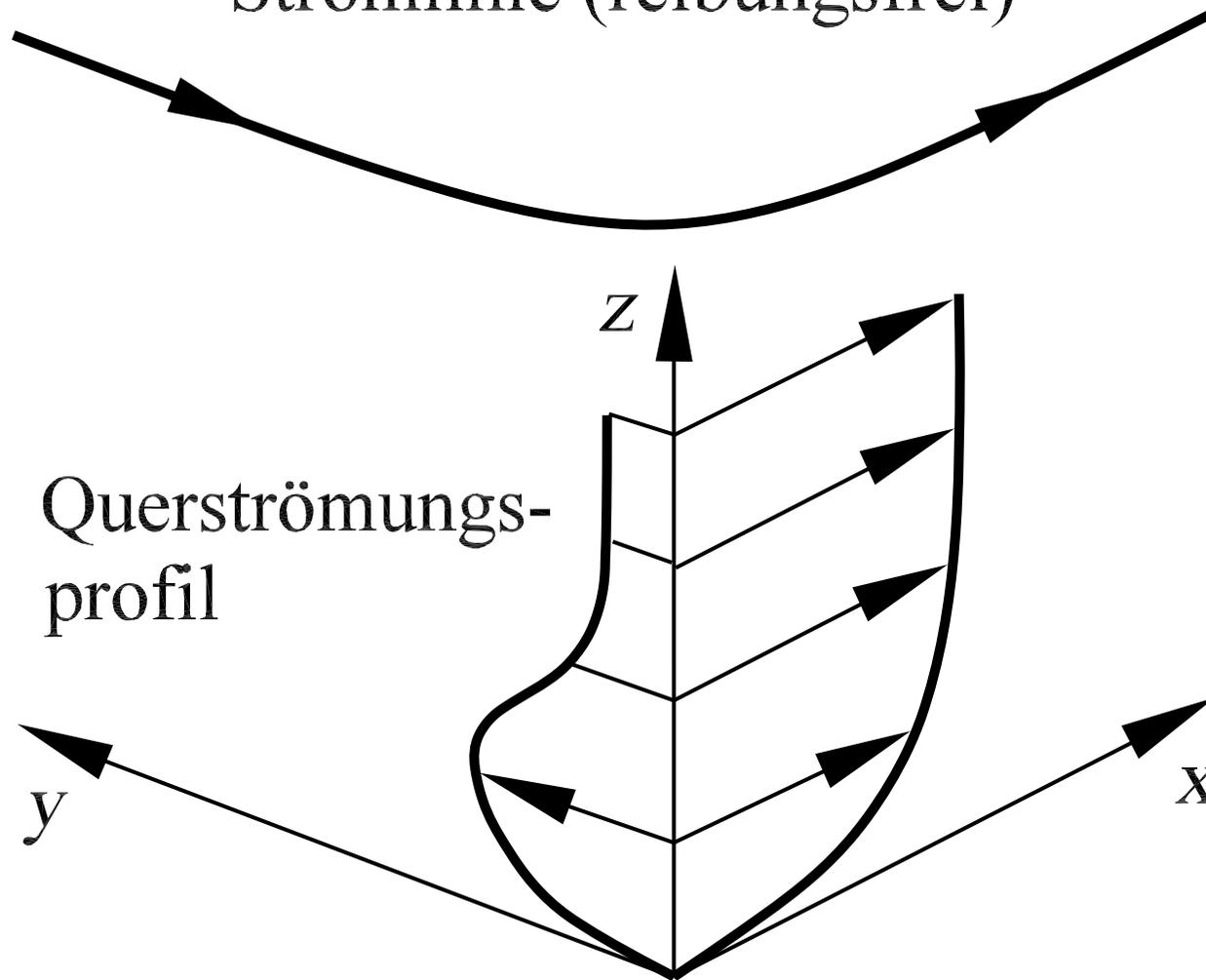
Profilumströmung



Turbulenz

Dreidimensionales Grenzschichtprofil

Stromlinie (reibungsfrei)

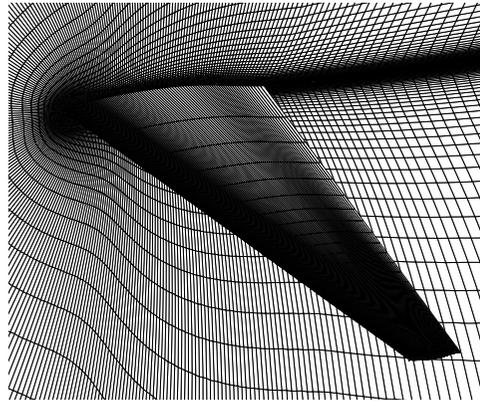


Querströmungs-
profil

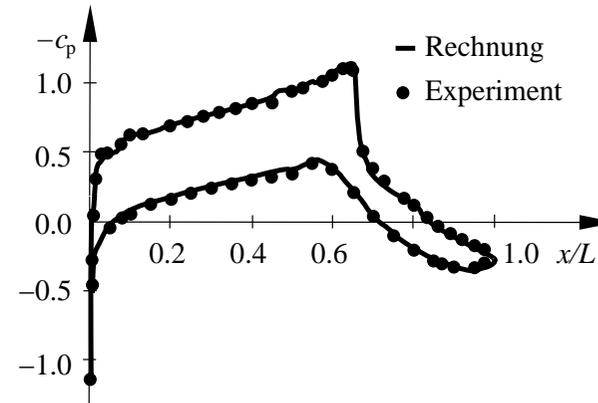


Turbulenz

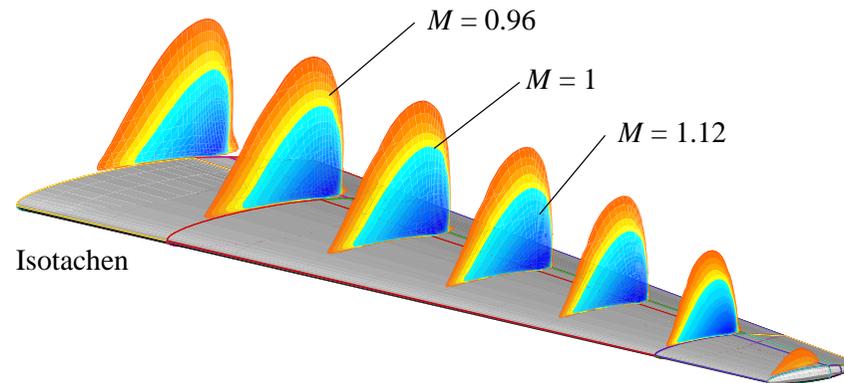
Tragflügelumströmung



Finite-Volumen-Netz, $8 \cdot 10^5$ Gitterpunkte



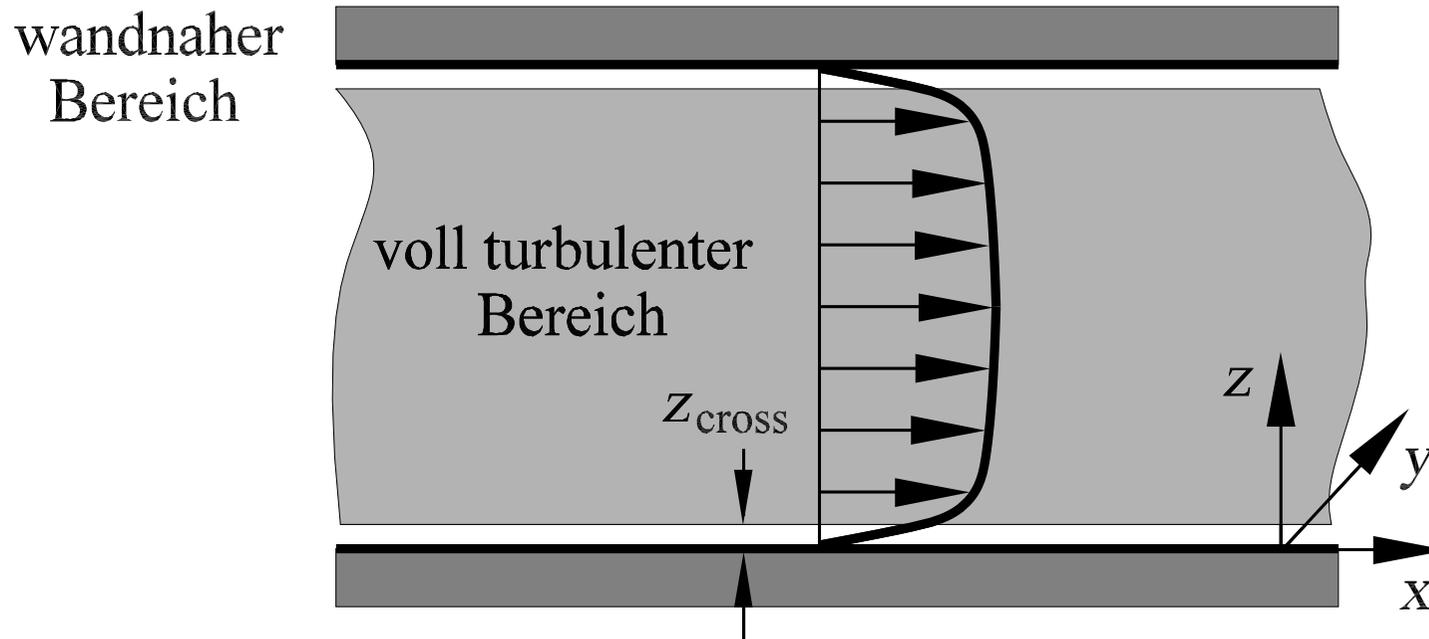
Druckverteilung



$M_\infty = 0.78$, $Re_L = 26.6 \cdot 10^6$, Anstellwinkel $\alpha = 2^\circ$, Pfeilwinkel $\phi = 20^\circ$

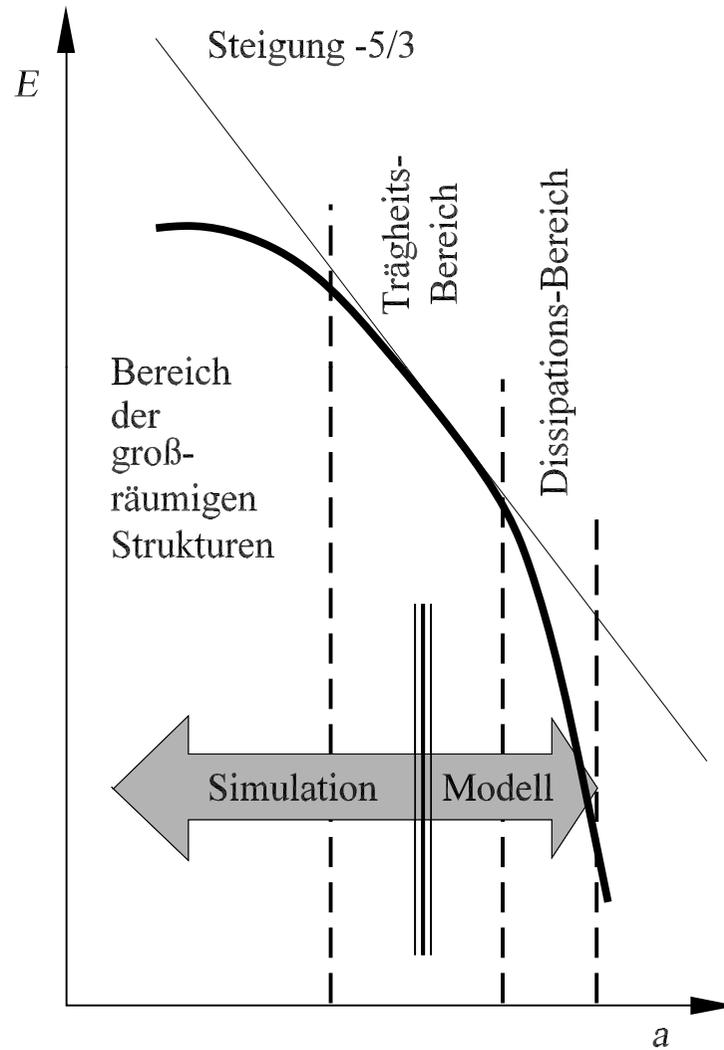


Bereichseinteilung der turbulenten Innenströmung

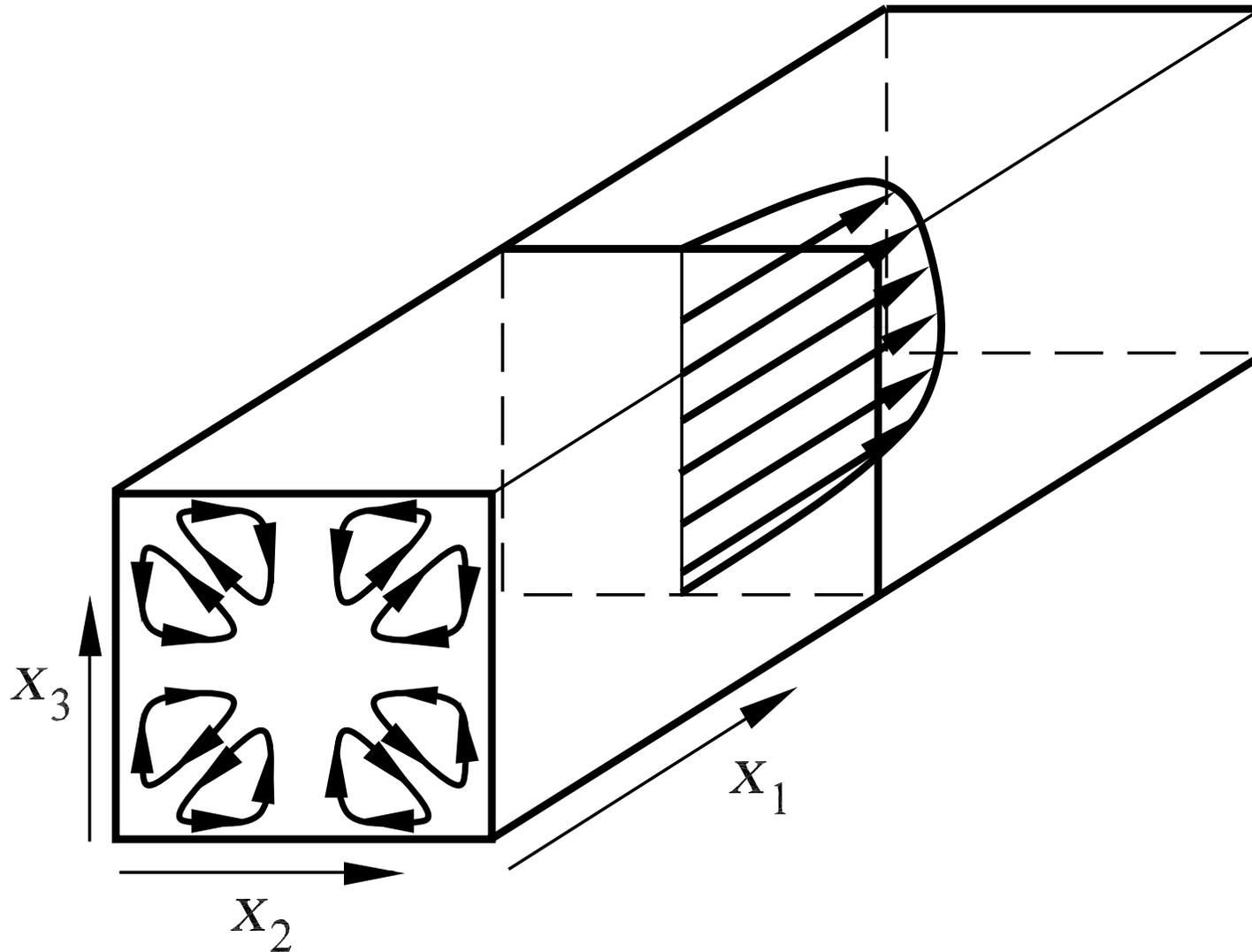


Turbulenz

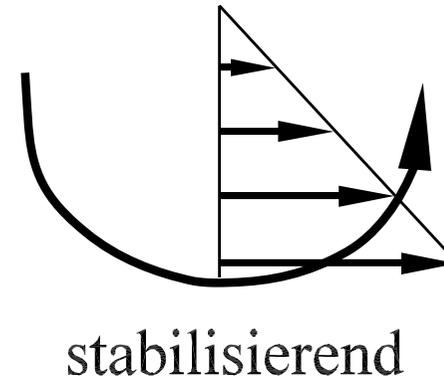
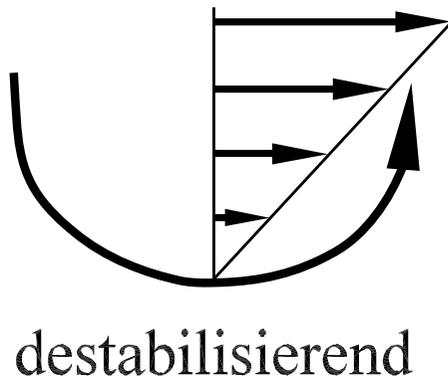
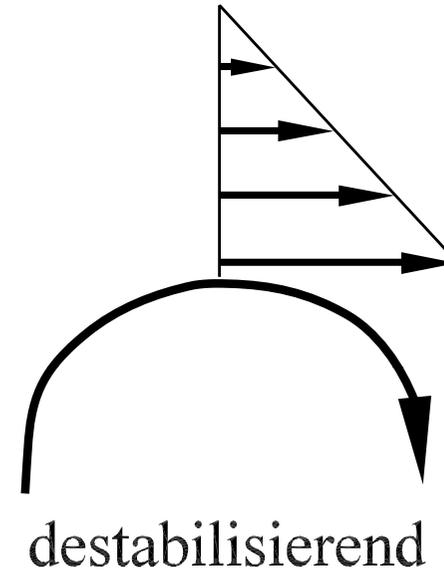
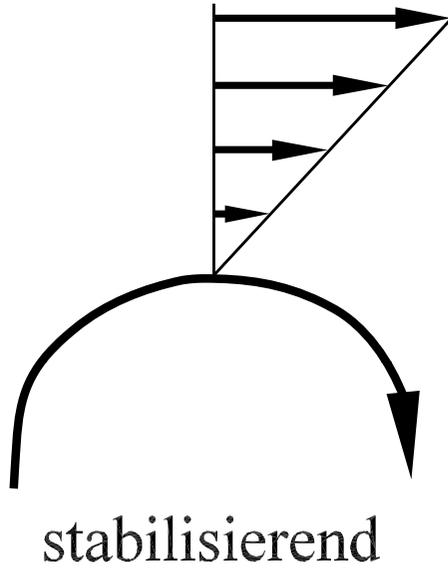
Energiespektrum der Turbulenz



Ausgebildete Strömung im Quadratischen Rohr

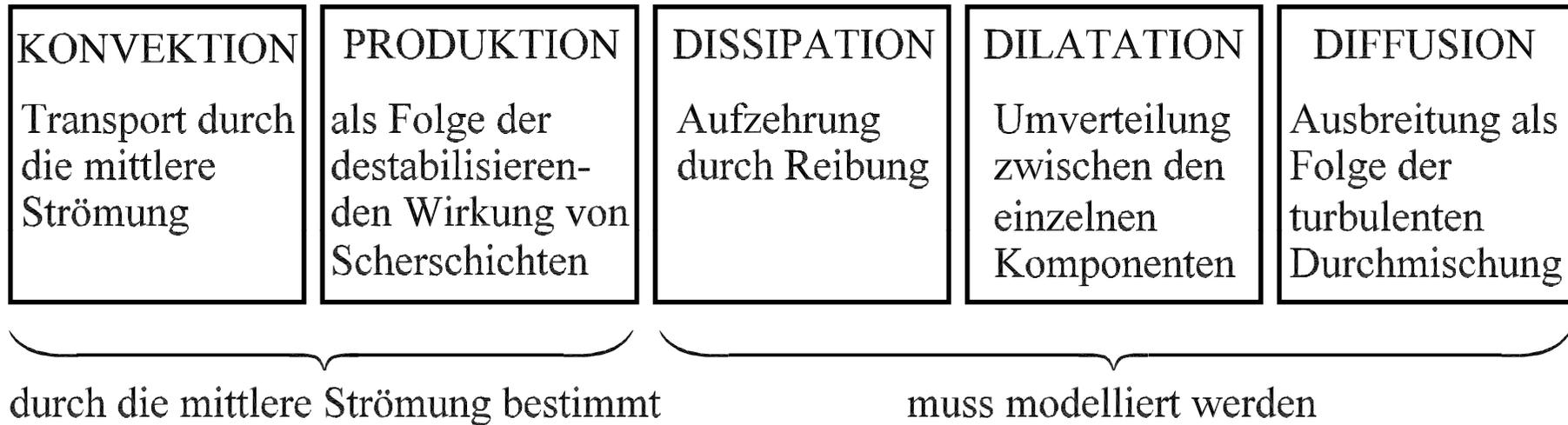


Stabilisierende und destabilisierende Wirkung der Stromlinienkrümmung



Turbulenz

Interpretation der Transportgleichungen für die Reynolds- Spannungen



Turbulenz

Standard K – ϵ - Modell mit Wandfunktion und Niedrig-Reynolds-Zahl K- ϵ -Modell mit Auflösung der wandnahen Zone

