

Strömungen in der Technik

Film: Abhebender BMW, Petit Le Mans

Film: Abhebender Mercedes, Le Mans

Film: Abhebender Porsche, Petit Le Mans

Tacoma-Brücke

Film: Tacoma-Brücke

Schornstein

Zweiphasenströmung

g
Produktionsanlage in Verfahrenstechnik

Nasskühlturm

Kavitation an Unterwasserprofil

Dampfabscheider

Anlagen-Fließschema Gasfraktionierung

Prinzipskizze Flüssigkeits-Dampfabscheider, p-h-Diagramm

Strömungsbereiche Zweiphasenströmung

Reibung

Couette-Strömung

Schubspannung Newtonsch,
Nicht-Newtonsch

Oberflächenspannung

Film: Oberflächenspannung



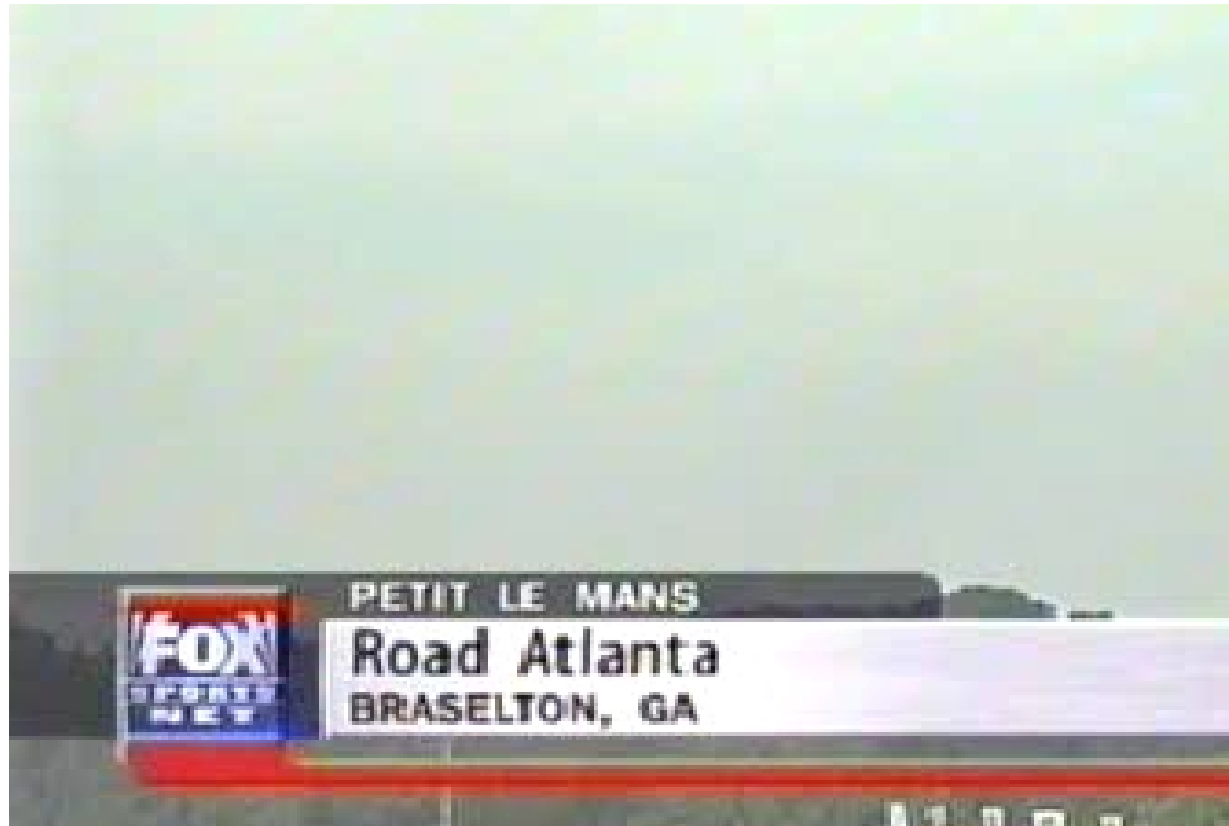
Film: Abhebender BMW V12 LMR beim Rennen in Petit LeMans 2000



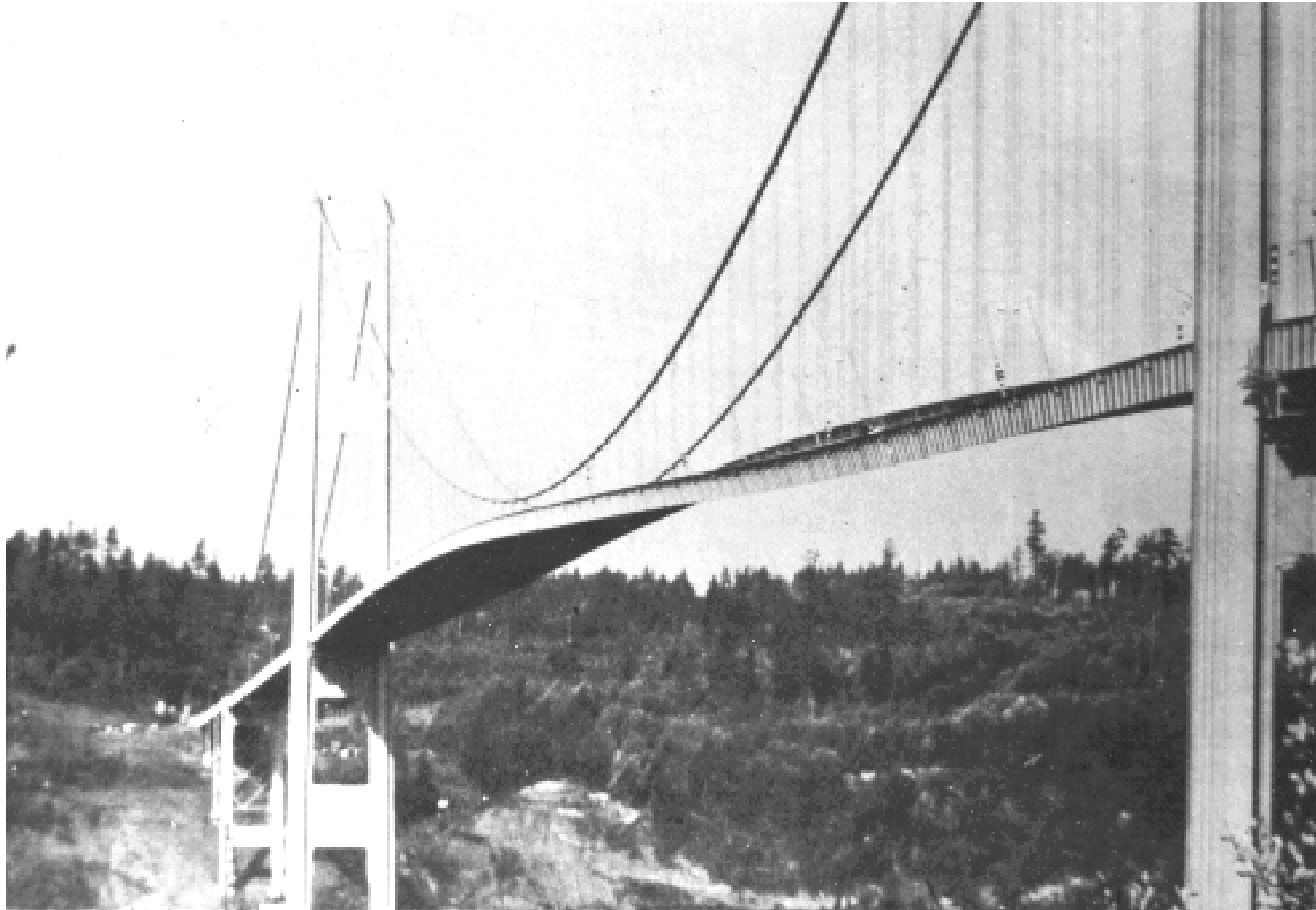
Film: Abhebender Mercedes CLR beim Rennen in Le Mans 1999



Film: Abhebender Porsche 911 GT1 beim Rennen in Petit LeMans 1998



Aerodynamische Schwingungsanregung der Tacoma-Brücke



Film: Tacoma-Brücke

Tacoma, Ohio / USA



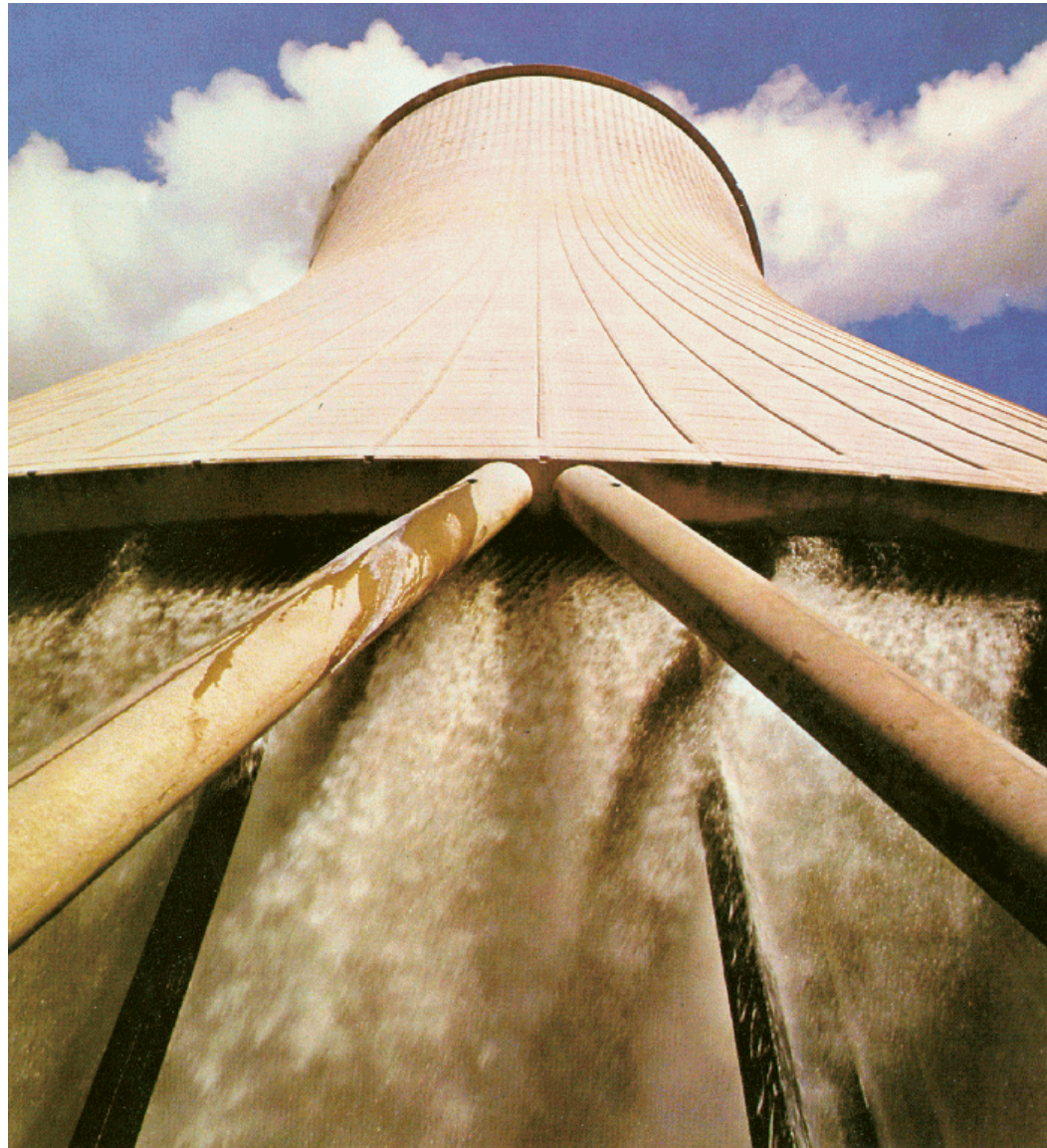
Schornstein



Produktionsanlage in der chemischen Verfahrenstechnik



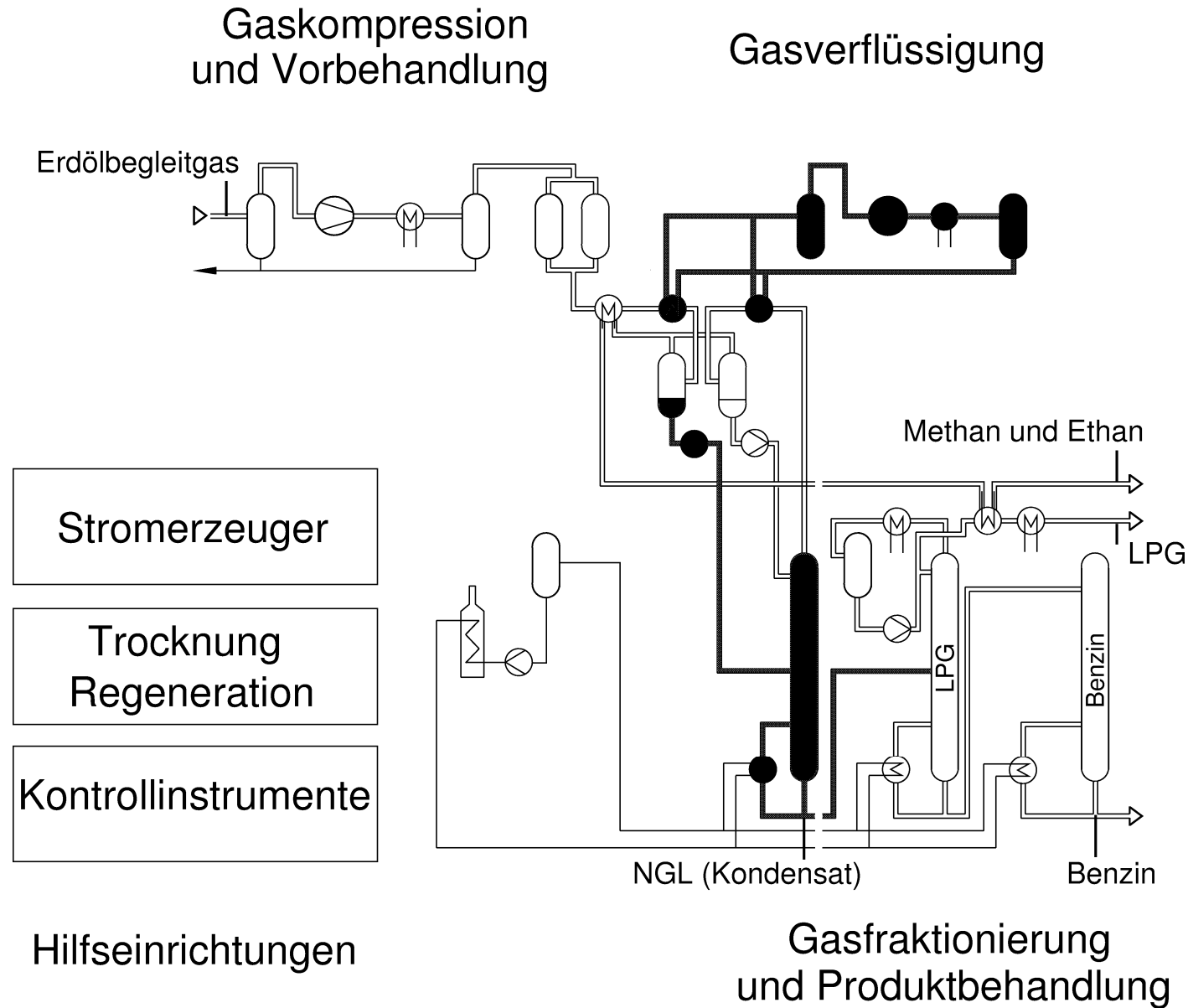
Nasskühlturm



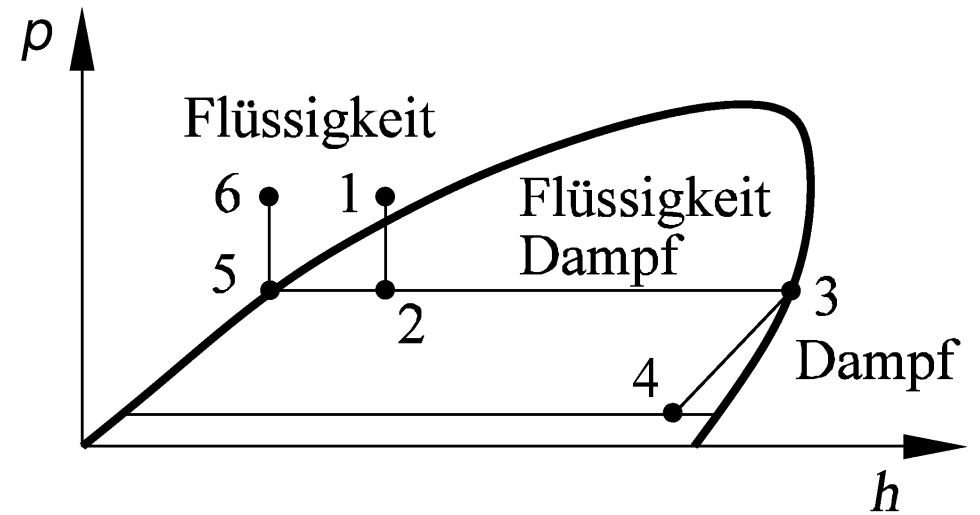
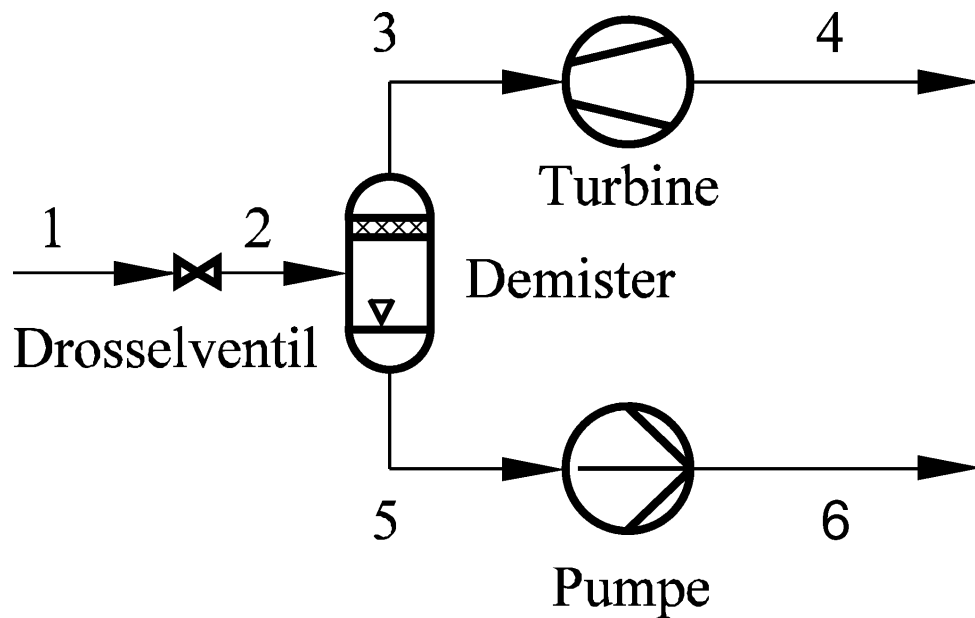
Kavitation an einem Unterwasserprofil



Anlagenfließschema bei der Gasfraktionierung von Erdölbegleitgas

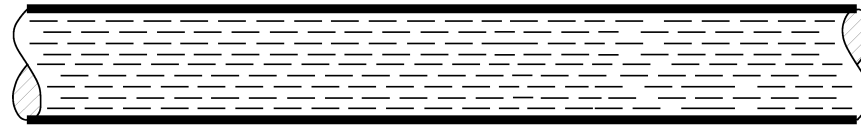


Prinzipskizze und p-h-Diagramm eines Flüssigkeits-Dampfabscheiders



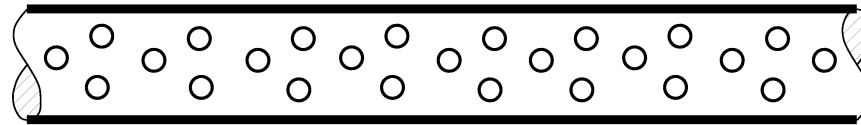
Strömungsbereiche einer Zweiphasenströmung

Flüssigkeitsströmung



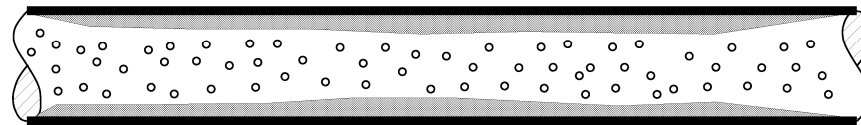
$$X = 0$$

Blasenströmung



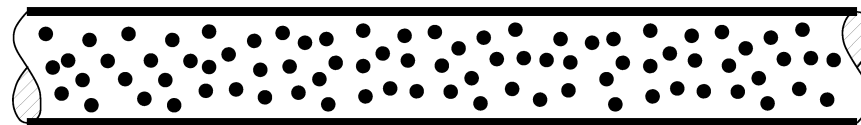
$$X \ll 1$$

Ring-Tröpfchenströmung



$$1 > X \gg 0$$

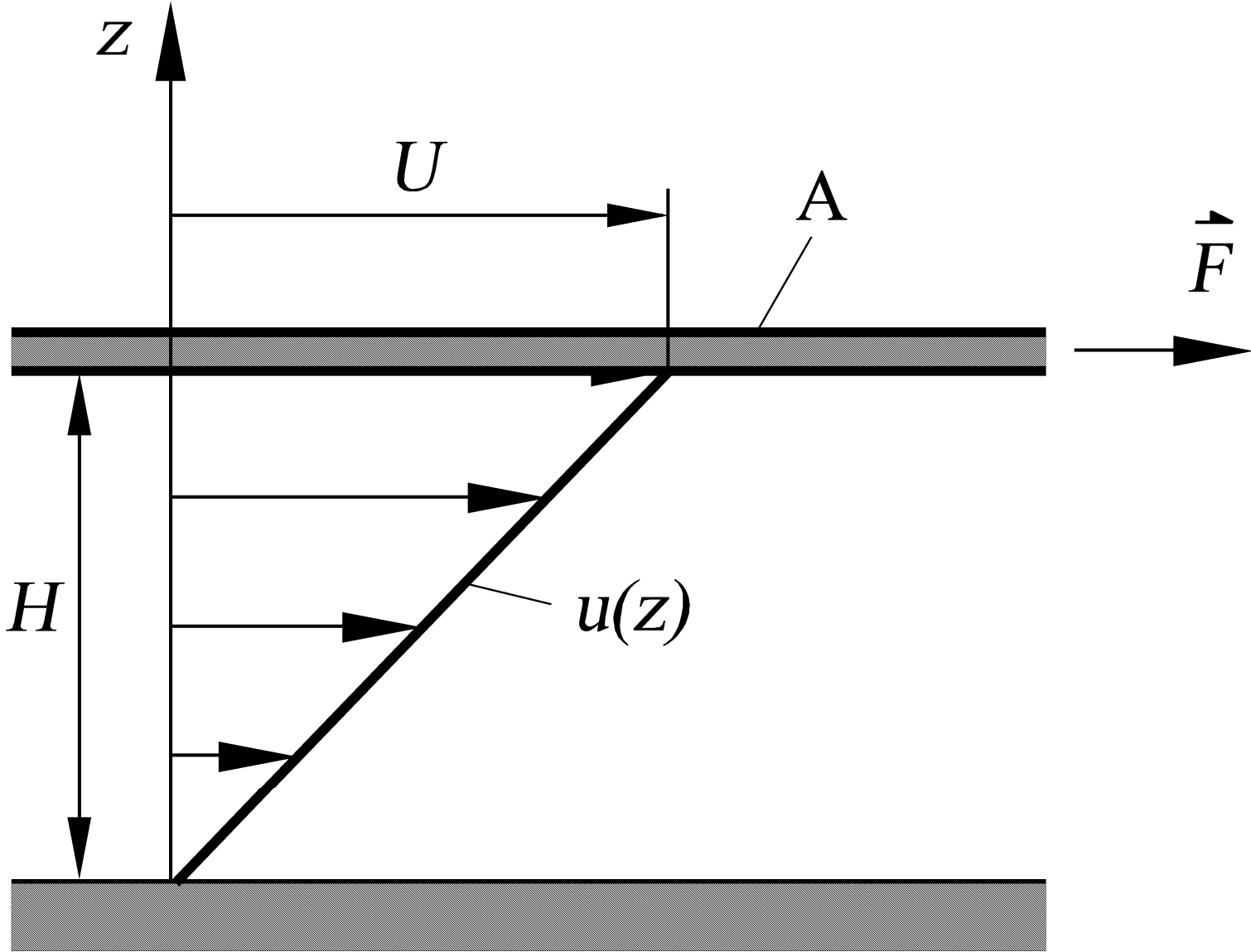
Dampfströmung



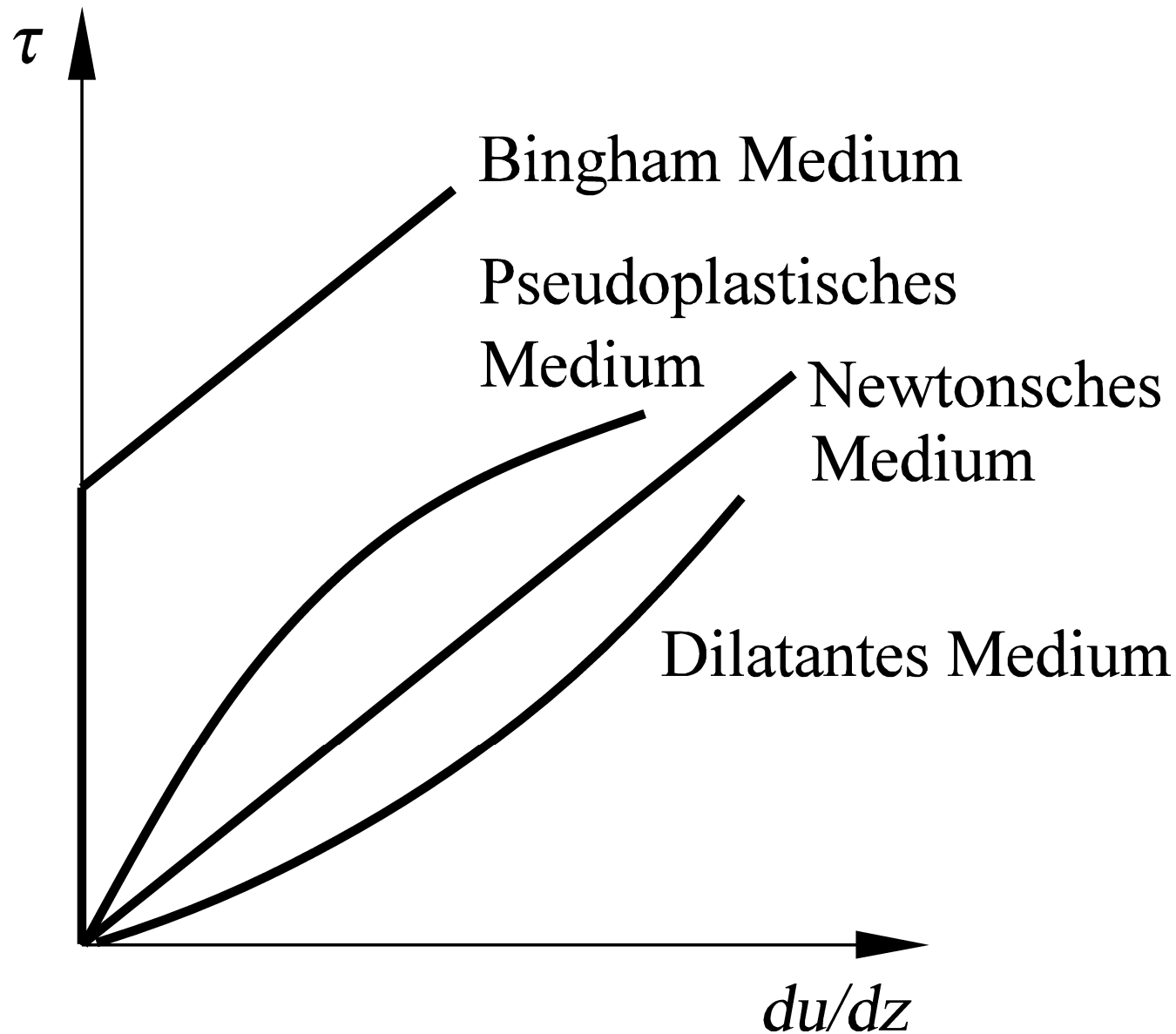
$$X = 1$$



Couette-Strömung, Definition der Schubspannung τ



Schubspannung τ für Newtonsche und nicht-Newtonsche Fluide



Film: Oberflächenspannung



Hydrostatik

Druckverlauf im Schwerfeld

Prinzipskizze Auftriebskraft

Druck in rotierender Flüssigkeit

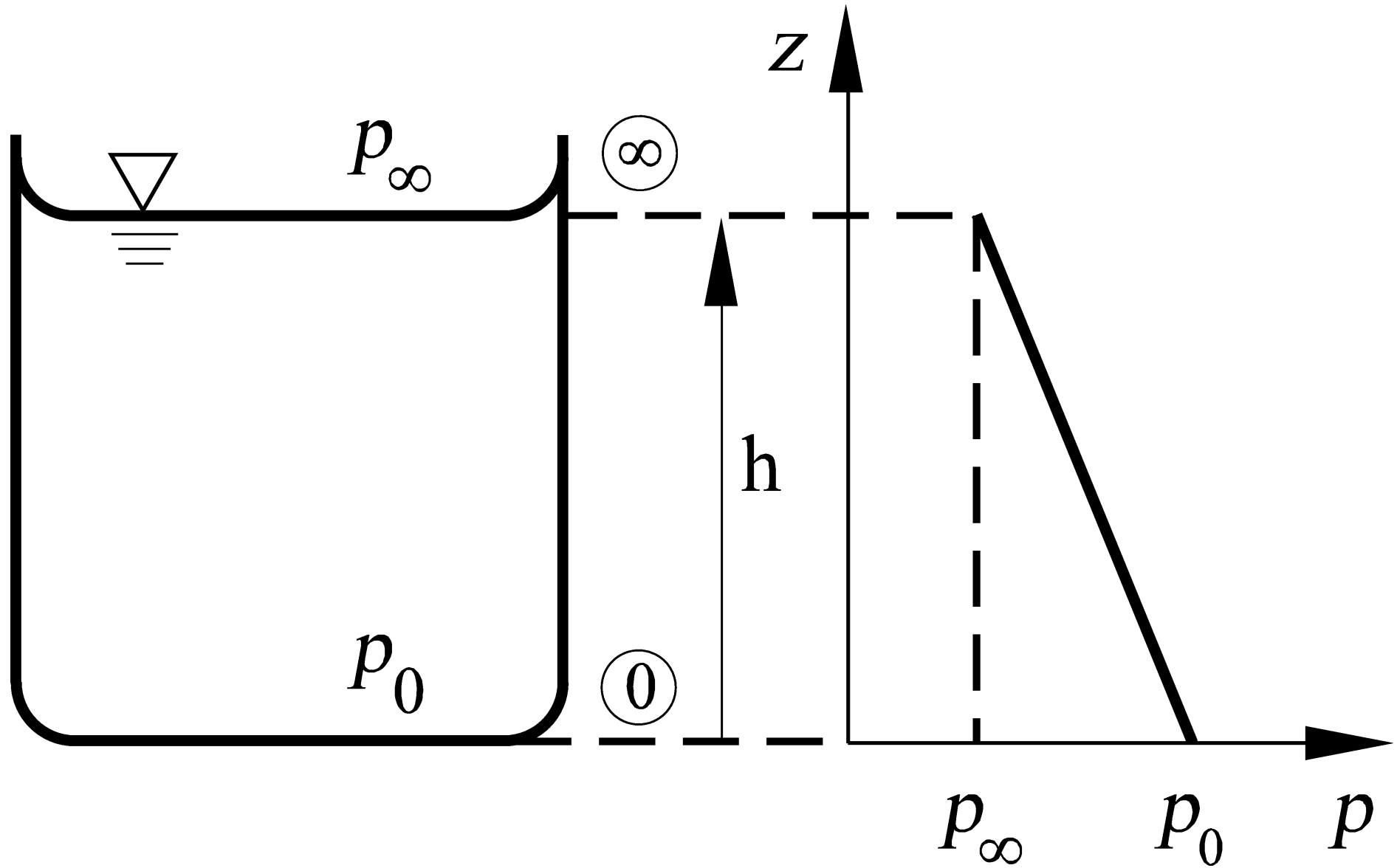
Aerostatik

US-Standardatmosphäre

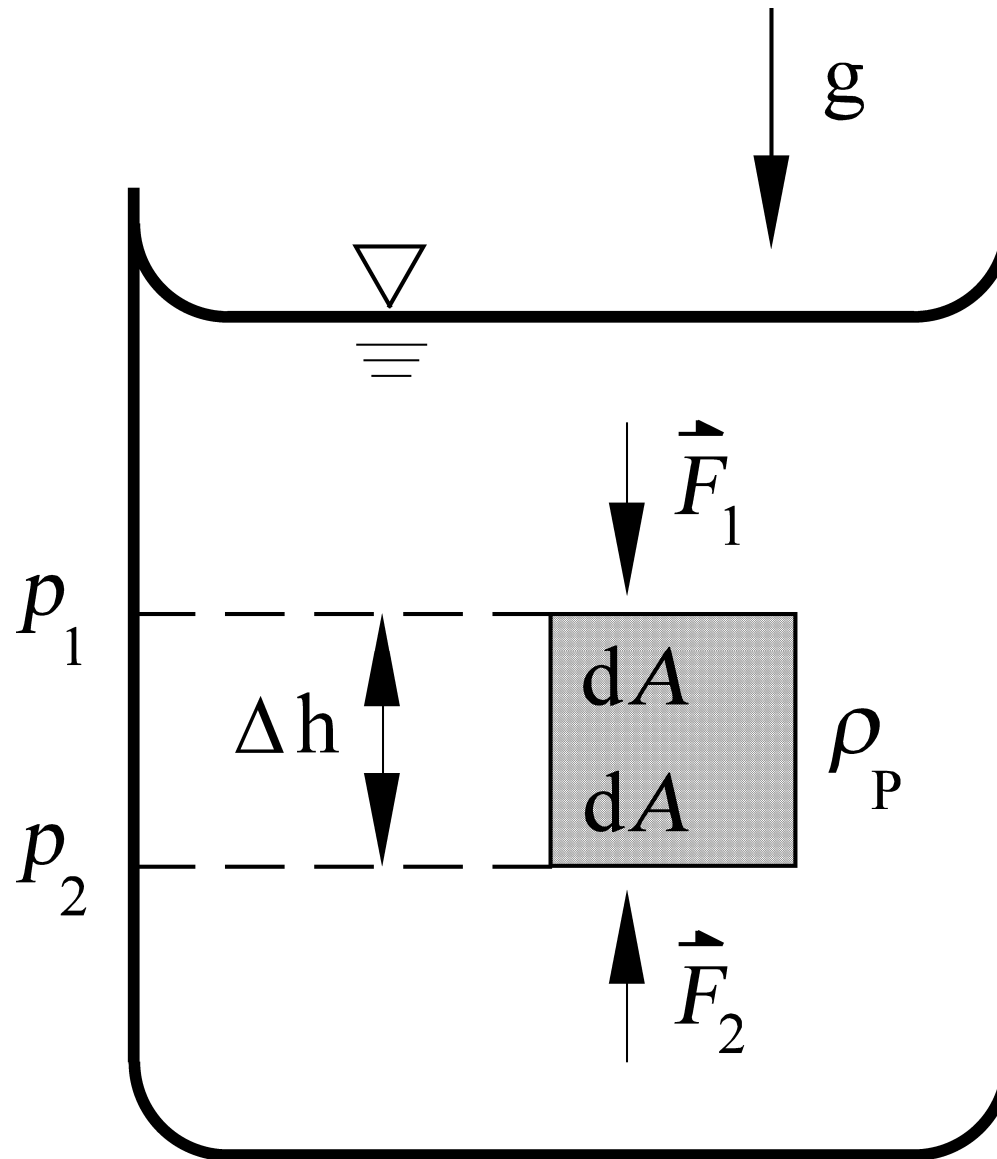
Temperatur- und Druckverteilung
in Standardatmosphäre



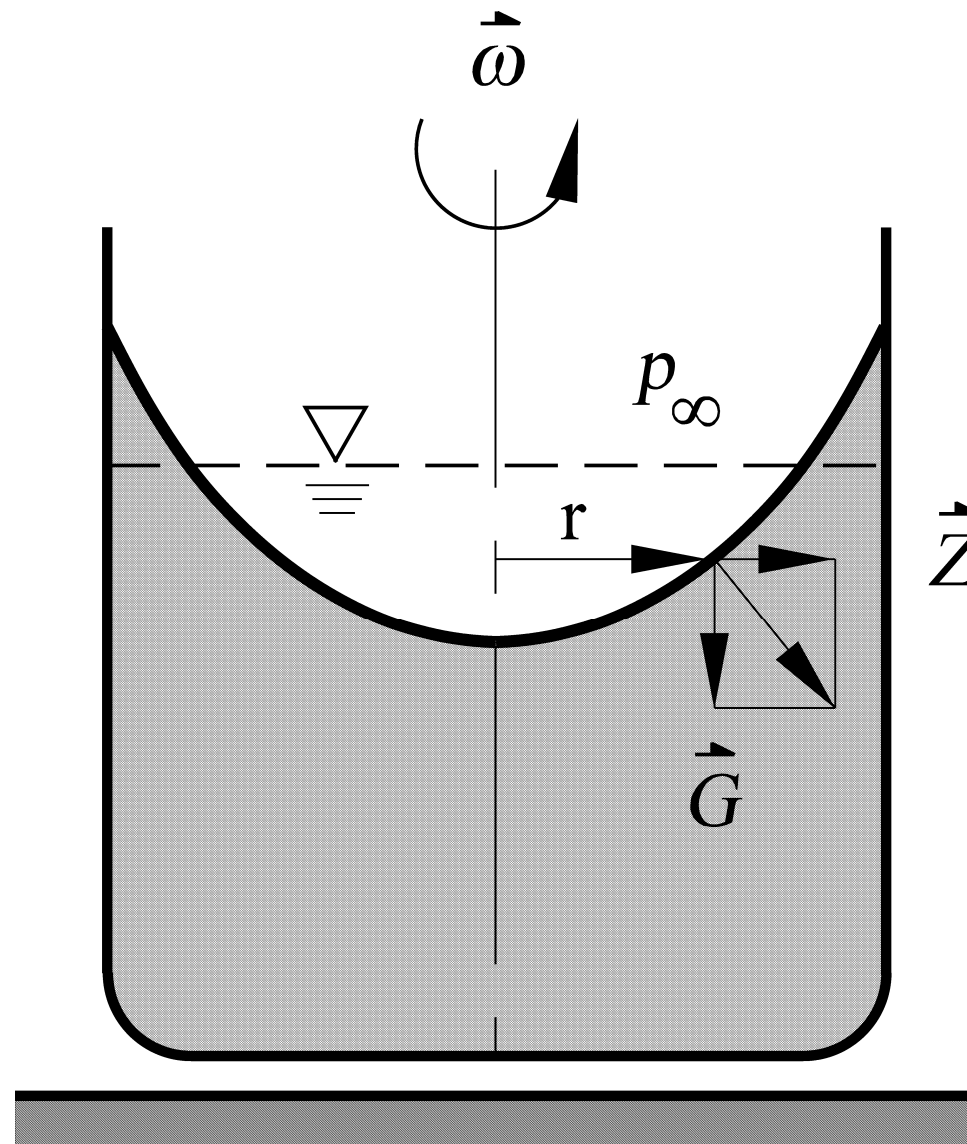
Linearer Druckverlauf im Schwerfeld



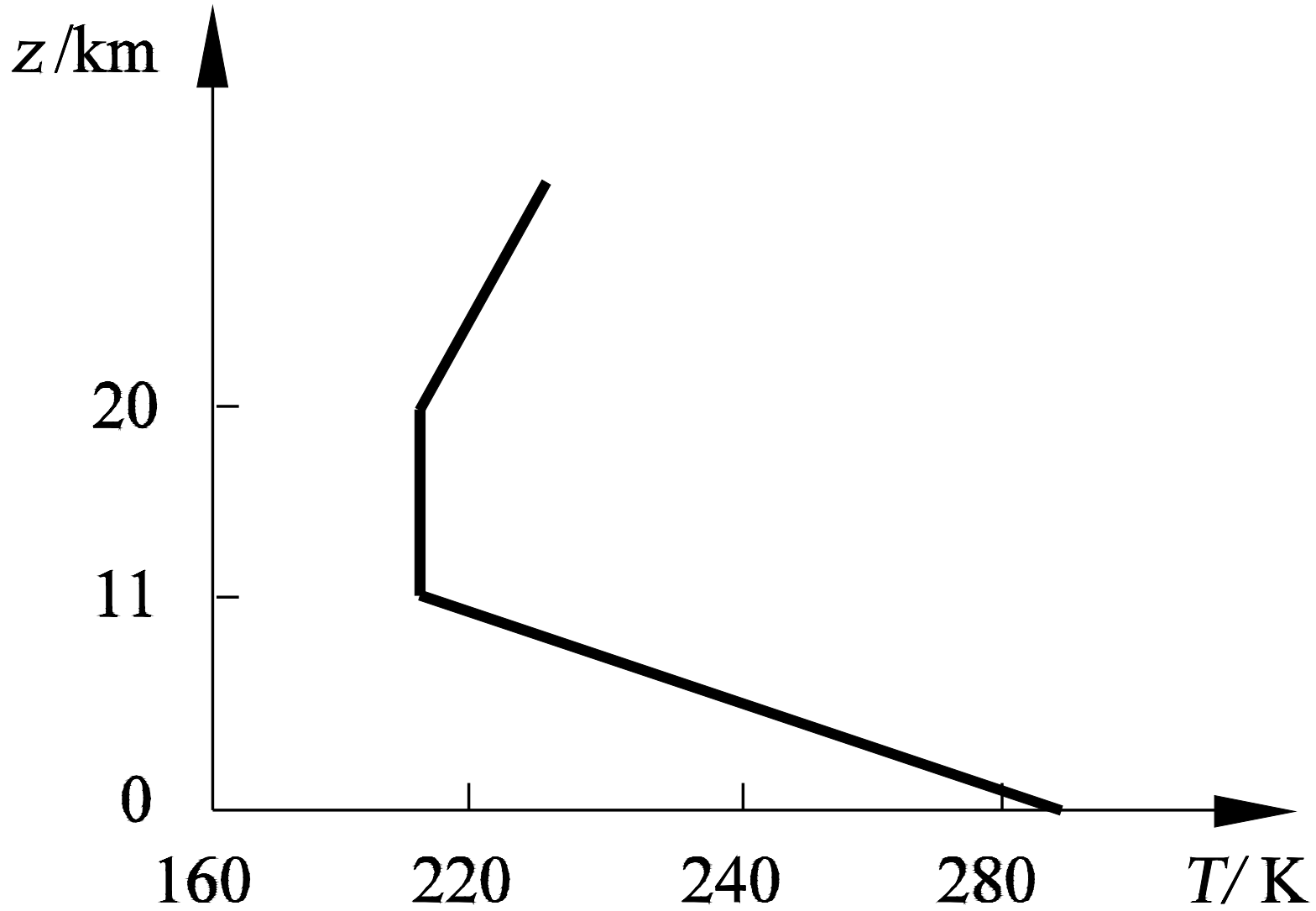
Prinzipskizze zur Auftriebskraft



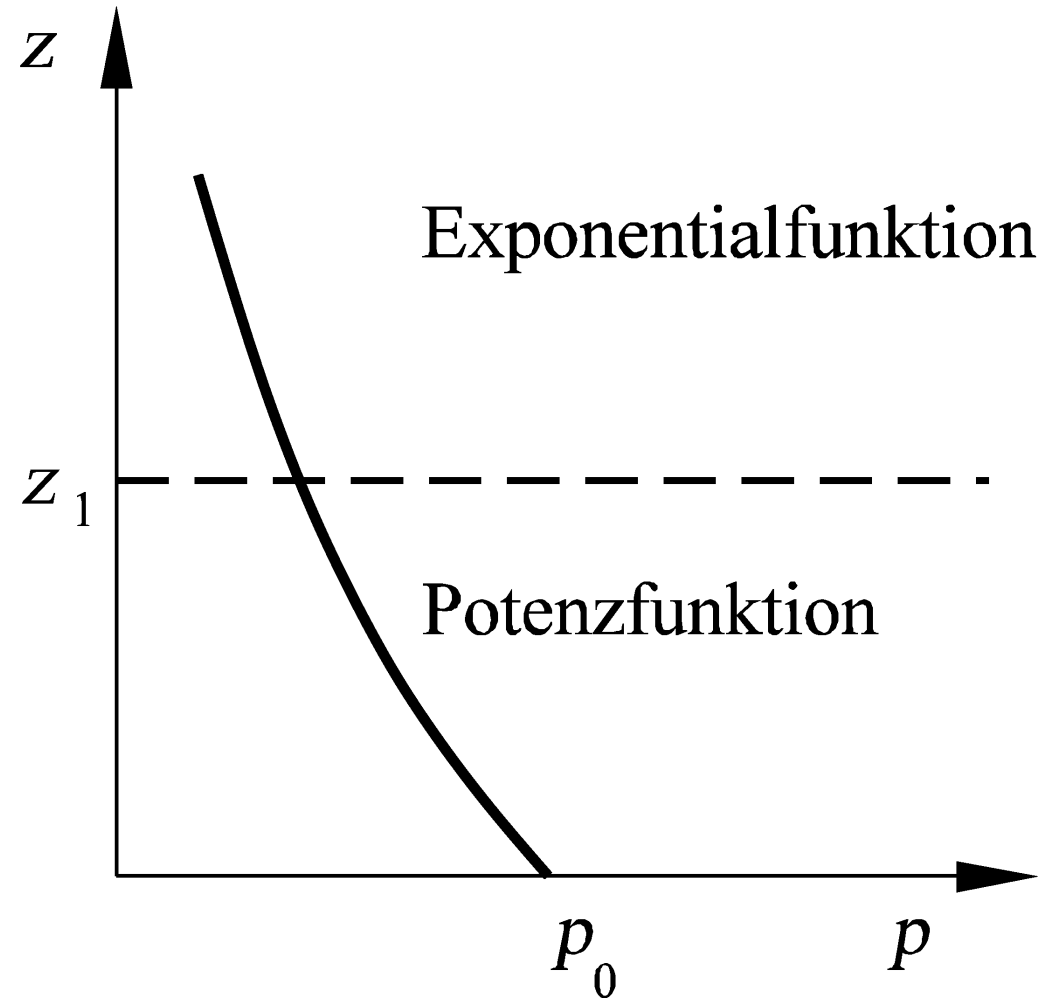
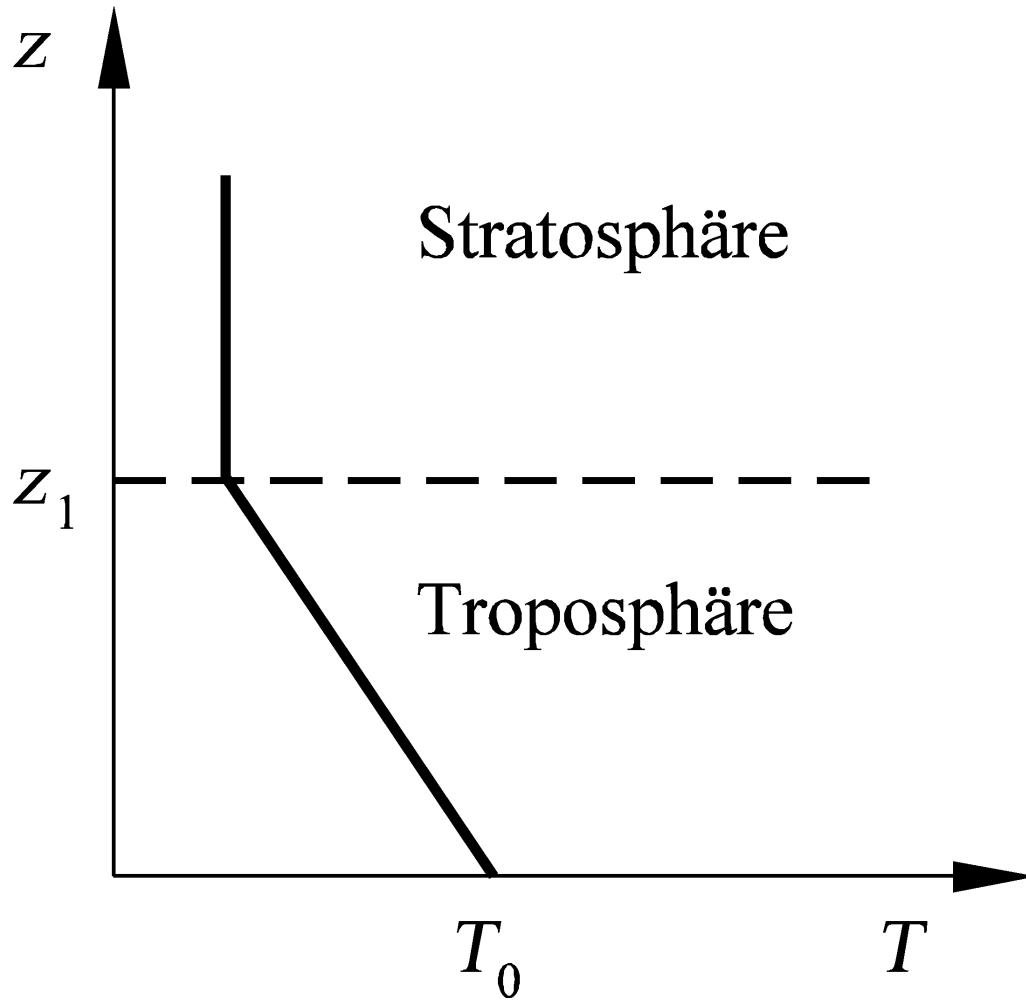
Druck in einer rotierenden Flüssigkeit



Standardisierter Temperaturverlauf (US-Standardatmosphäre)



Temperatur- und Druckverlauf in der Standardatmosphäre



3. Tafelübung Stromlinie, Teilchenbahn, Streichlinie

Kinematik

Stromlinie

Teilchenbahn

Streichlinie

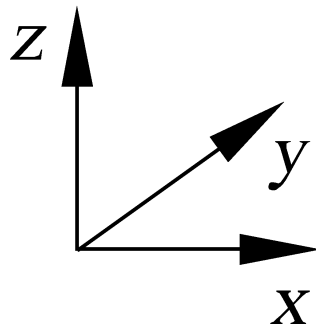
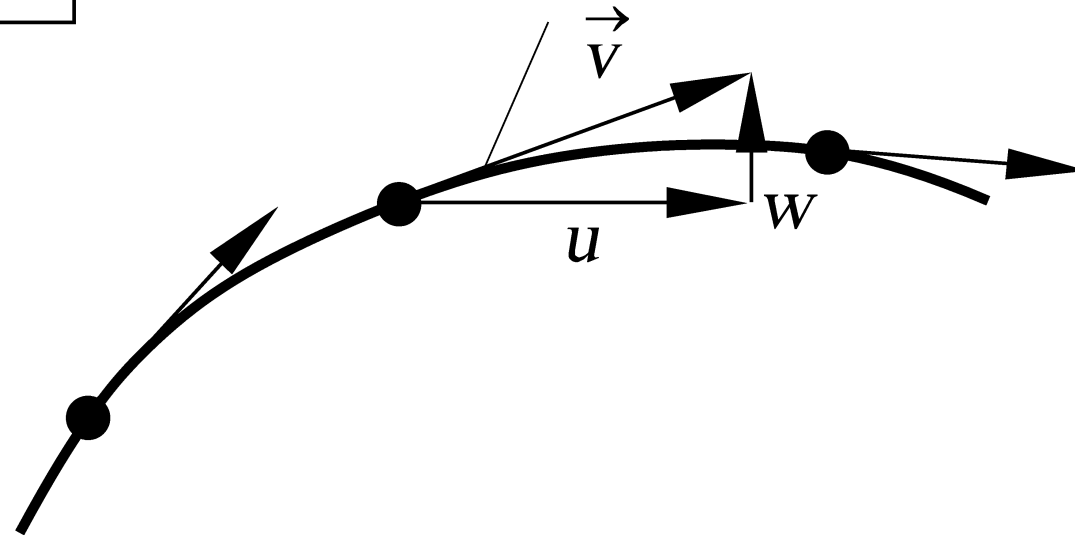
Welle in Grenzschichtströmung



Stromlinie

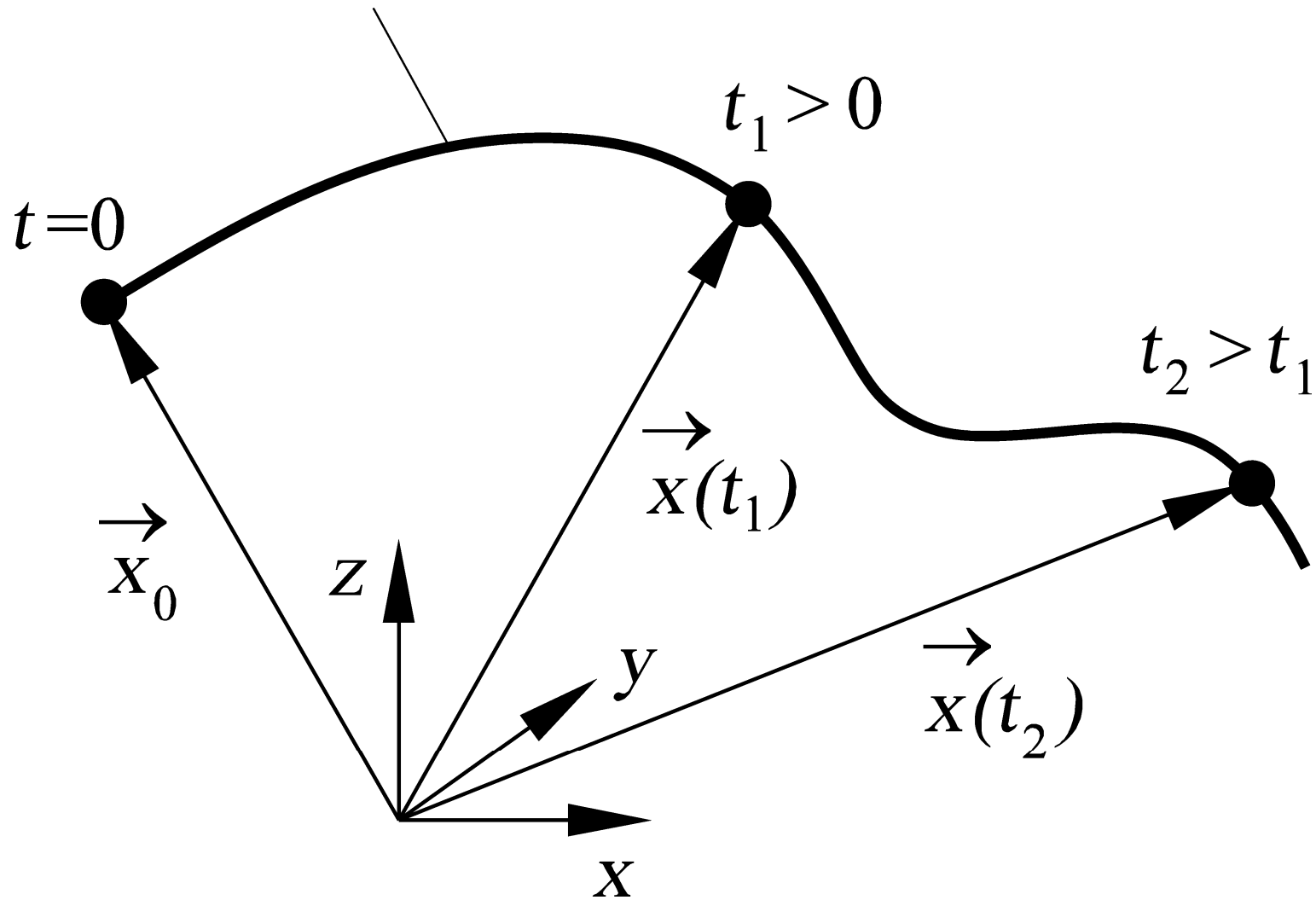
t_n

Stromlinie

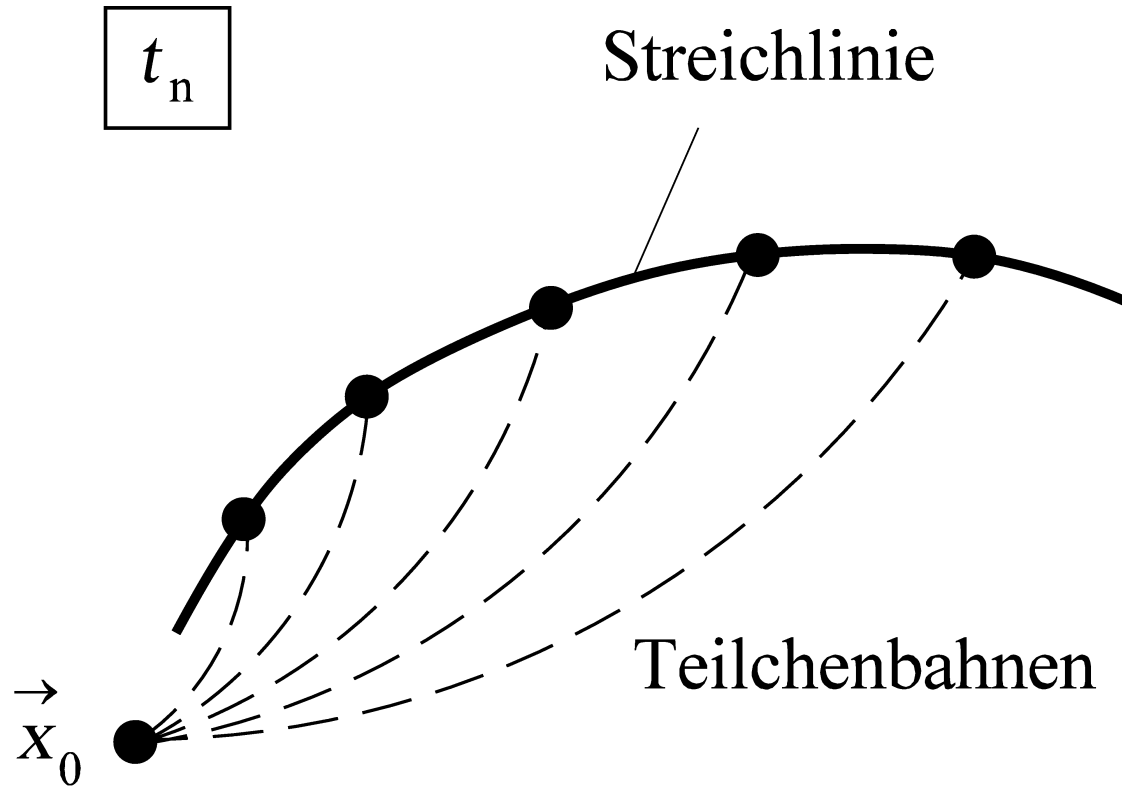


Teilchenbahn

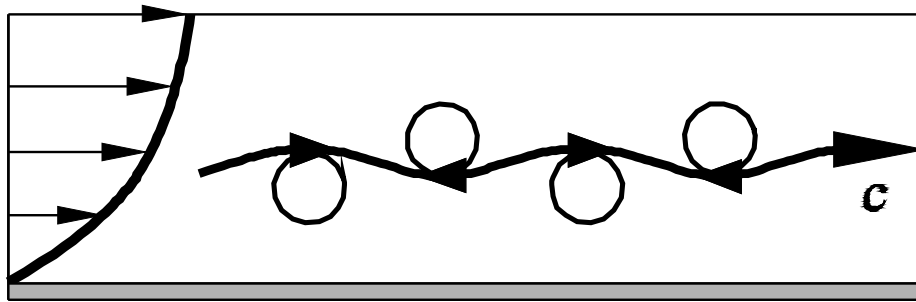
Teilchenbahn



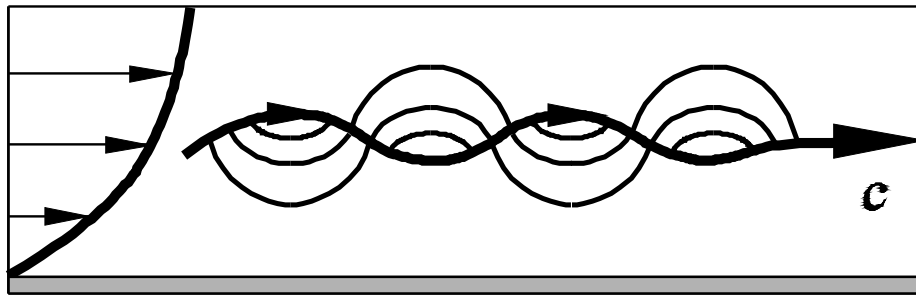
Streichlinie



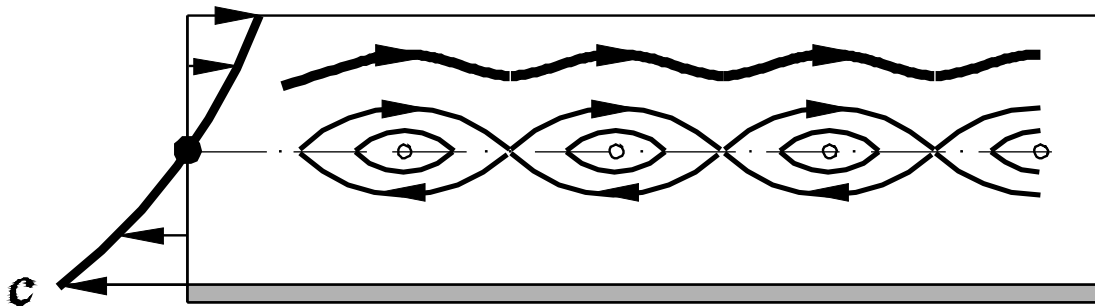
Welle in einer Grenzschicht



Teilchenbahnen
ruhender Beobachter



Stromlinie
ruhender Beobachter



Stromlinie
mit der Welle
mitbewegter Beobachter



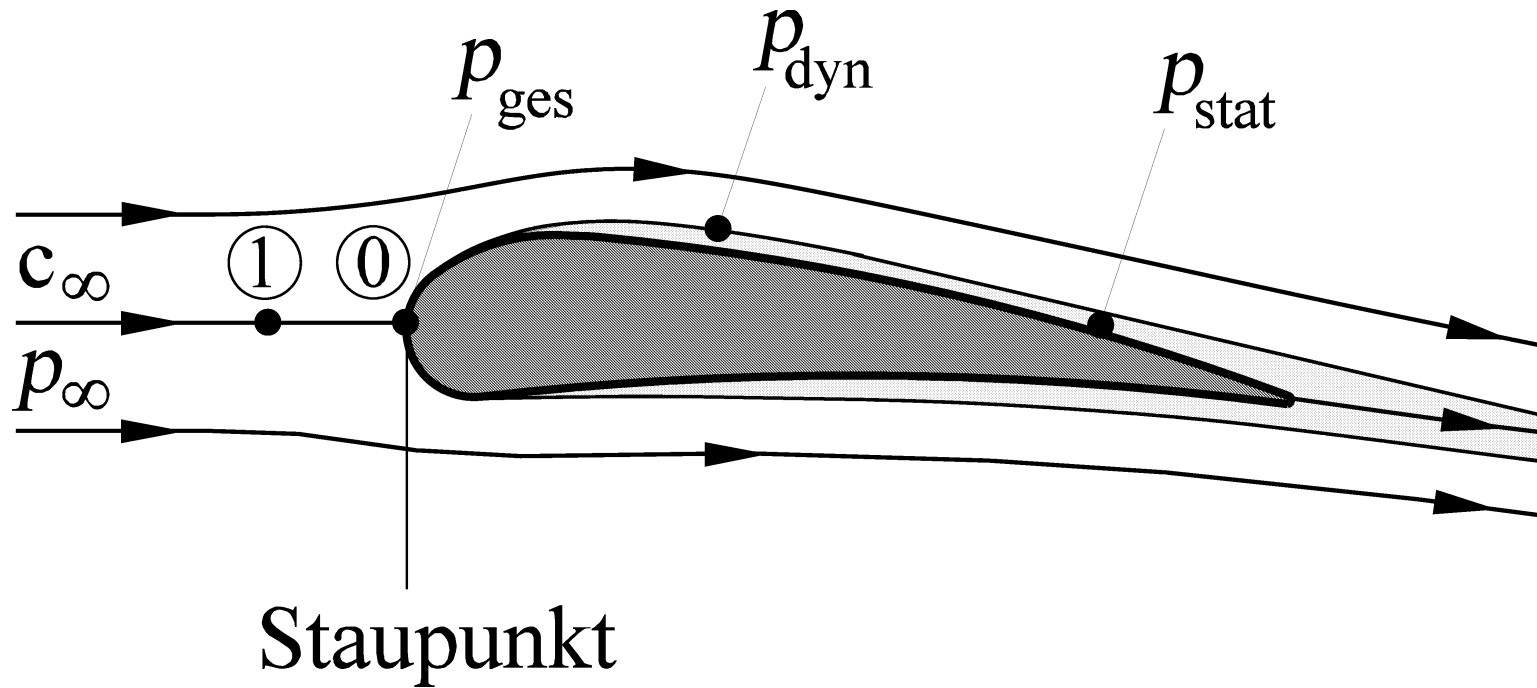
4. Tafelübung stationäre und instationäre Bernoulli-Gl., Freistrahlabed.

Bernoulli-Gleichung

Druckbegriffe bei Tragflügelumströmung



Druckbegriffe bei der Tragflügelumströmung



Druckmessung

Verschiedene Druckbegriffe

Messung statischer Druck

Druckmessbohrungen am Tragflügelmodell

Messung der Drücke

Prandtl-Staurohr

Kräfte senkrecht zum Stromfaden

Kräftebilanz senkrecht zum Stromfaden

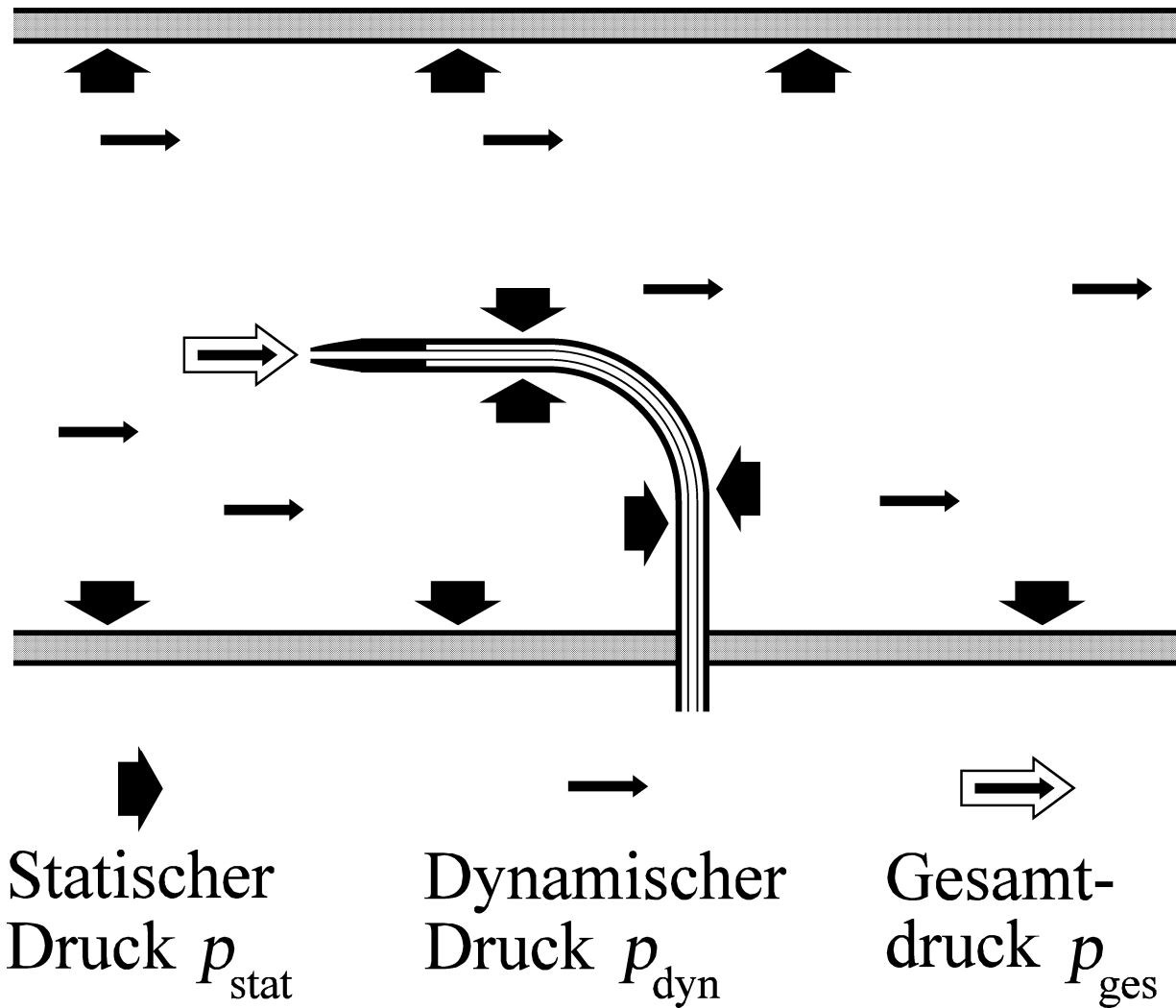
Strömungen in Tornado

Druck- und Geschwindigkeit
beim Potentialwirbel

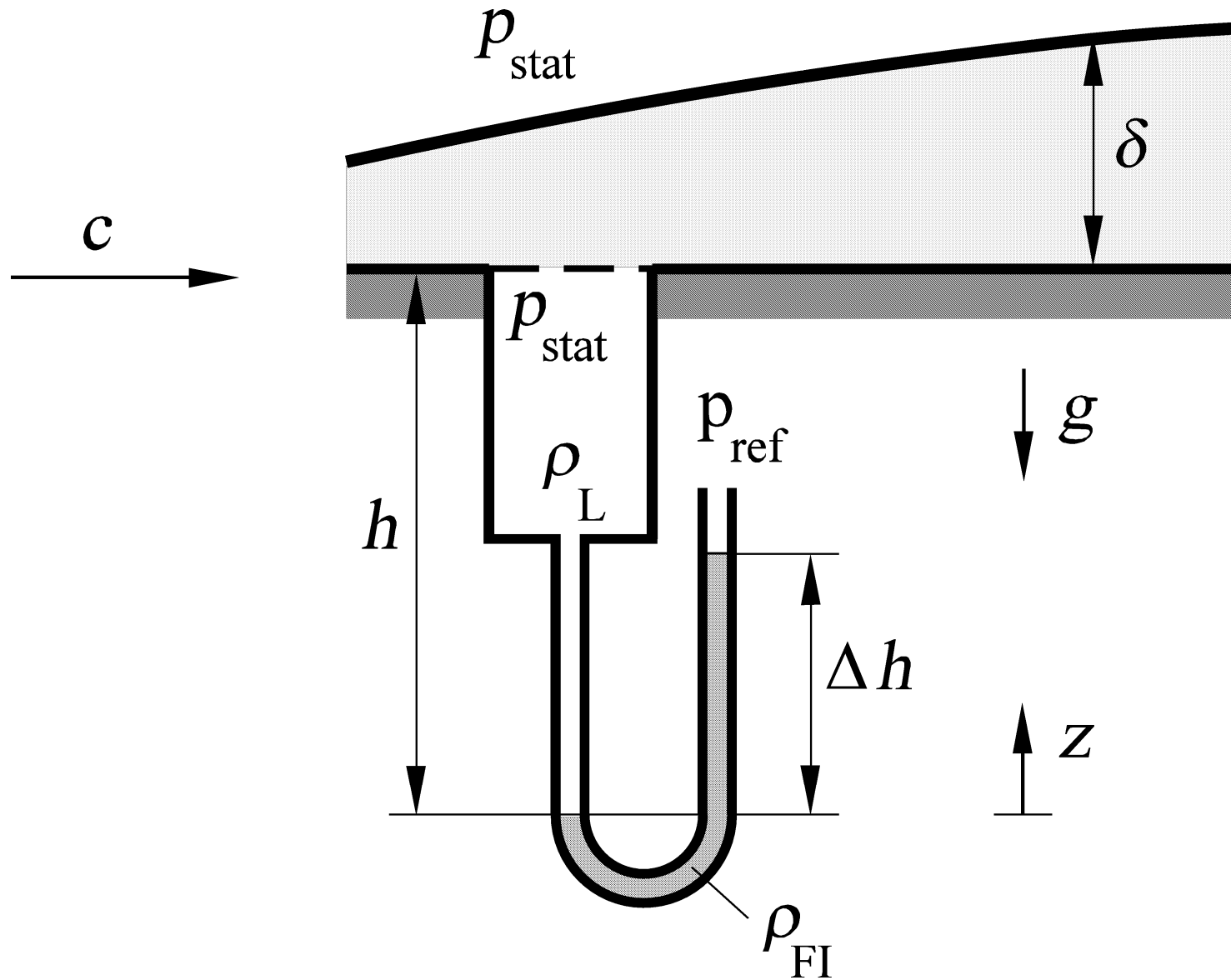
Experiment: Magnus-Kraft



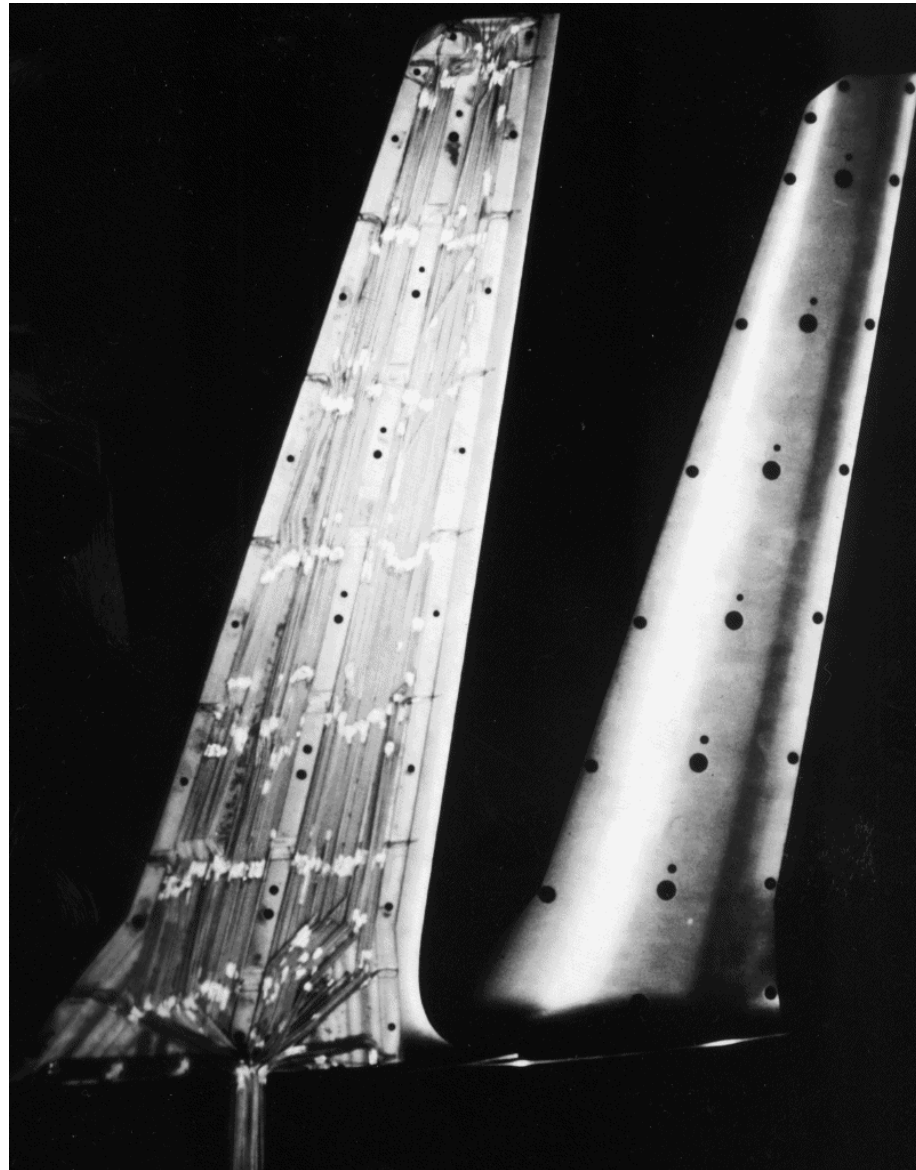
Die verschiedenen Druckbegriffe stat. Druck, dyn. Druck, Gesamtdruck



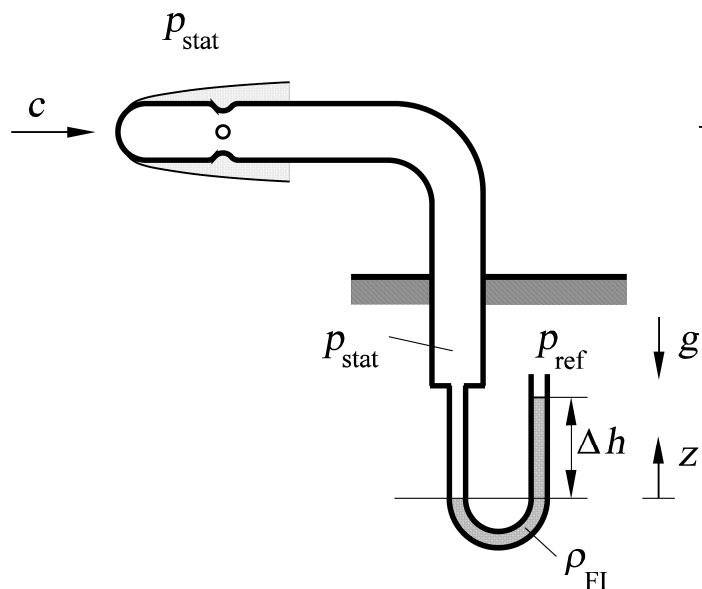
Messung des statischen Druckes p_{stat}



Statische Druckmessbohrungen in einem Tragflügelmodell



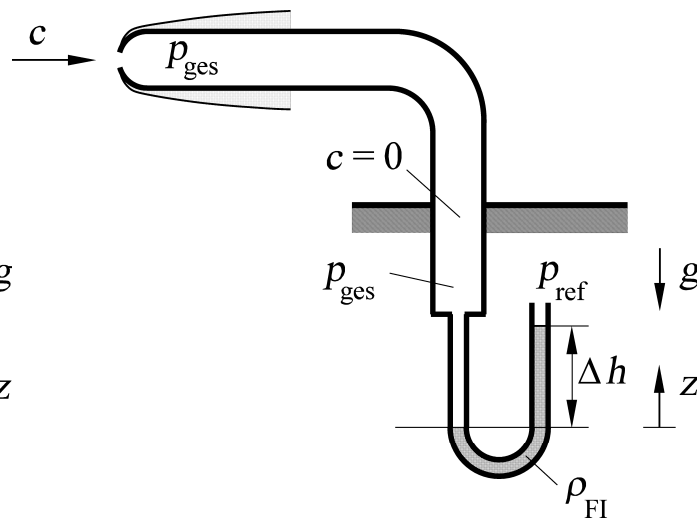
Messung des stat. Druckes, des Gesamtdruckes und des dyn. Druckes



Statischer Druck p_{stat}

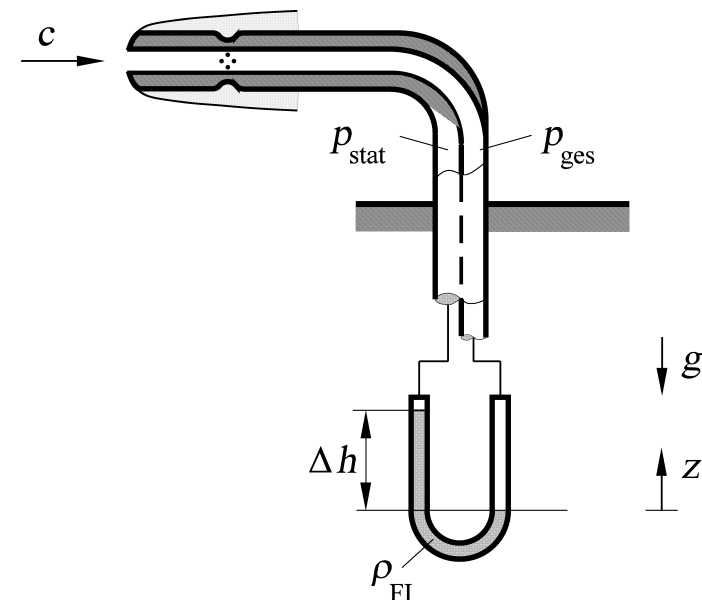
$$\rho g h \ll \rho_{\text{FI}} g \Delta h$$

$$\Delta p = p_{\text{stat}} - p_{\text{ref}} = \rho_{\text{FI}} g \Delta h$$



Gesamtdruck p_{ges}

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{ref}} + \rho_{\text{FI}} g \Delta h$$



Dynamischer Druck p_{dyn}

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{stat}} + \rho_{\text{FI}} g \Delta h$$

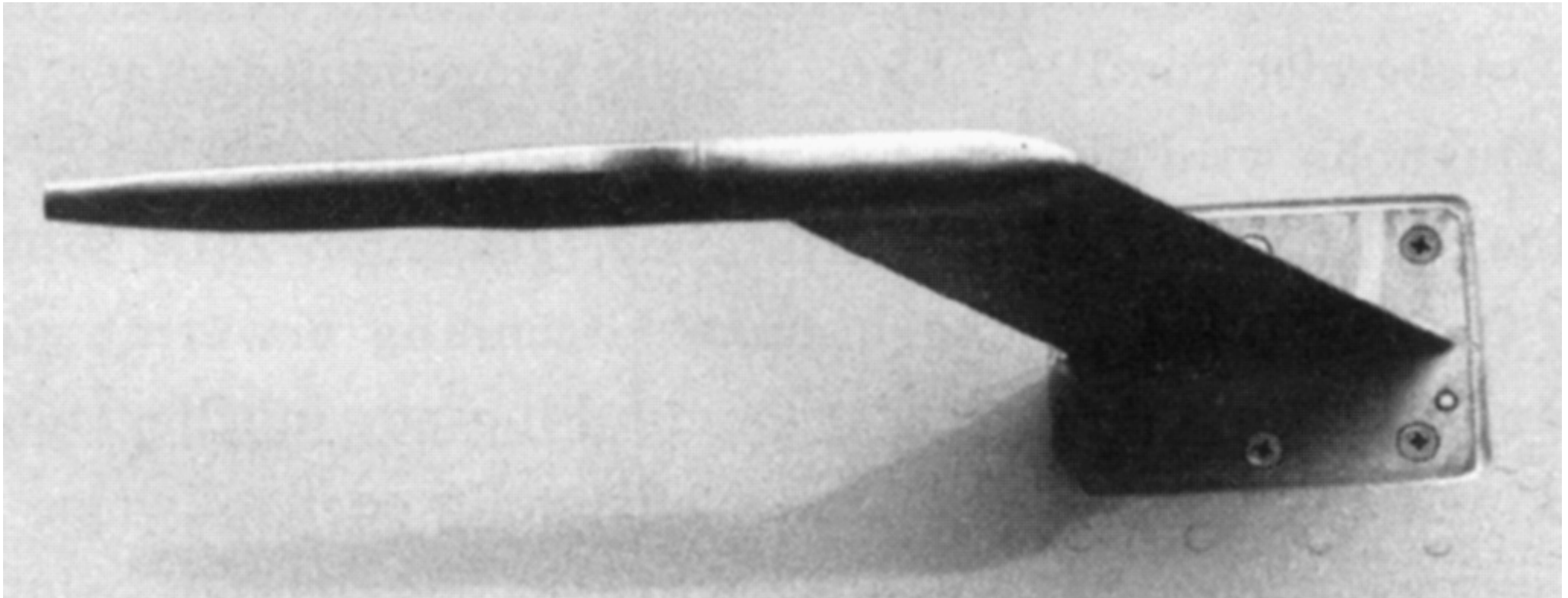
$$p_{\text{dyn}} = p_{\text{ges}} - p_{\text{stat}}$$

$$p_{\text{dyn}} = 0.5 \rho_L c^2 = \rho_{\text{FI}} g \Delta h$$

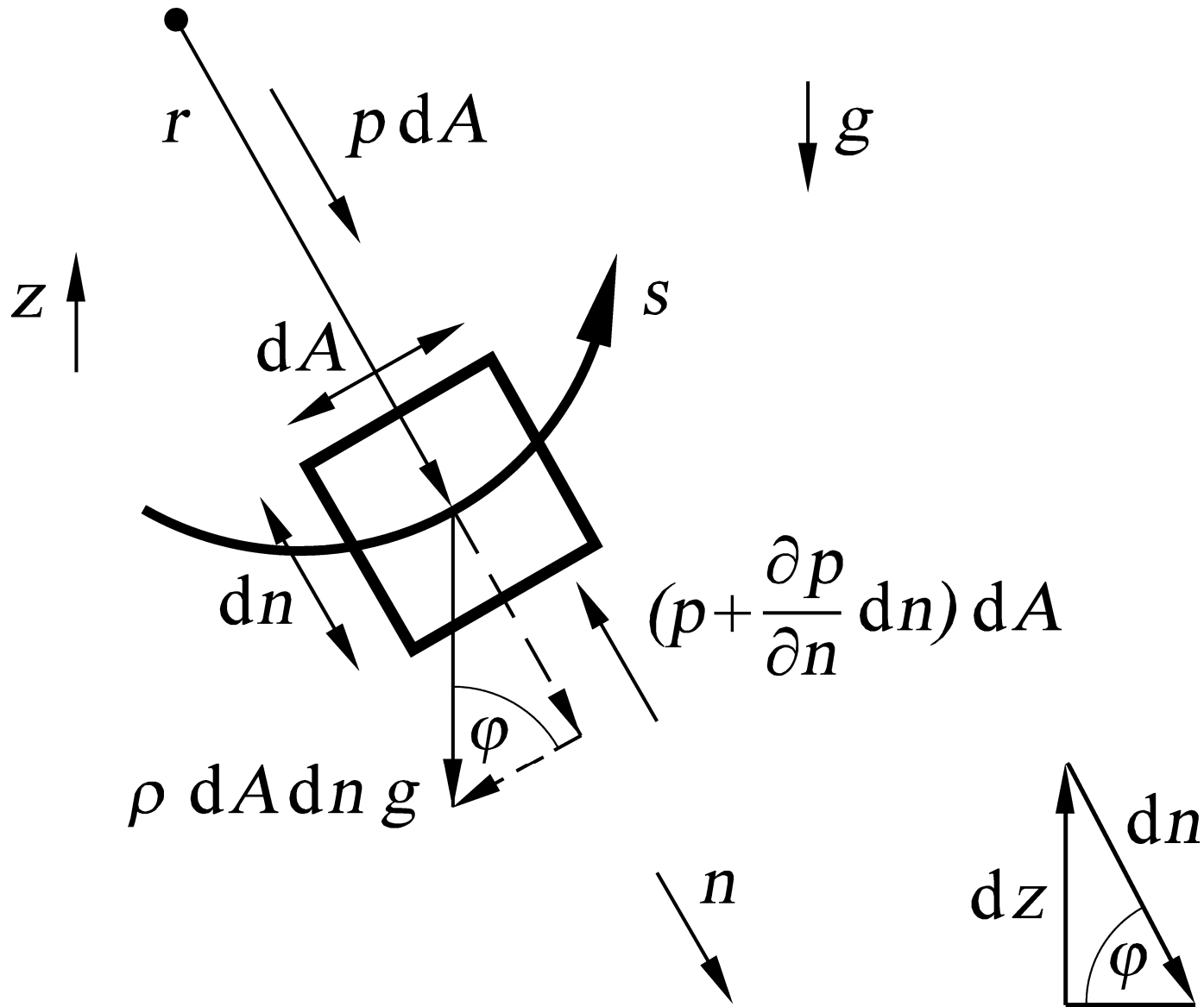
$$c^2 = 2 p_{\text{dyn}} / \rho_L = 2 \rho_{\text{FI}} g \Delta h / \rho_L$$



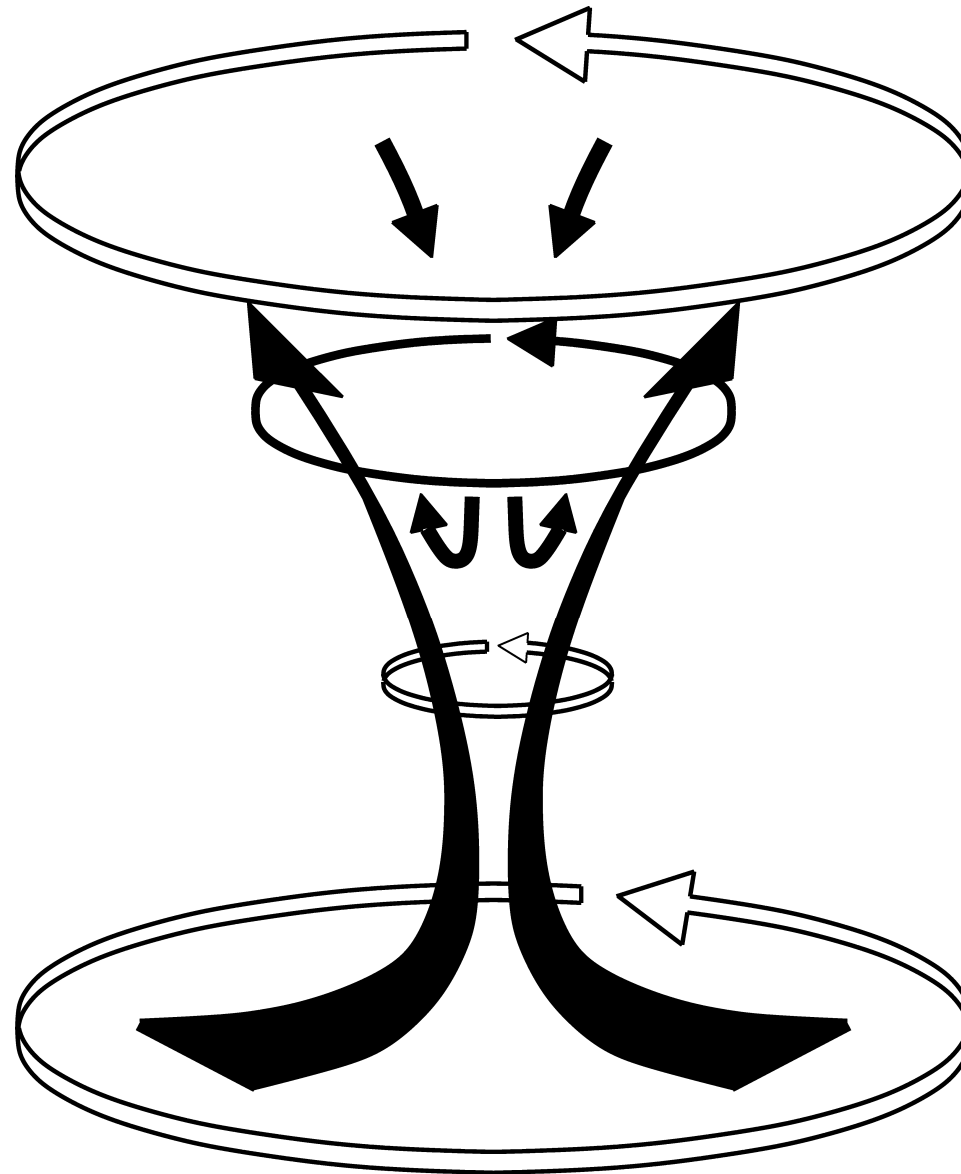
Prandtl-Staurohr



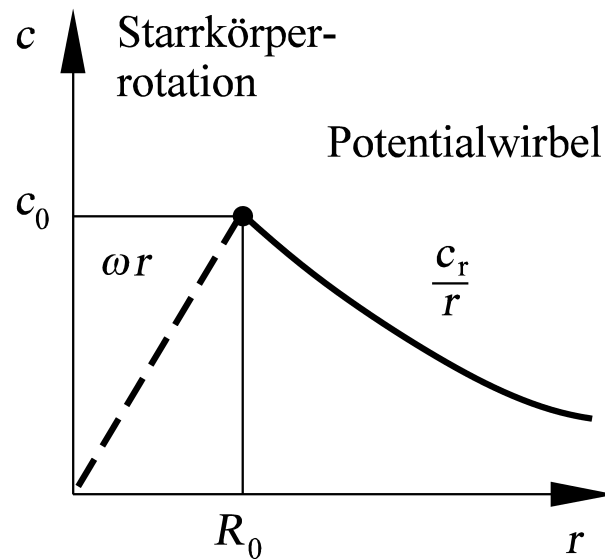
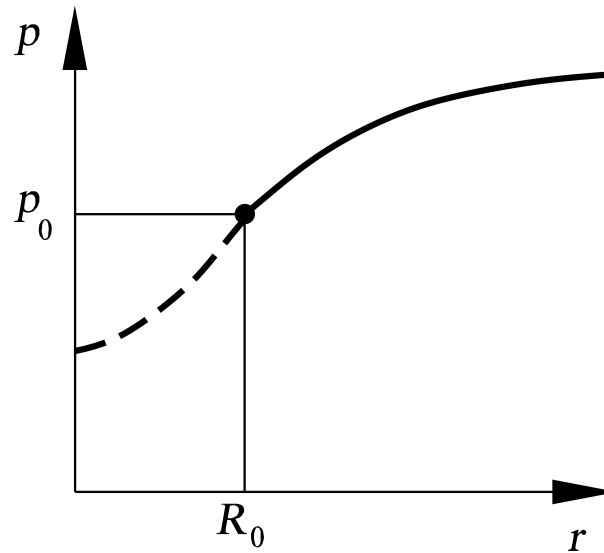
Kräftebilanz am Volumenelement senkrecht zum Stromfaden



Strömungen auf Kreisbahnen in einem Tornado



Druck- und Geschwindigkeitsverteilung in einem Potentialwirbel



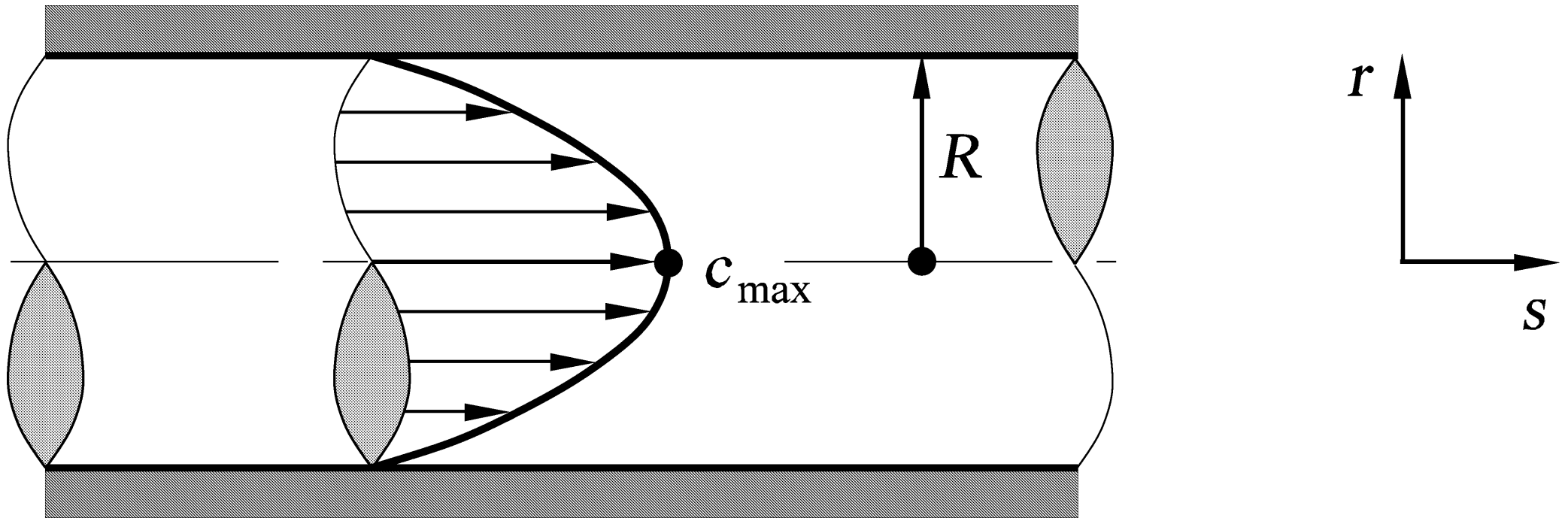
Experiment: Magnus-Kraft



Hagen-Poiseuille-Strömung



Hagen-Poiseuille-Rohrströmung



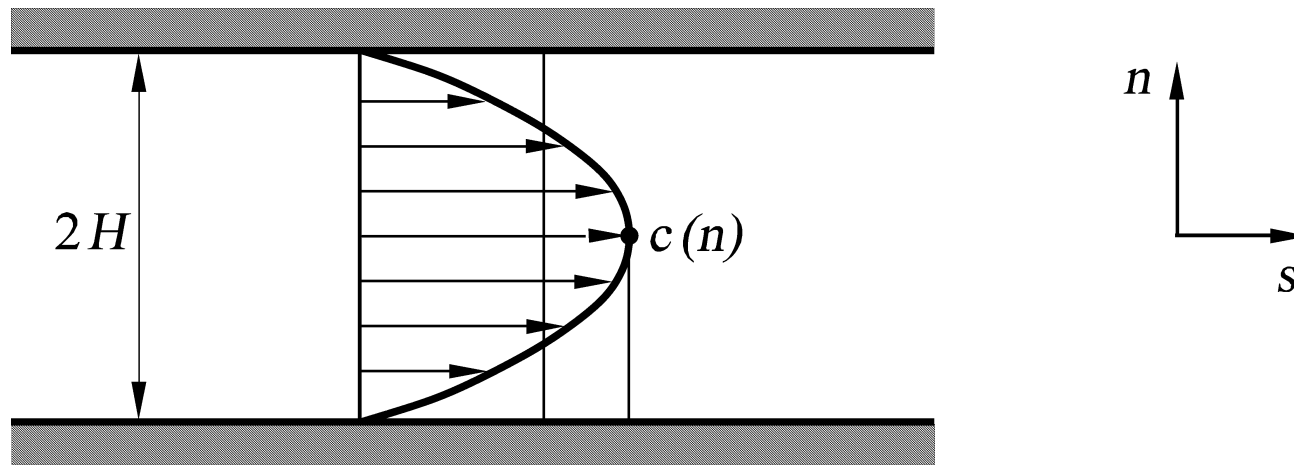
Poiseuille-Strömung

Couette-Strömung

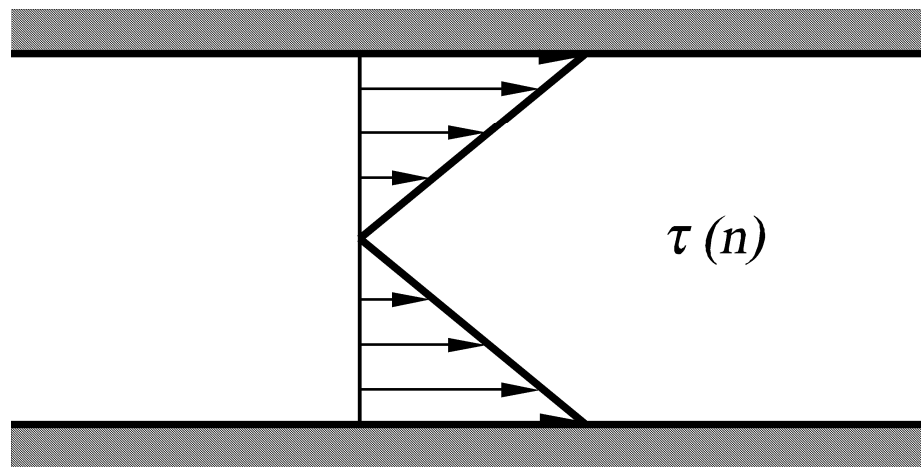
Druck- und Widerstandsbeiwert am Tragflügel



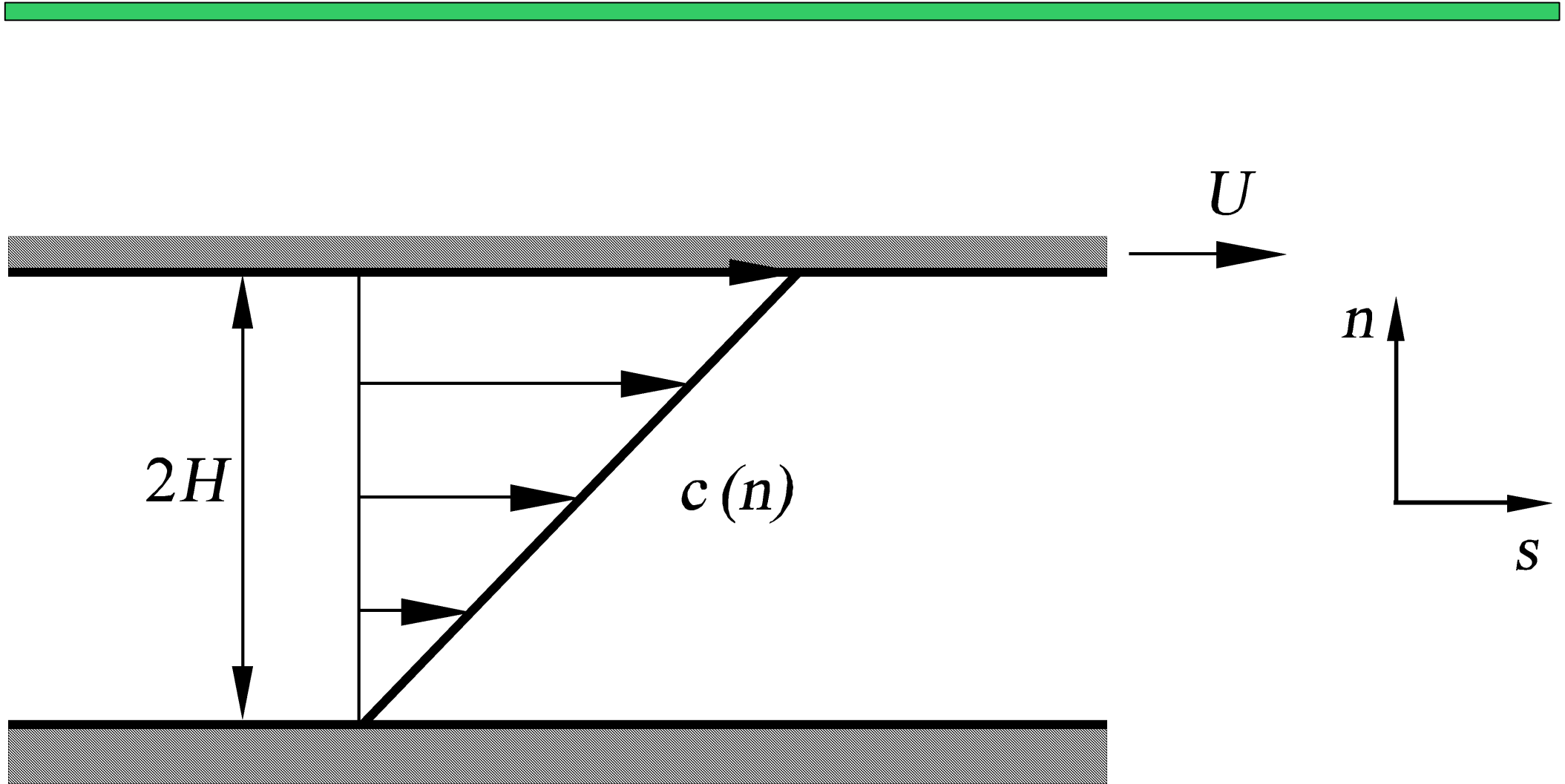
Poiseuille-Kanalströmung



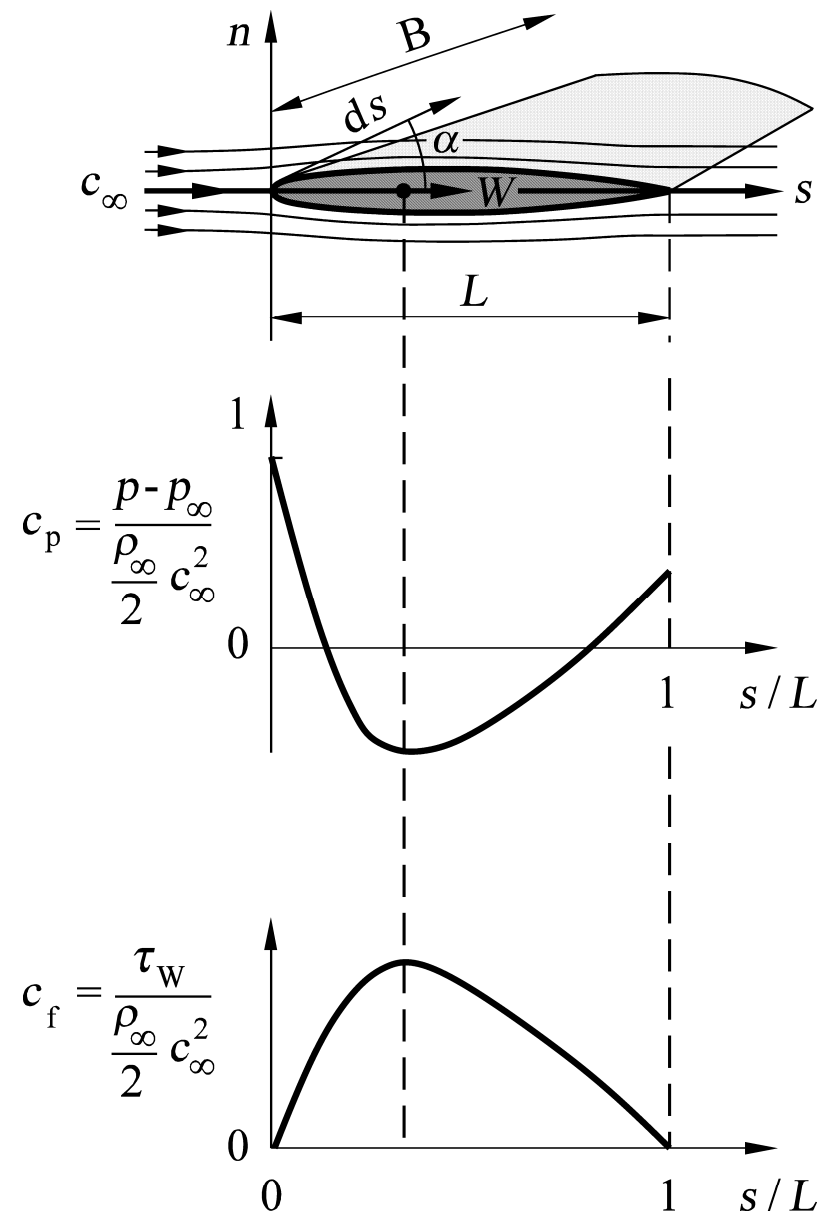
$$c_m = \frac{2}{3} c_{\max}$$



Couette-Strömung



Druckbeiwert c_p und Widerstandsbeiwert c_f der sym. Profilumströmung



8. Tafelübung Kompressible Laval-Düsenströmung

Stromfadentheorie bei Querschnittsänderung

Richtungsfeld der Laval-Düsen-Differentialgleichung

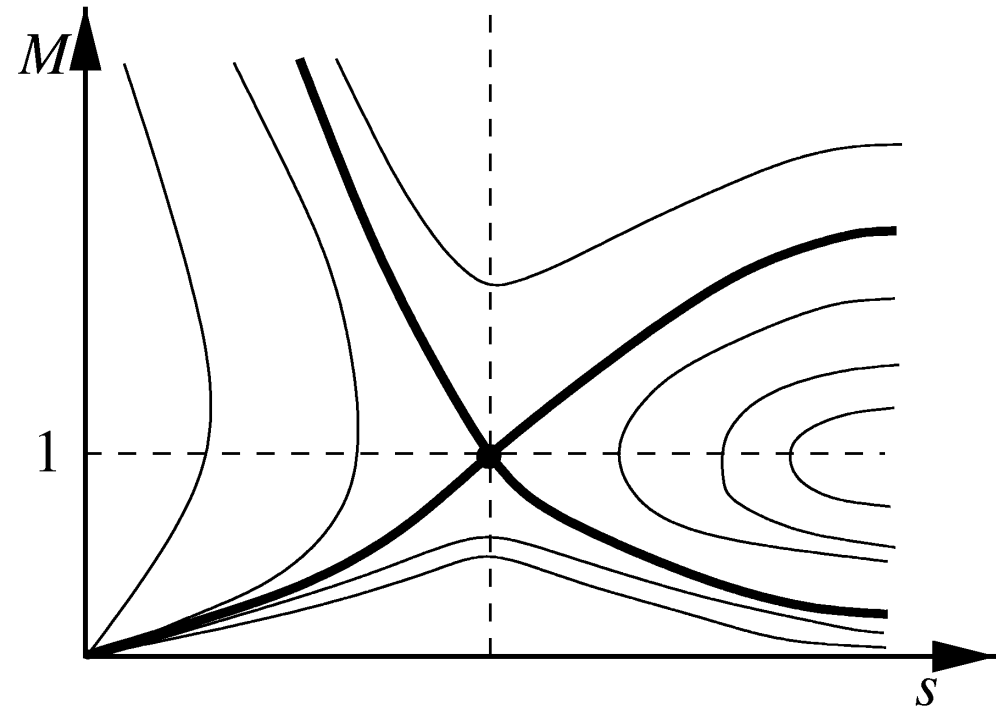
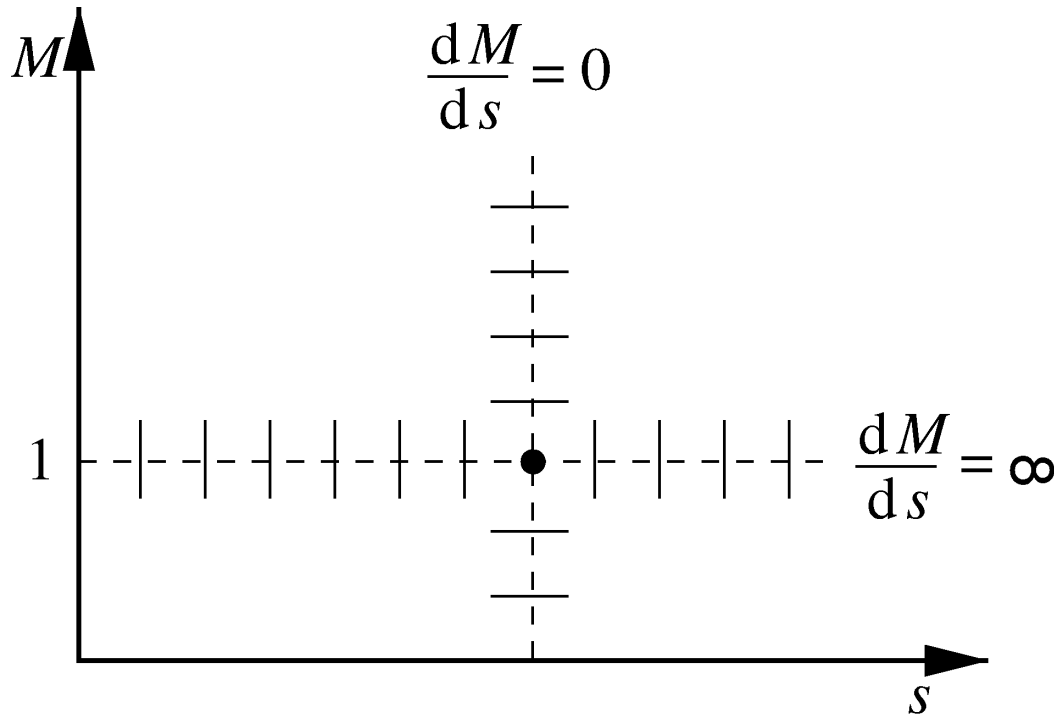
Mach-Zahlverlauf in Laval-Düse

Software Laval-Düsenströmung

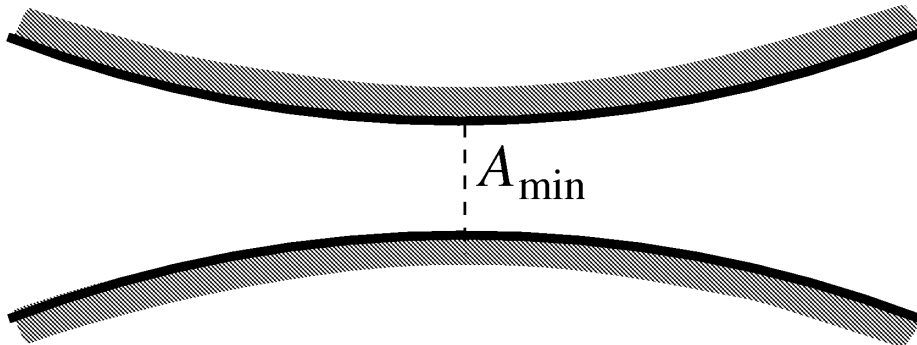
Strömungsformen am Laval-Düsenende



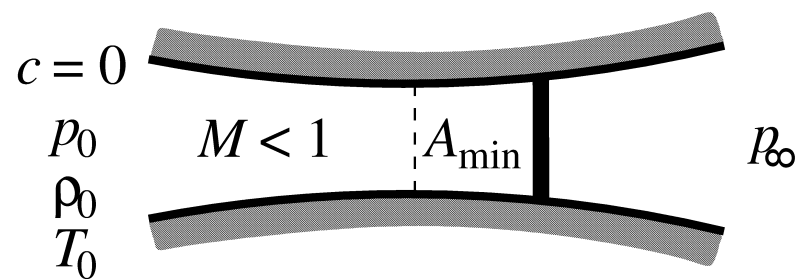
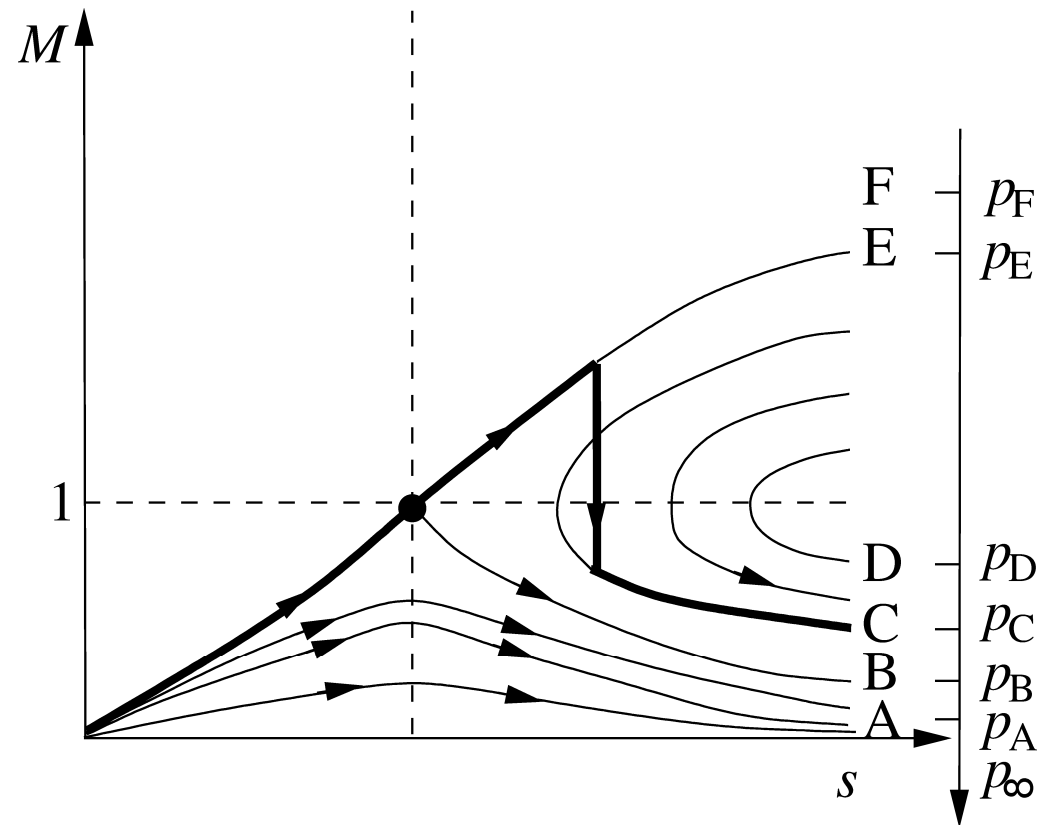
Richtungsfeld der Laval-Düsen-Differentialgleichung



$$M = 1$$



Mach-Zahlverlauf in Laval-Düse in Abhängigkeit des Gegendruckes p

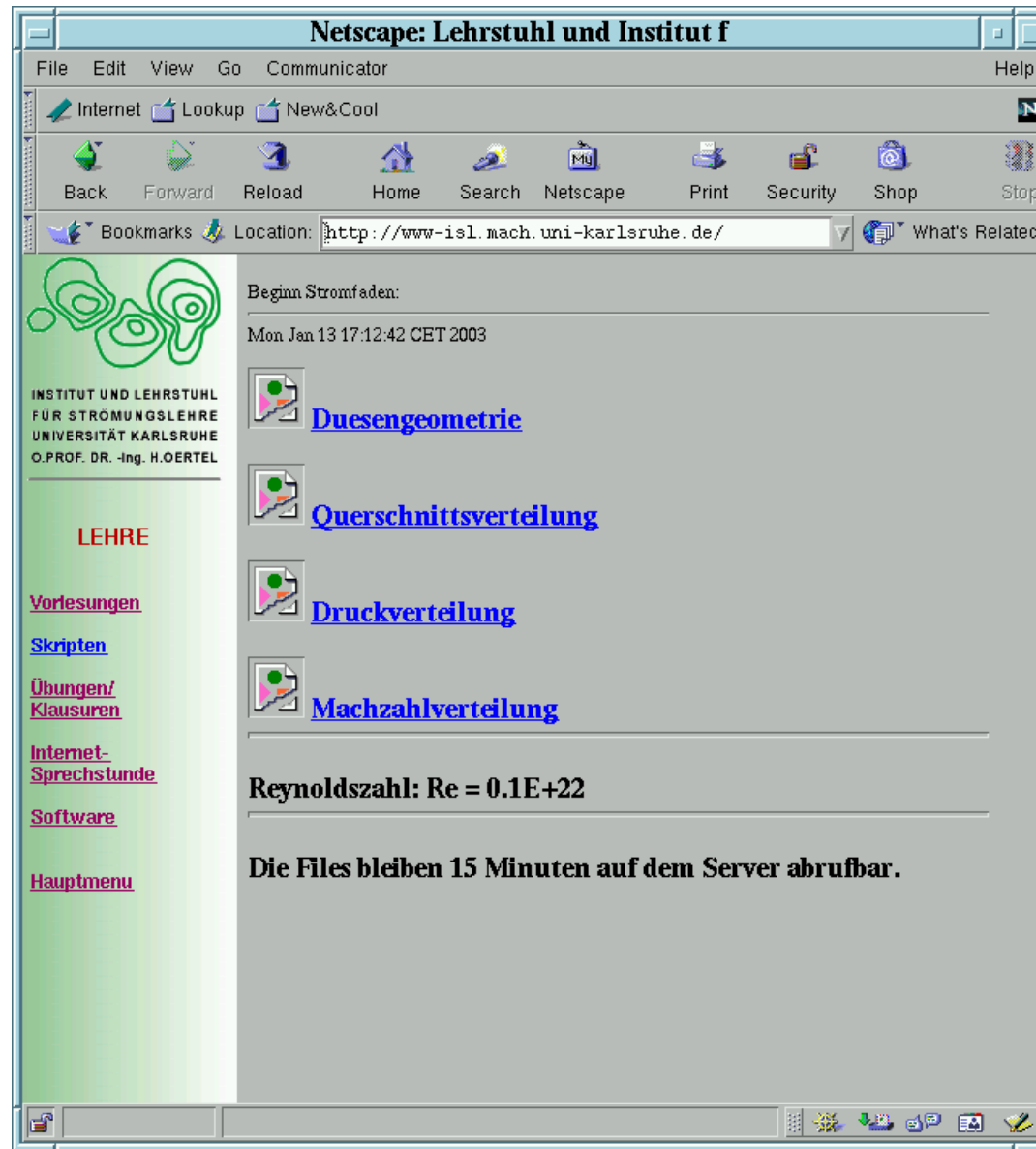


Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.96$

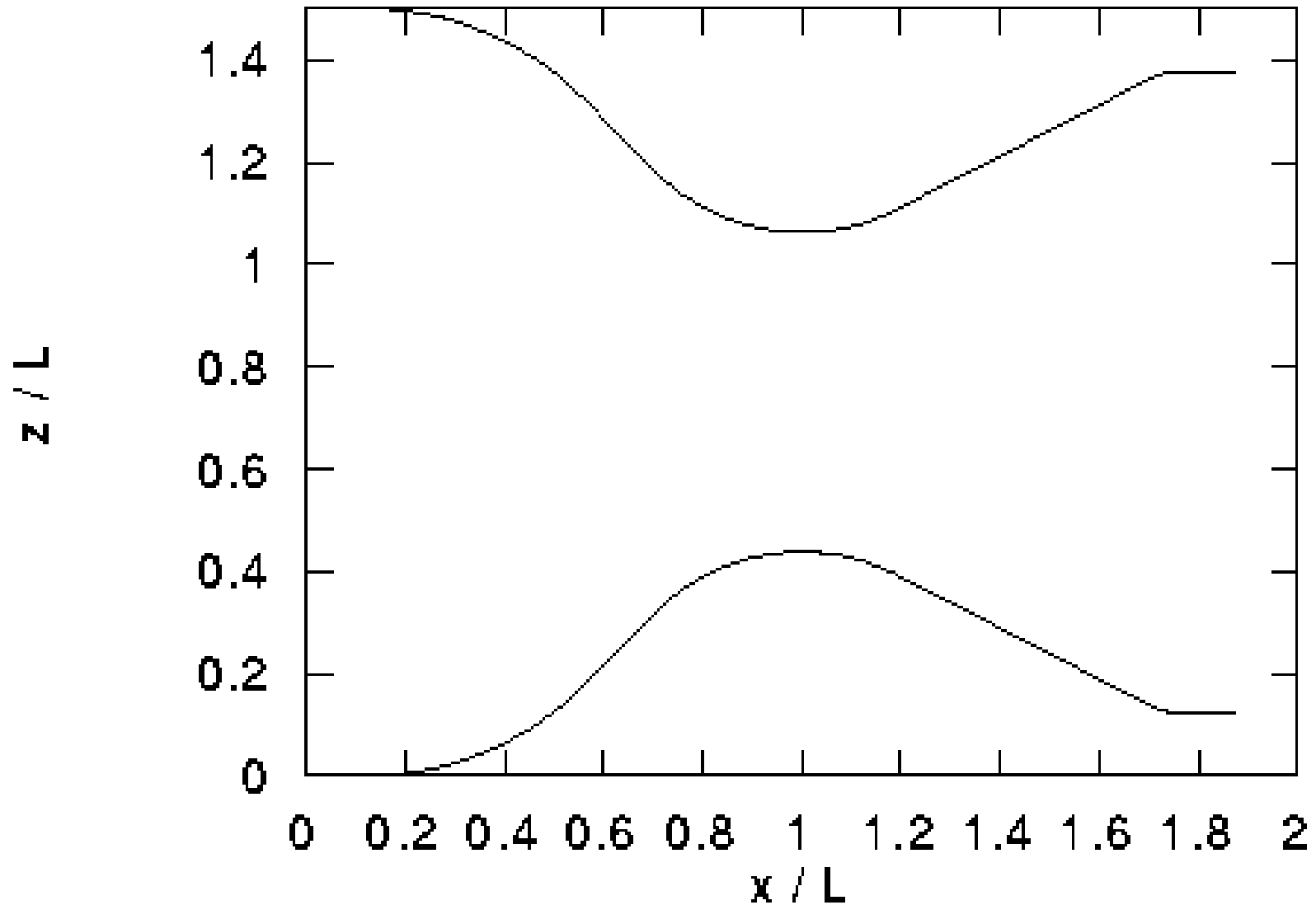
The screenshot shows a Netscape browser window titled "Netscape: Lehrstuhl und Institut f". The address bar contains "http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/". The main content area is titled "KAPPA-Stromfaden" and features a green logo of three stylized faces. Below the logo, the text reads "INSTITUT UND LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSLEHRE UNIVERSITÄT KARLSRUHE O. PROF. DR. -Ing. H. OERTEL". A red message states "Es stehen momentan nur die unterstrichenen Module zur Auswahl!". The interface includes several menu items: "inkompressibel", "kompressibel", "reibungsfrei", "reibungsbefahet", "stationär", and "instationär". Under "Kraftfahrzeug:", there are options for "Oberseite" and "Unterseite". Under "Tragflügel:", there are options for "Oberseite" and "Unterseite". Under "Düse:", there is an option for "Düsenströmung". A text input field for "Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):" contains the value "0.96". At the bottom, there are buttons for "Rechnung starten" and "Eingaben löschen". The browser's status bar shows "100%" zoom and various system icons.

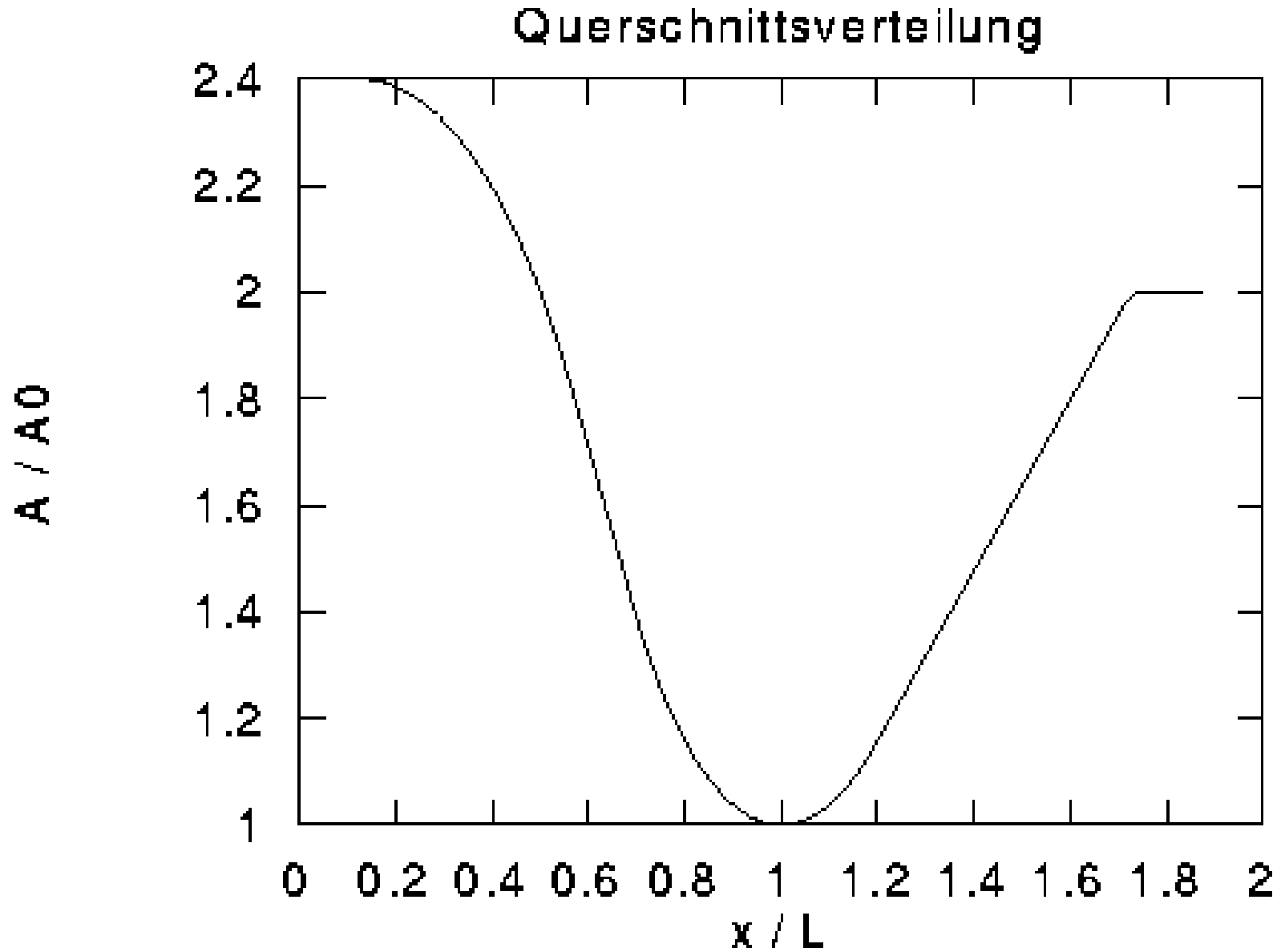


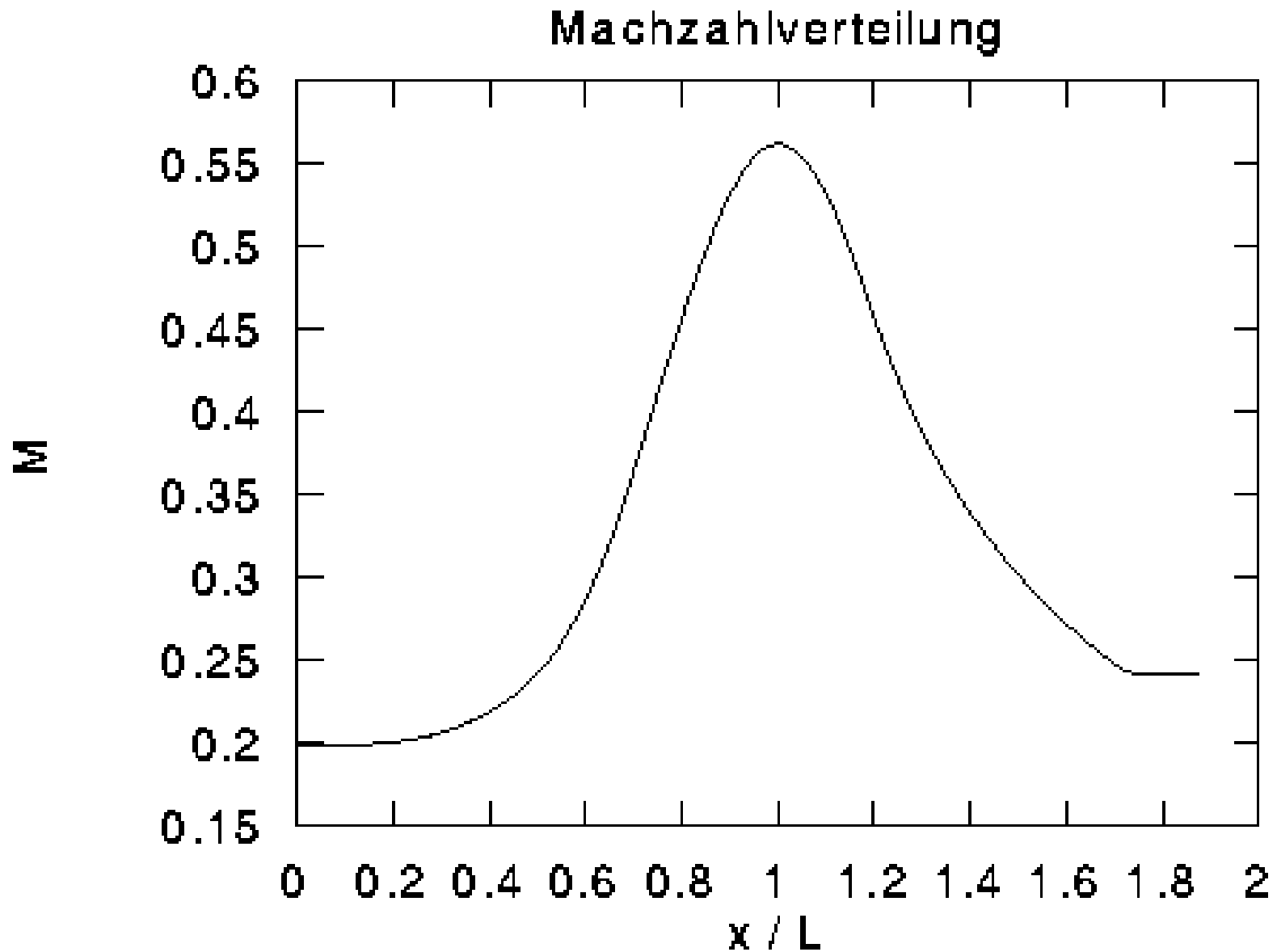
Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung

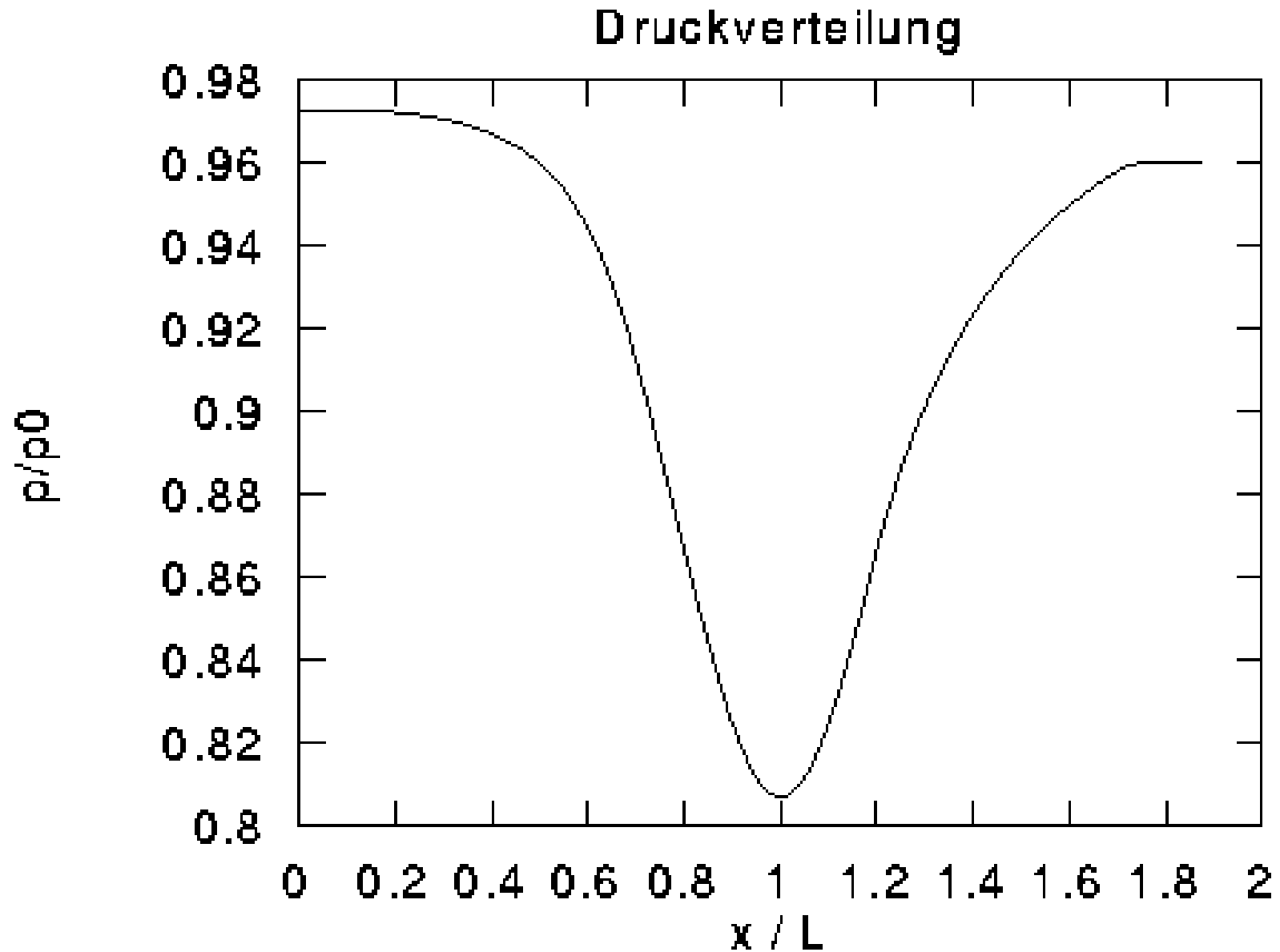


Düsengeometrie







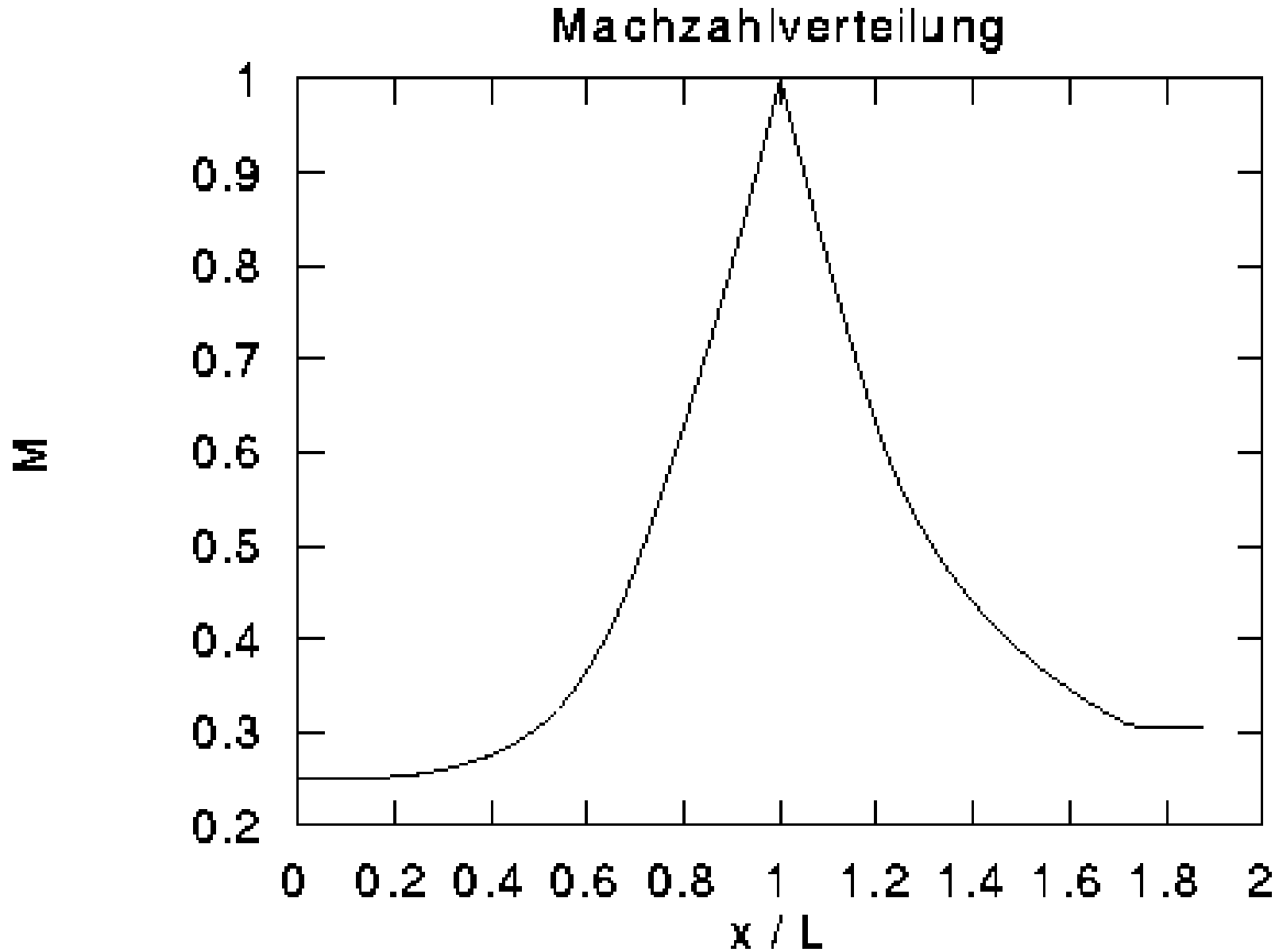


Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.93715$

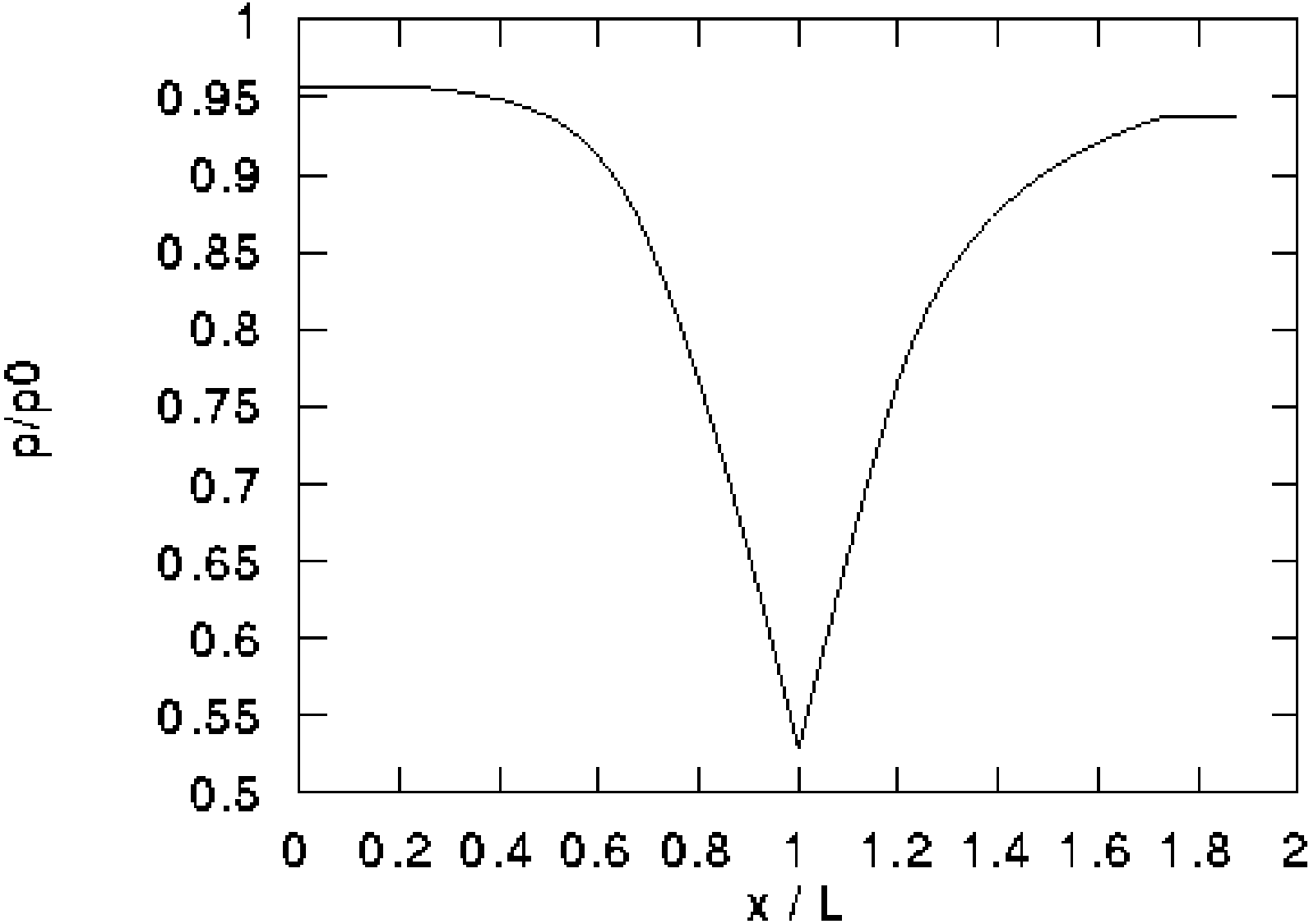


The screenshot shows a Netscape browser window titled "Netscape: Lehrstuhl und Institut f". The address bar contains the URL "http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/". The main content area is titled "KAPPA-Stromfaden" and features a navigation menu on the left with links for "Vorlesungen", "Skripten", "Übungen/ Klausuren", "Internet-Sprechstunde", "Software", and "Hauptmenu". The main content area includes a list of flow conditions: "inkompressibel", "kompressibel", "reibungsfrei", "reibungsbefahet", "stationär", and "instationär". Below this, there are sections for "Kraftfahrzeug:", "Tragflügel:", and "Düse:", each with sub-links. A text input field is labeled "Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):" and contains the value "0.93715". At the bottom of the page, there are two buttons: "Rechnung starten" and "Eingaben löschen".





Druckverteilung



Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.8$

Netscape: Lehrstuhl und Institut f

File Edit View Go Communicator Help

Internet Lookup New&Cool

Back Forward Reload Home Search Netscape Print Security Shop Stop

Bookmarks Location: What's Related

KAPPA-Strömung

INSTITUT UND LEHRSTUHL
FÜR STRÖMUNGSLEHRE
UNIVERSITÄT KARLSRUHE
O.PROF. DR. -Ing. H. OERTEL

LEHRE

[Vorlesungen](#)
[Skripten](#)
[Übungen/
Klausuren](#)
[Internet-
Sprechstunde](#)
[Software](#)
[Hauptmenu](#)

[inkompressibel](#) [kompressibel](#)

[reibungsfrei](#) [reibungsbefahet](#)

[stationär](#) [instationär](#)

Kraftfahrzeug: [Oberseite](#) [Unterseite](#)

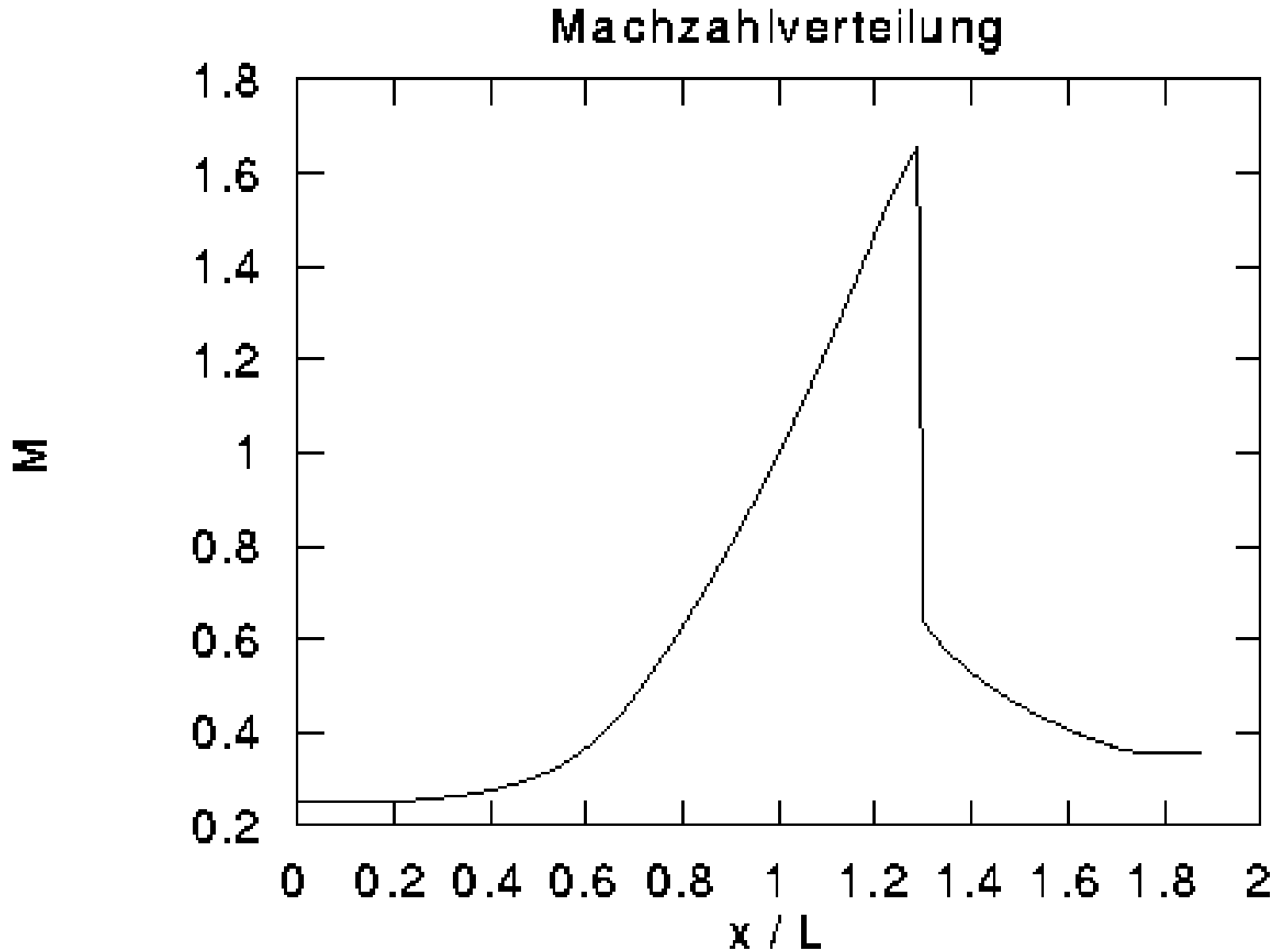
Tragflügel: [Oberseite](#) [Unterseite](#)

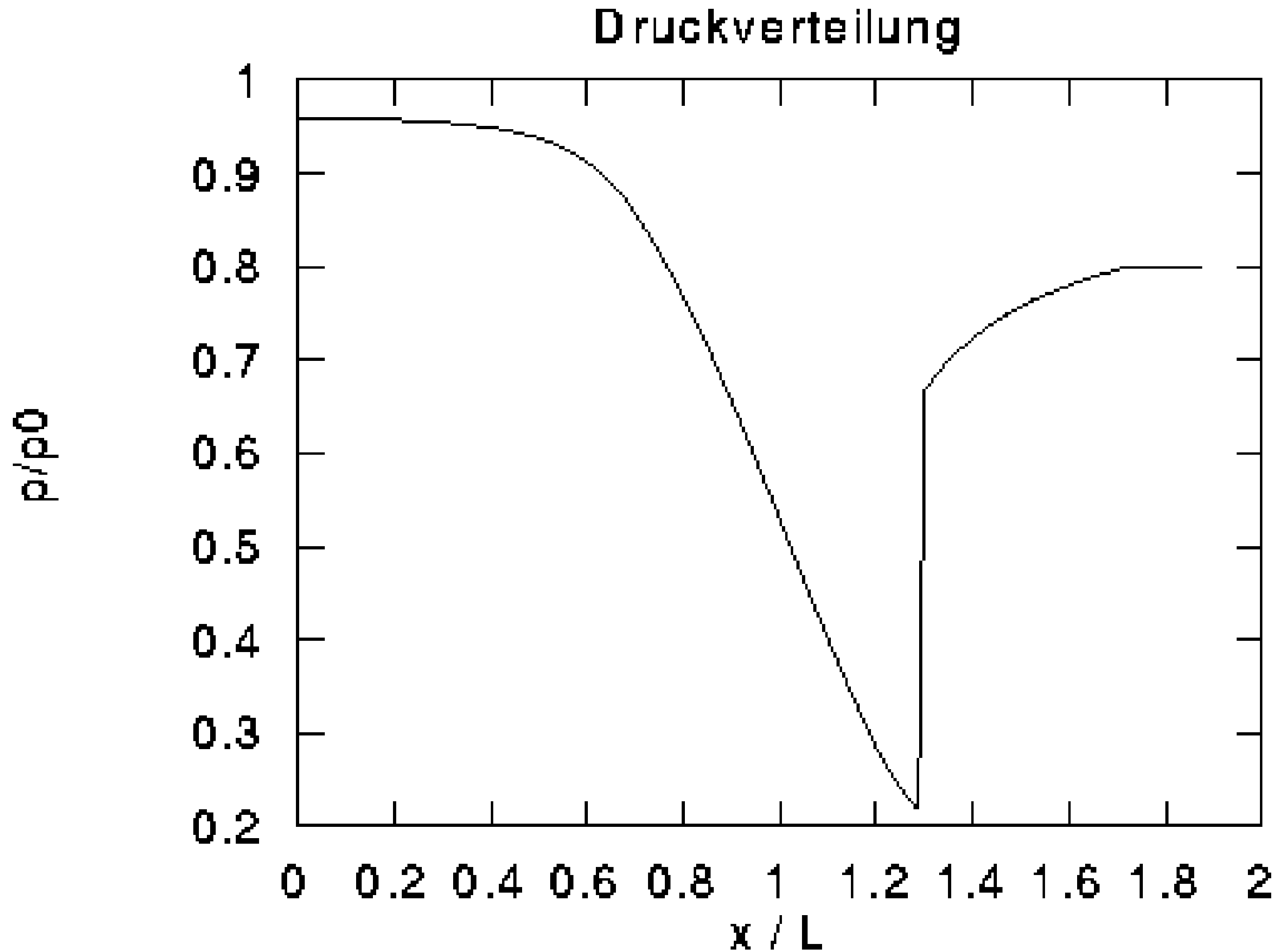
Düse: [Düsenströmung](#)

Anströmungsgeschwindigkeit in km/h (beim Kfz),
Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):

100%







Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.51$

Netscape: Lehrstuhl und Institut f

File Edit View Go Communicator Help

Internet Lookup New&Cool

Back Forward Reload Home Search Netscape Print Security Shop Stop

Bookmarks Location: What's Related

KAPPA-Strömung

Es stehen momentan nur die unterstrichenen Module zur Auswahl!

inkompressibel kompressibel

reibungsfrei reibungsbefahet

stationär instationär

Kraftfahrzeug: Oberseite Unterseite

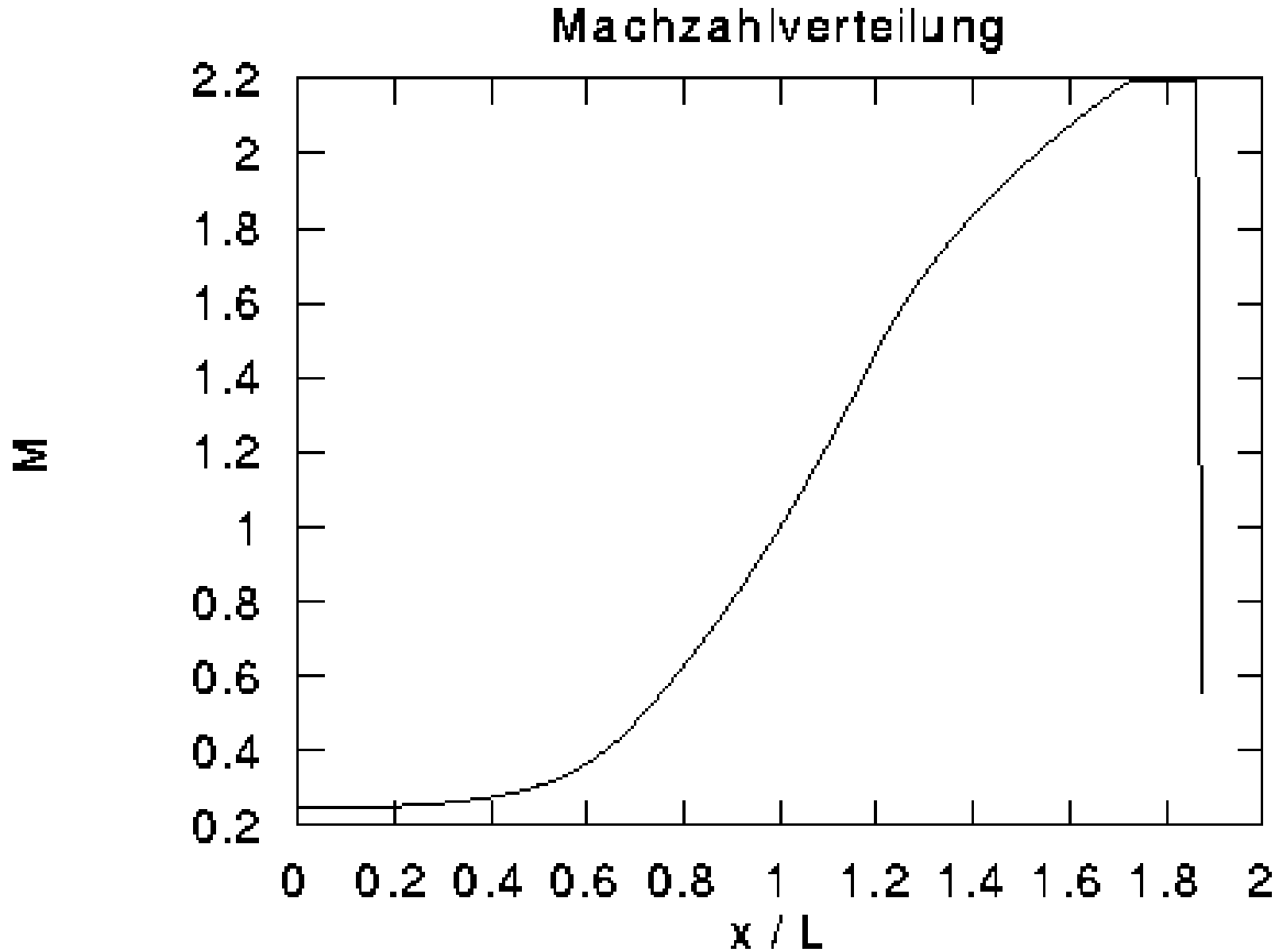
Tragflügel: Oberseite Unterseite

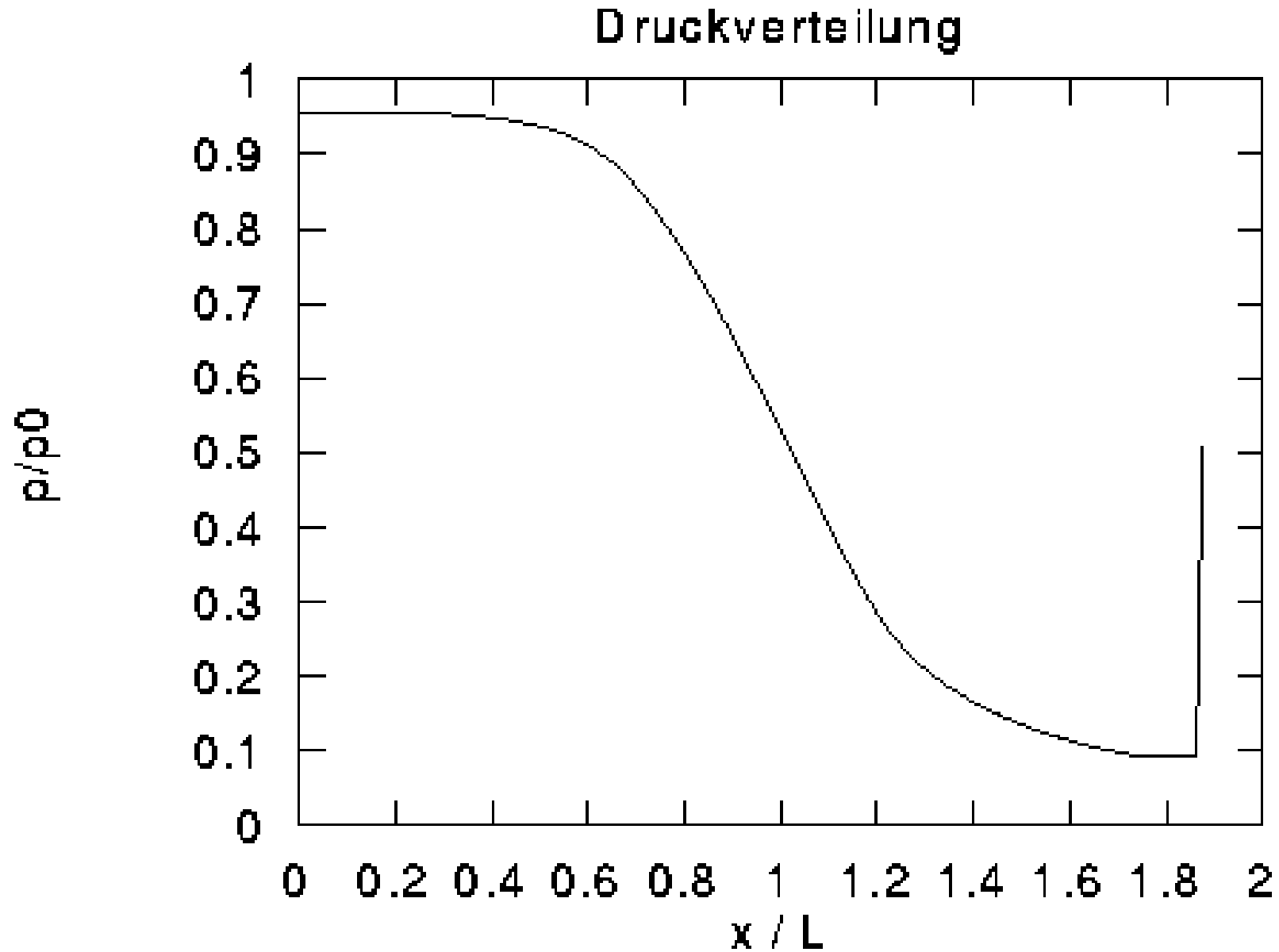
Düse: Düsenströmung

Anströmungsgeschwindigkeit in km/h (beim Kfz),
Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):

100% <http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/LEHRE/software.html>



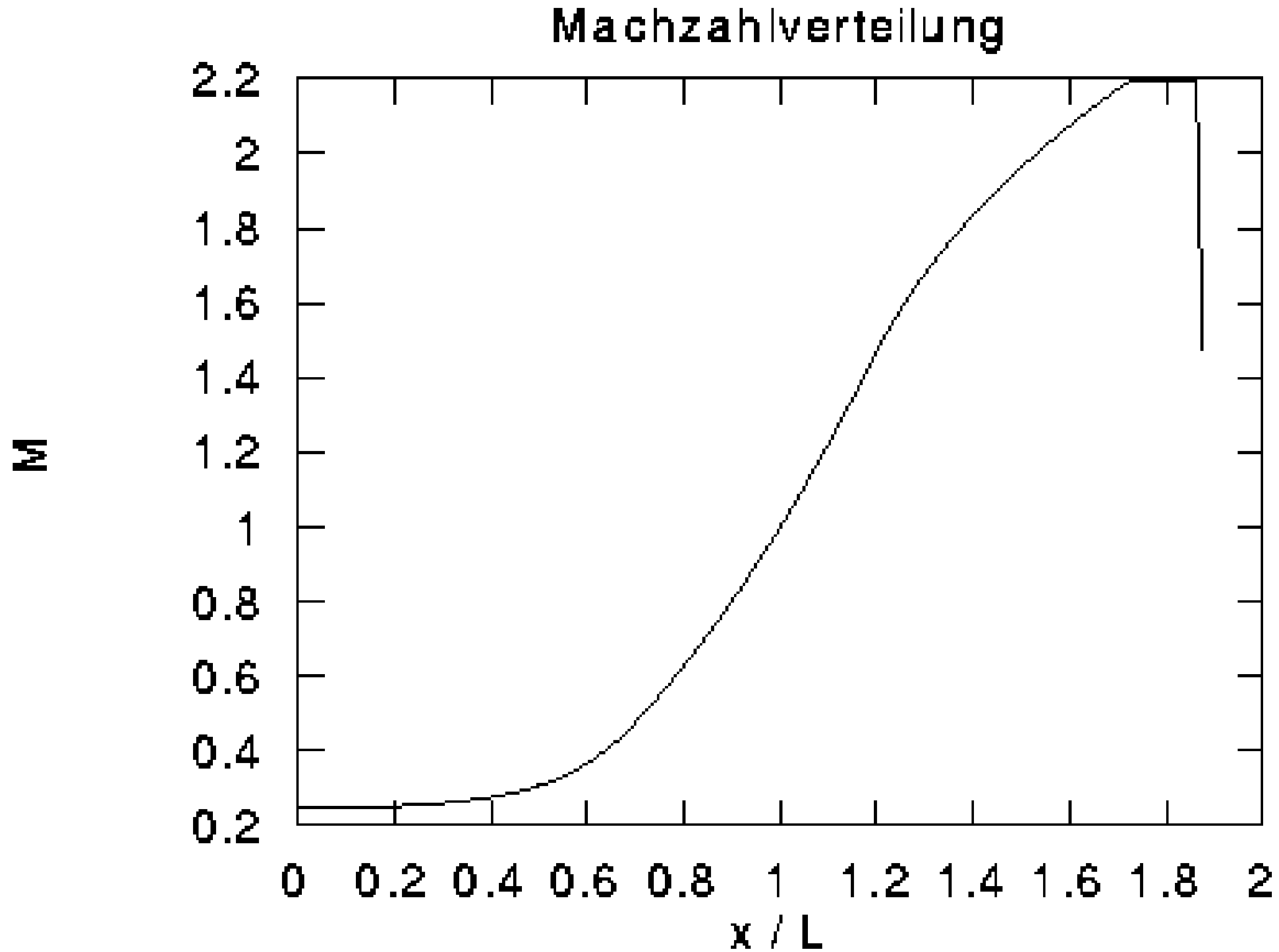


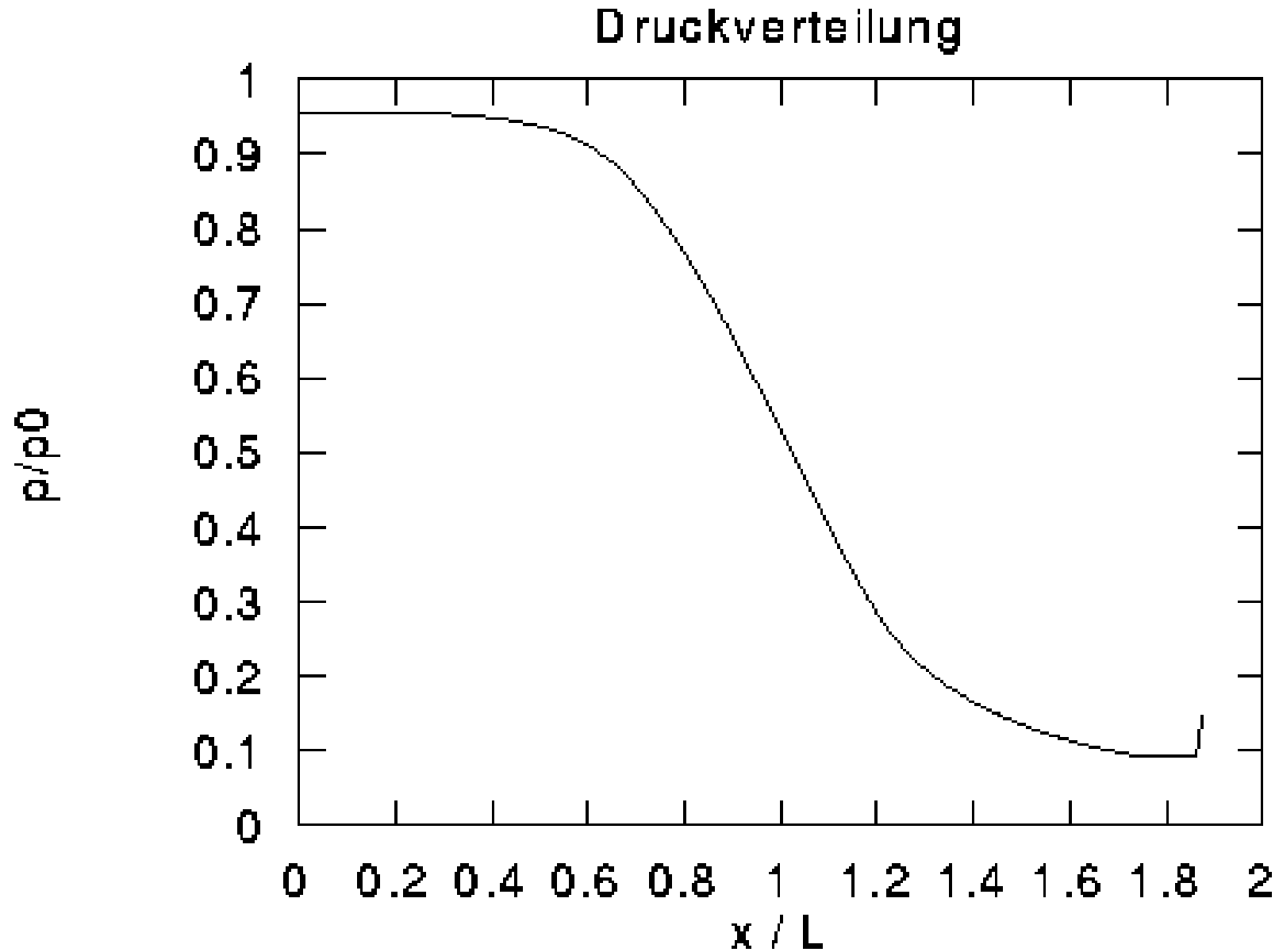


Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.15$

The screenshot shows a Netscape browser window titled "Netscape: Lehrstuhl und Institut f". The address bar contains the URL "http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/". The main content area displays the "KAPPA-Stromfaden" website. On the left, there is a navigation menu with links for "Vorlesungen", "Skripten", "Übungen/ Klausuren", "Internet-Sprechstunde", "Software", and "Hauptmenu". The main content area features a grid of links for different flow conditions: "inkompressibel", "kompressibel", "reibungsfrei", "reibungsbefahet", "stationär", and "instationär". Below these links, there are sections for "Kraftfahrzeug:", "Tragflügel:", and "Düse:", each with sub-links for "Oberseite" and "Unterseite". A text input field is labeled "Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):" and contains the value "0.15". At the bottom of the page, there are two buttons: "Rechnung starten" and "Eingaben löschen". The browser's status bar at the bottom shows a zoom level of 100% and various system icons.







Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.093$

Netscape: Lehrstuhl und Institut f

File Edit View Go Communicator Help

Internet Lookup New&Cool

Back Forward Reload Home Search Netscape Print Security Shop Stop

Bookmarks Location: What's Related

KAPPA-Strömungsfaden

INSTITUT UND LEHRSTUHL
FÜR STRÖMUNGSLEHRE
UNIVERSITÄT KARLSRUHE
O.PROF. DR. -Ing. H. OERTEL

LEHRE

[Vorlesungen](#)

[Skripten](#)

[Übungen/
Klausuren](#)

[Internet-
Sprechstunde](#)

[Software](#)

[Hauptmenu](#)

[inkompressibel](#) [kompressibel](#)

[reibungsfrei](#) [reibungsbefahet](#)

[stationär](#) [instationär](#)

Kraftfahrzeug: [Oberseite](#) [Unterseite](#)

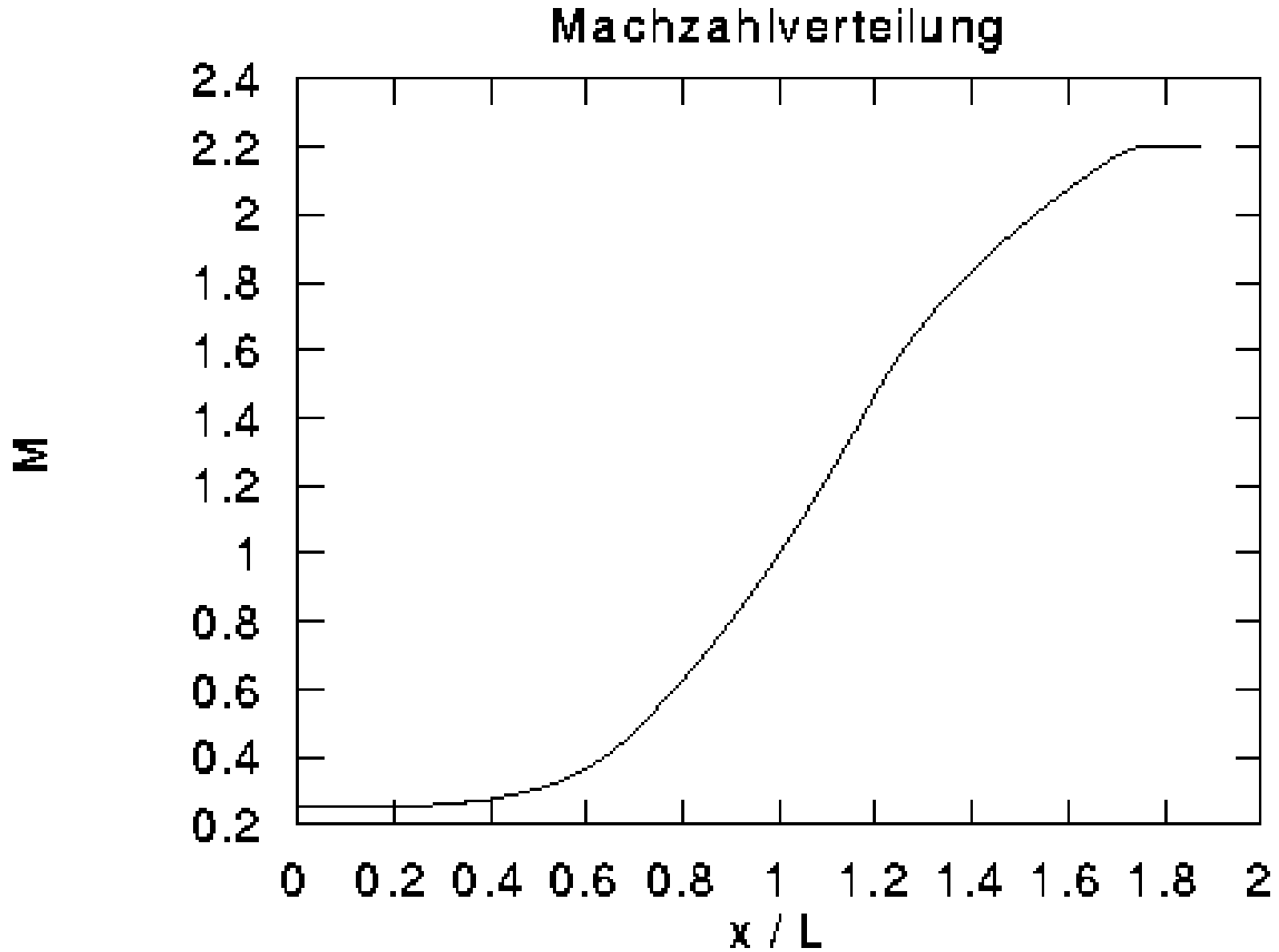
Tragflügel: [Oberseite](#) [Unterseite](#)

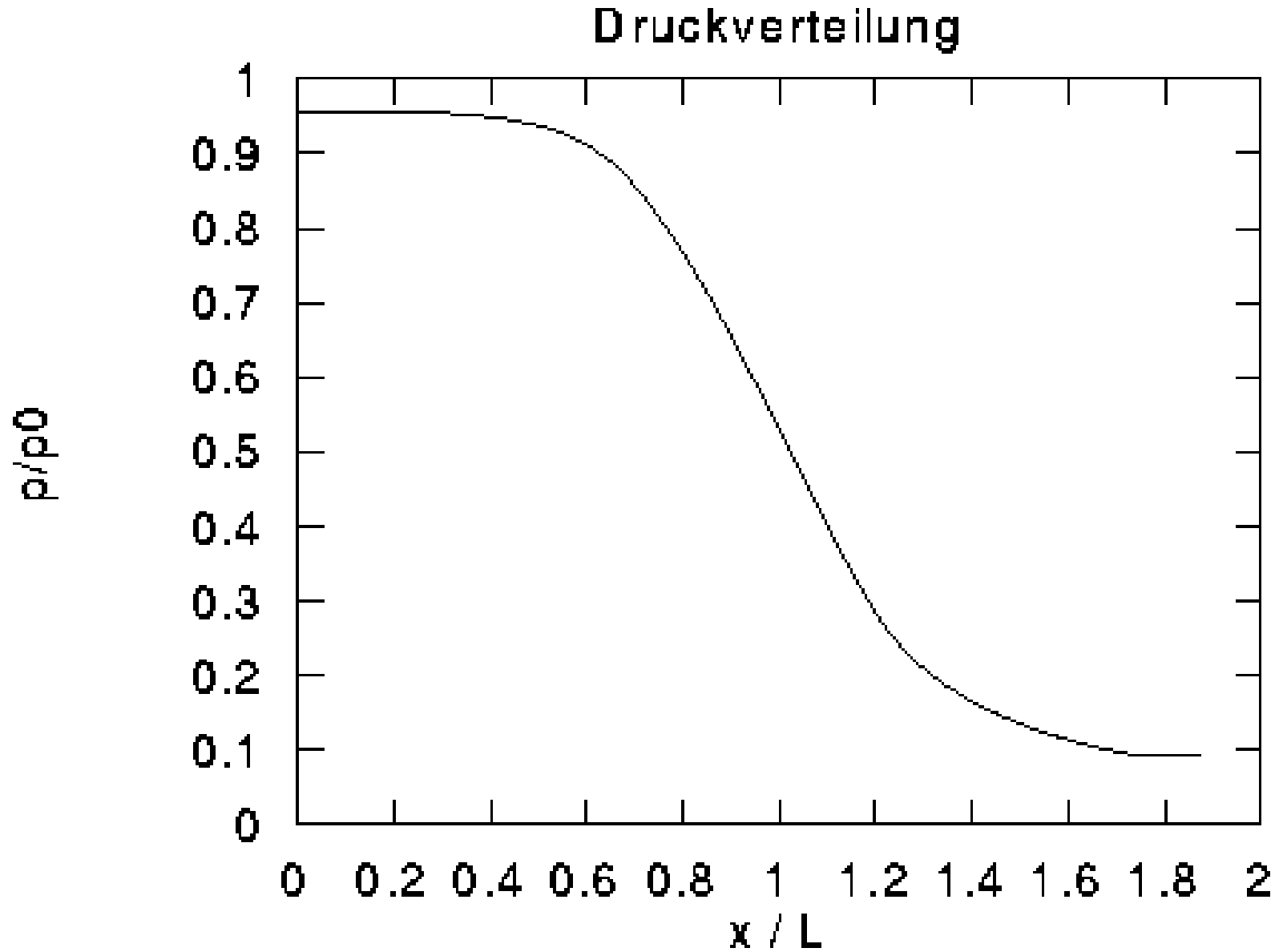
Düse: [Düsenströmung](#)

Anströmungsgeschwindigkeit in km/h (beim Kfz),
Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):

100% http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/LEHRE/skripten.html







Software: KAPPA Stromfaden Laval-Düsenströmung $p_{\text{geg}}/p_0 = 0.05$

Netscape: Lehrstuhl und Institut f

File Edit View Go Communicator Help

Internet Lookup New&Cool

Back Forward Reload Home Search Netscape Print Security Shop Stop

Bookmarks Location: What's Related

KAPPA-Strömungsfaden

Es stehen momentan nur die unterstrichenen Module zur Auswahl!

inkompressibel kompressibel

reibungsfrei reibungsbefahet

stationär instationär

Kraftfahrzeug: Oberseite Unterseite

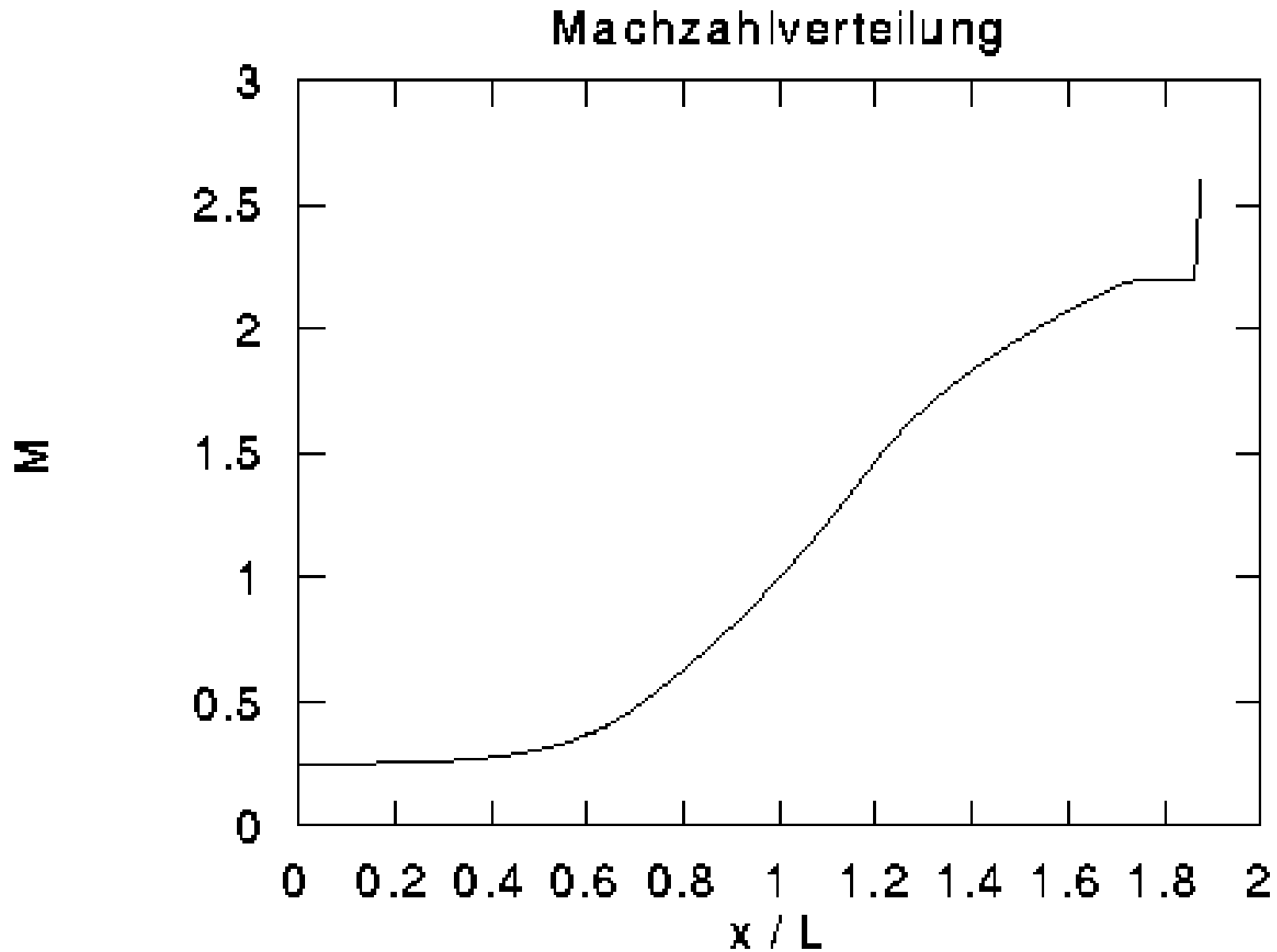
Tragflügel: Oberseite Unterseite

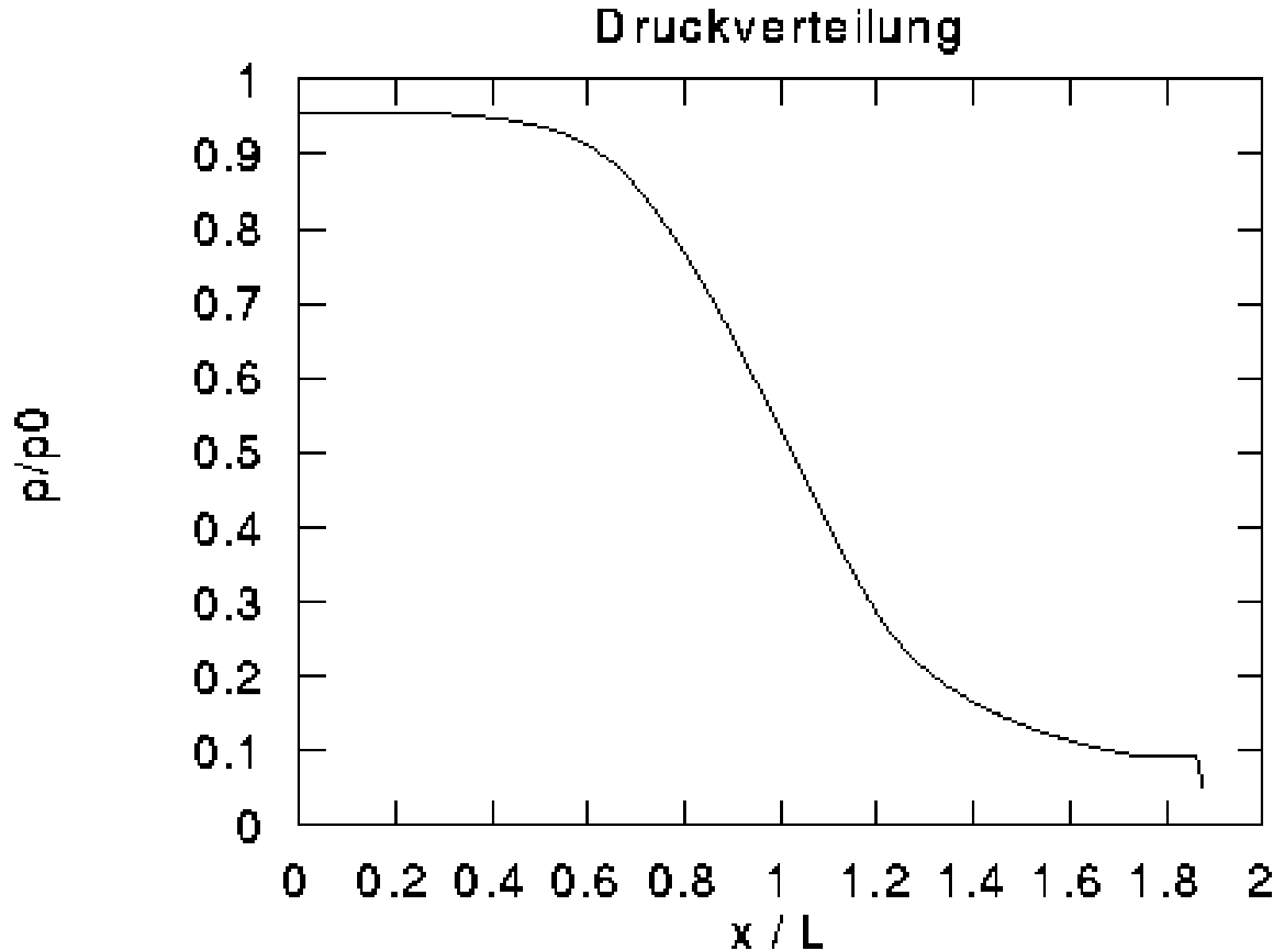
Düse: Düsenströmung

Anströmungsgeschwindigkeit in km/h (beim Kfz),
Druckverhältnis Gegendruck/Ruhedruck (bei Düse):

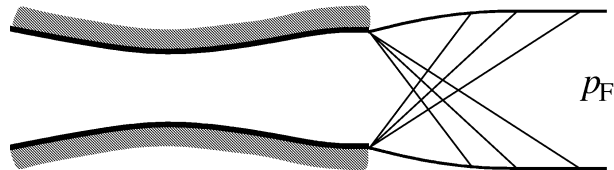
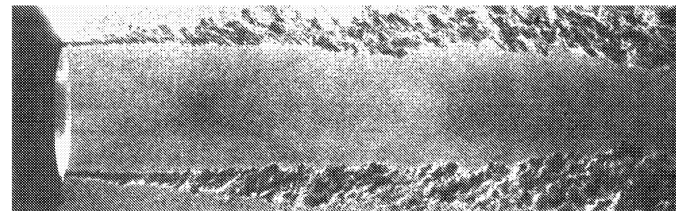
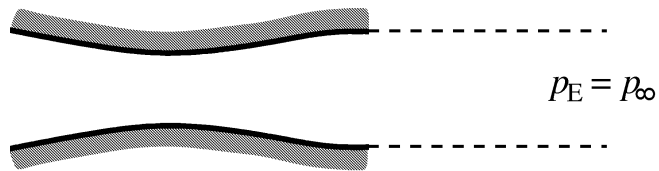
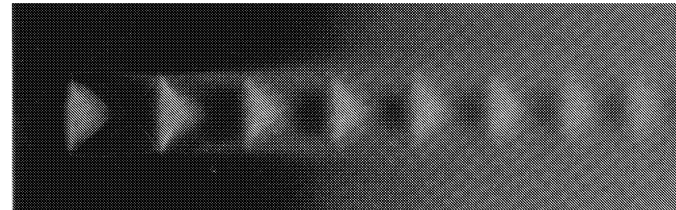
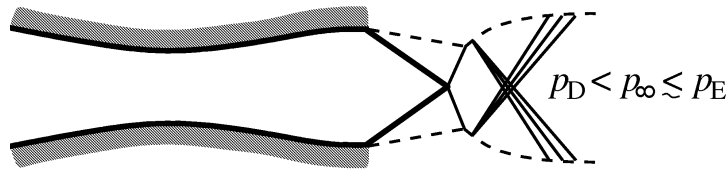
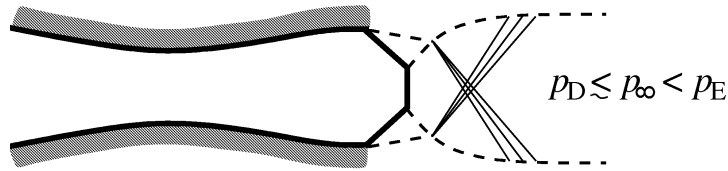
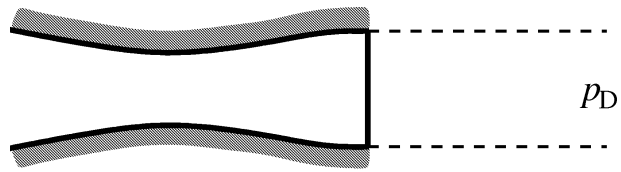
100%







Strömungsformen am Laval-Düsenende in Abhängigkeit des Gegendruckes



Verdichtungsstoß

Stoßrohr, Weg-Zeit-Diagramm

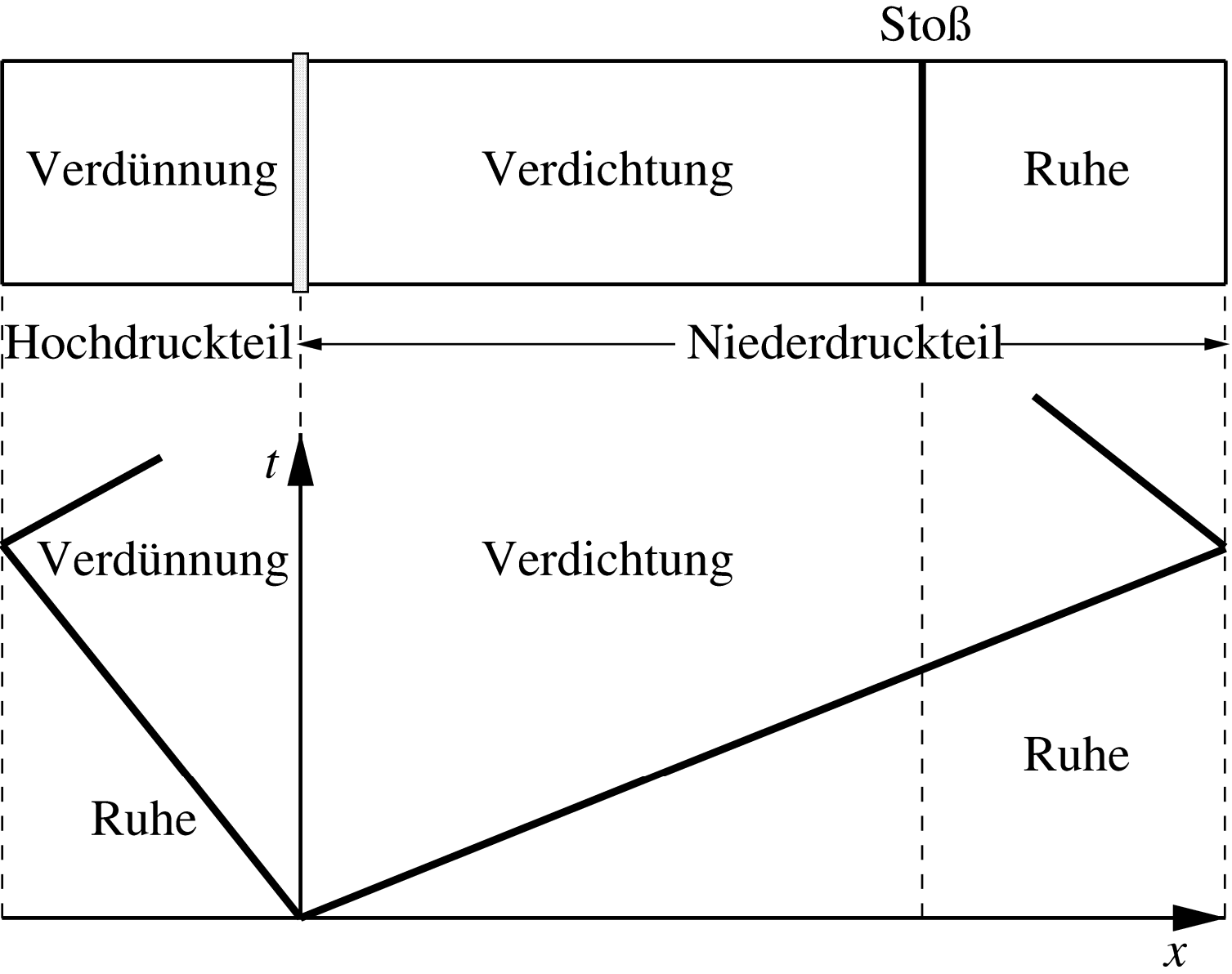
Film: Numerische Simulation Stoßrohr, Weg-Zeit-Diagramm

Verdichtungsstoßanalogie Skifahrer

Strömungsformen um Flügelprofil



Stoßrohr, Weg-Zeit-Diagramm von Verdichtungsstoß und Verdünnungswelle



Film: Numerische Simulation von Stoßrohrströmung, Weg-Zeit-Diagramm

RRZN - Video

TAPE: VHS (Erstellung: 20.08.91 11:46:24)

COMMENTS: Name: 20.08.91 11:44:59 GWS3 CONSOLE GWS3
Metafile: CGMBIN (6048208 Bytes)

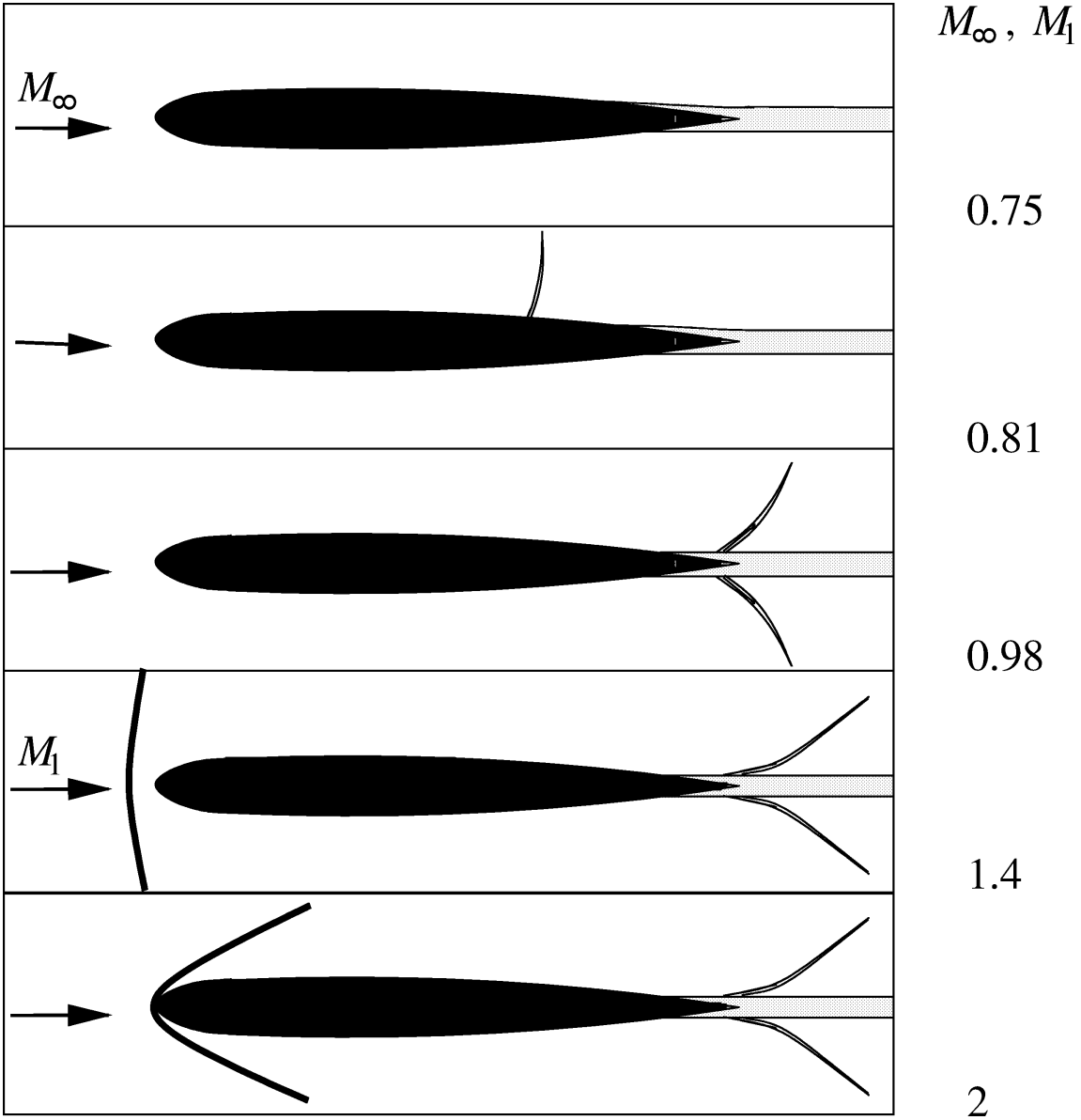
ADDRESS: TU Braunschweig
Inst. fuer Strömungsmechanik
z. Hd. J. Mani
Hienroder Weg 3
3300 Braunschweig



Analogie zur Entstehung eines Verdichtungsstoßes, Skifahrer



Strömungsformen um Flügelprofil von Unterschall- bis Überschallanströmung

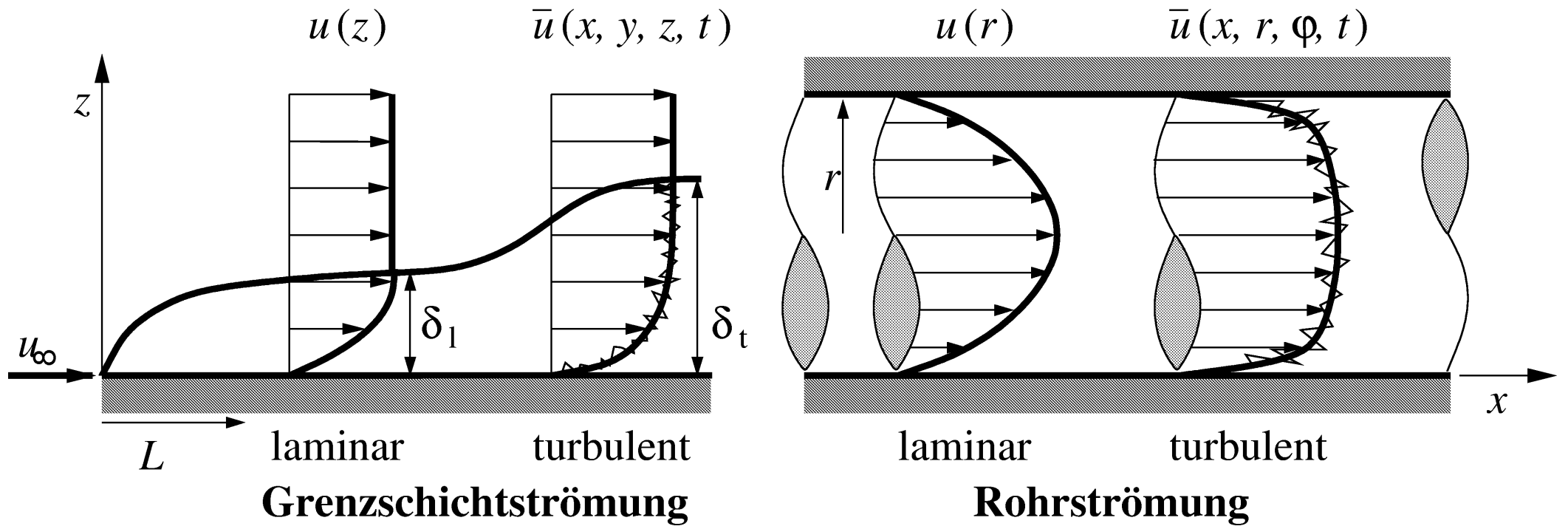


Geschwindigkeitsprofile laminar, turbulent

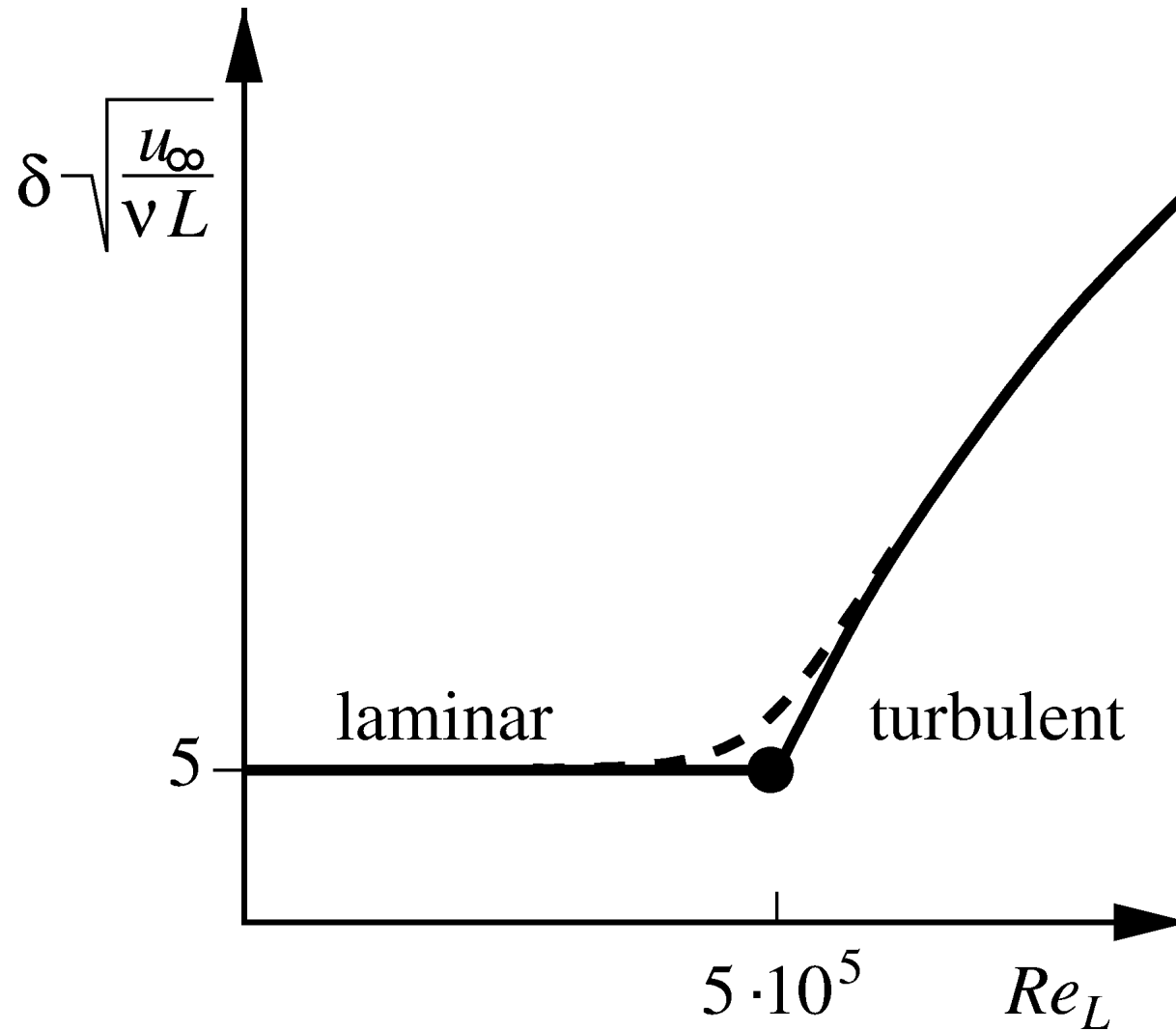
Grenzschichtdicke, laminare und turbulente Plattengrenzschicht



Laminare und turbulente Geschwindigkeitsprofile



Grenzschichtdicke δ der laminaren und turbulenten Plattengrenzschicht



Impulssatz

Kräfte am Rohrkrümmer

Drehimpulssatz

Momente am Rohrkrümmer

Gasturbine

Pumpe mit radialem und axialem Laufrad

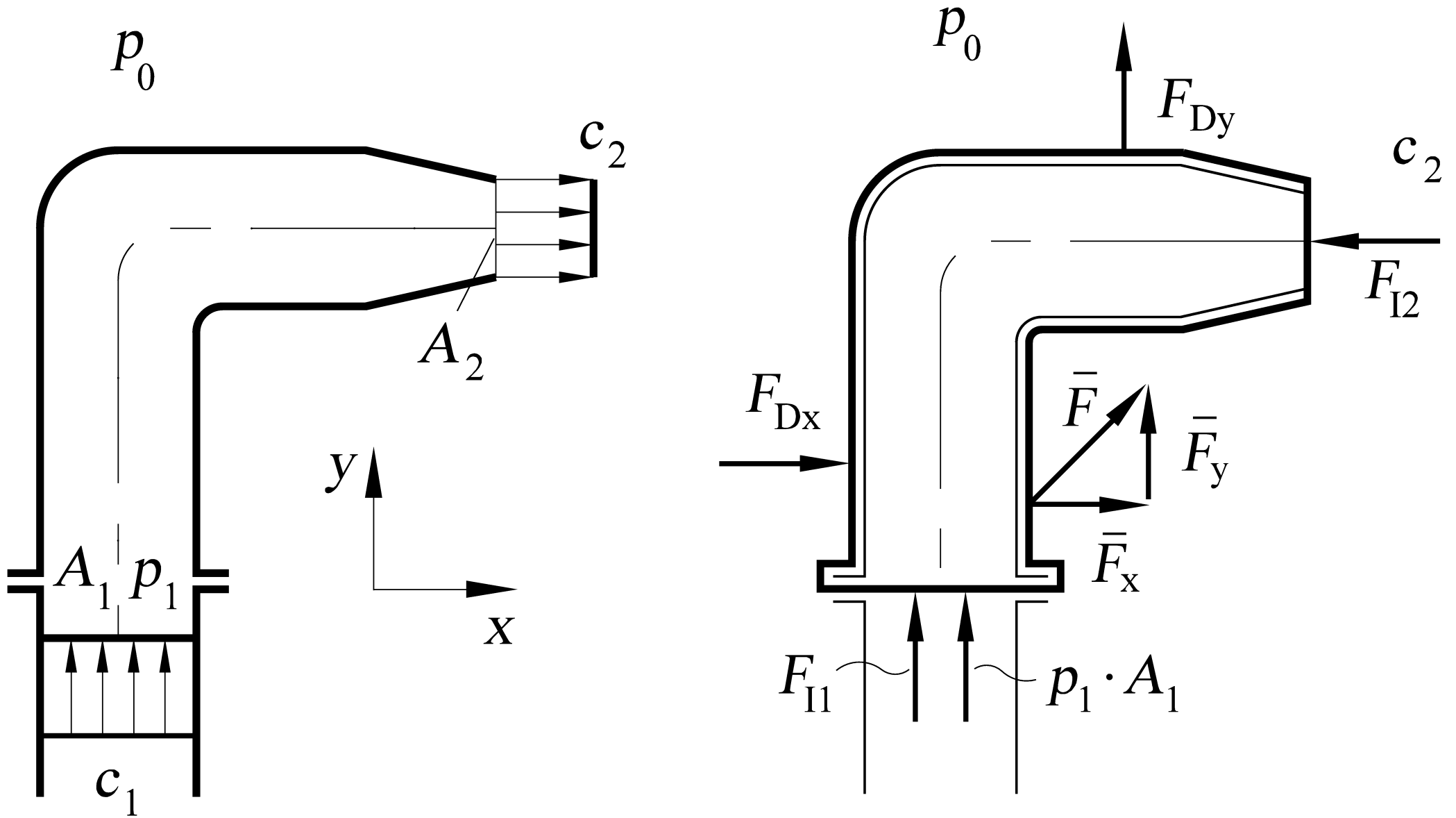
Radiales, halbaxiales und axiales Laufrad

Wirkungsgrad von Laufrädern

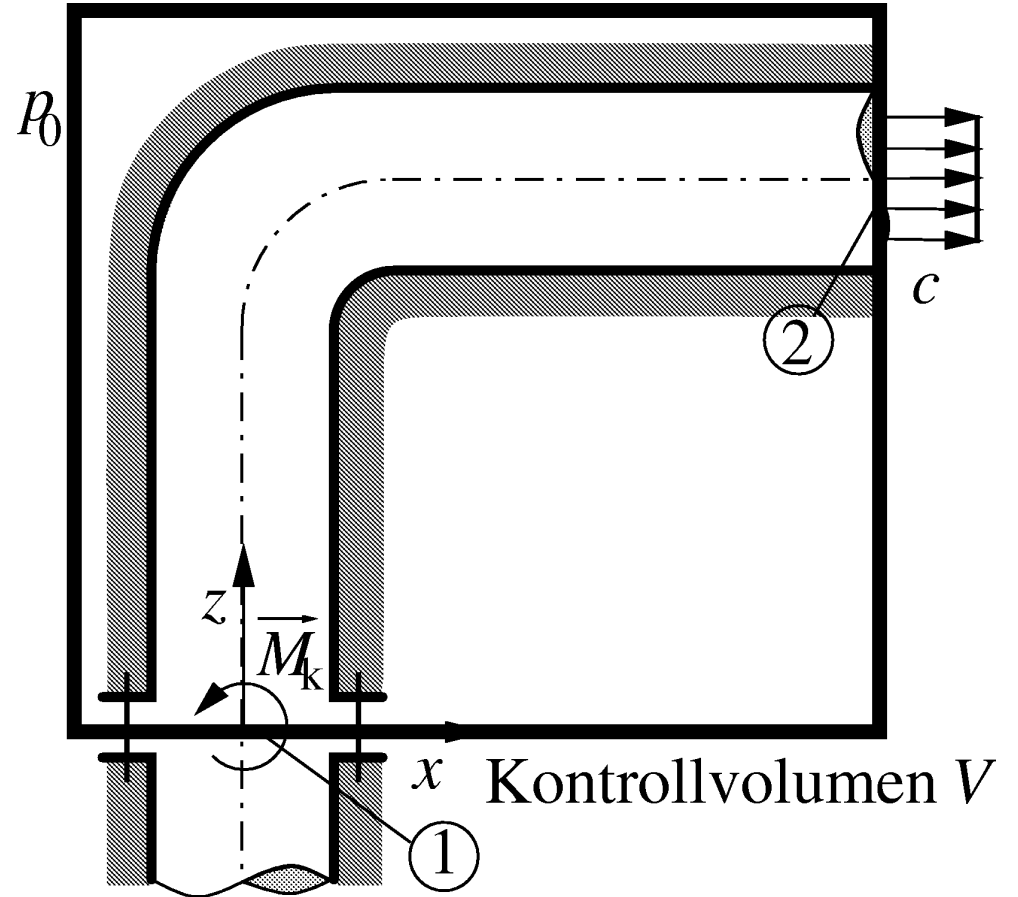
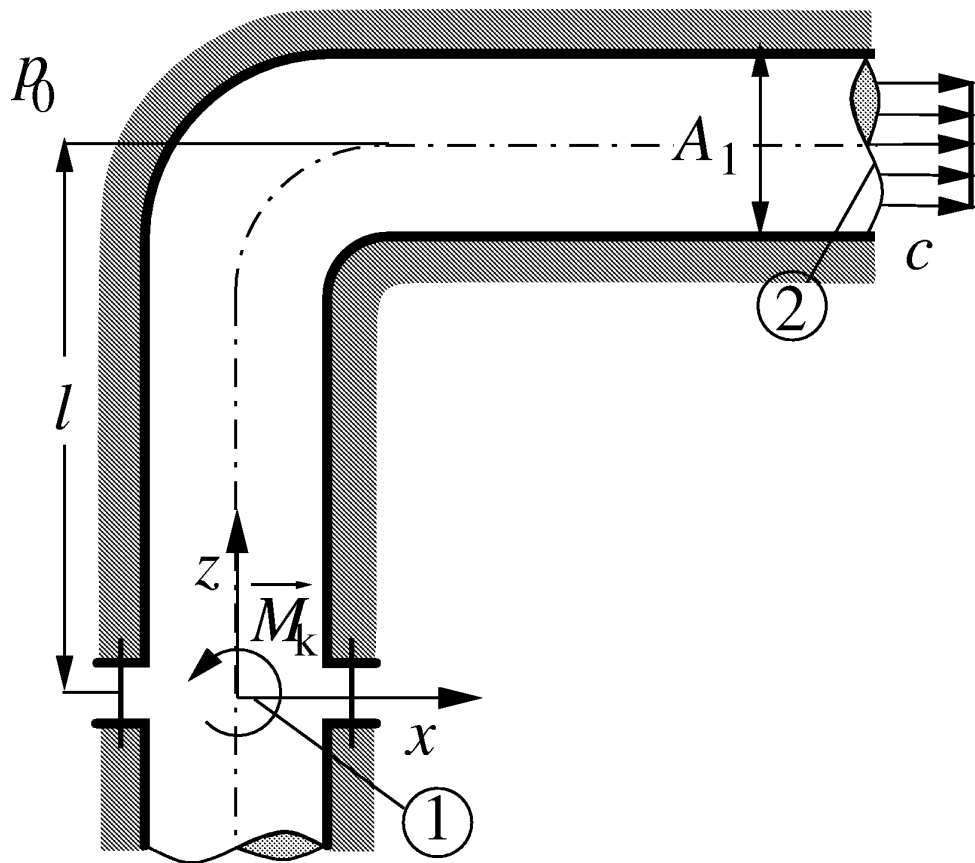
Größen am Radiallaufrad



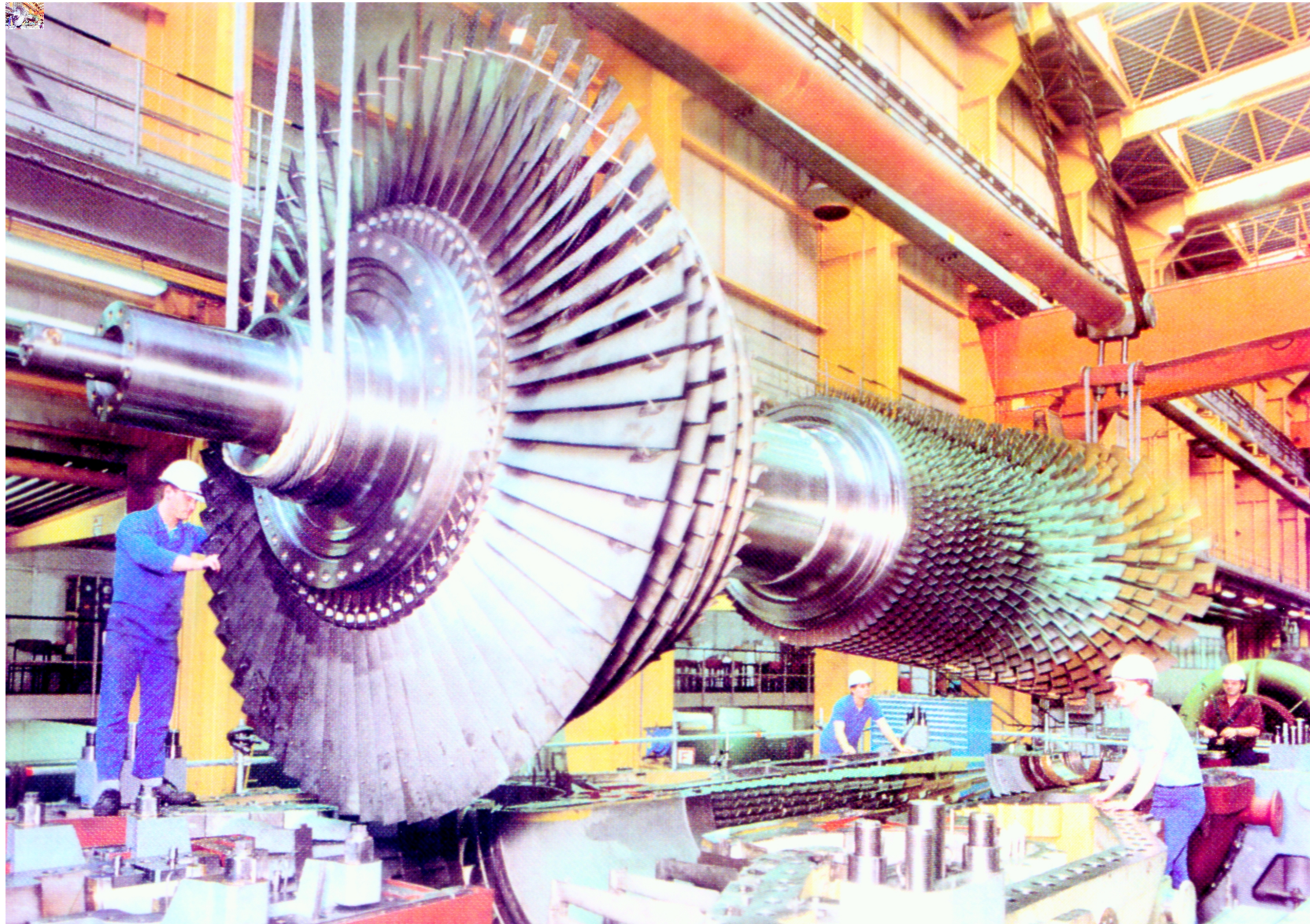
Kräfte am Rohrkrümmer



Momente am Rohrkrümmer

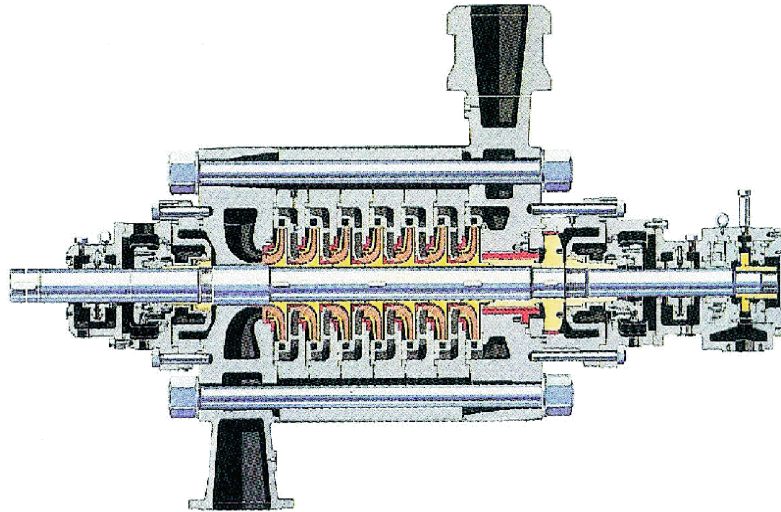


Gasturbine

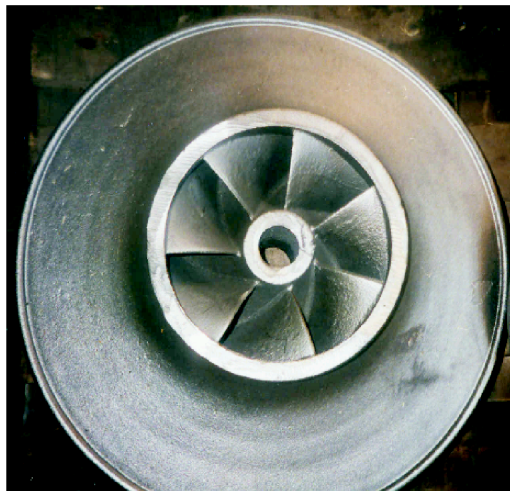
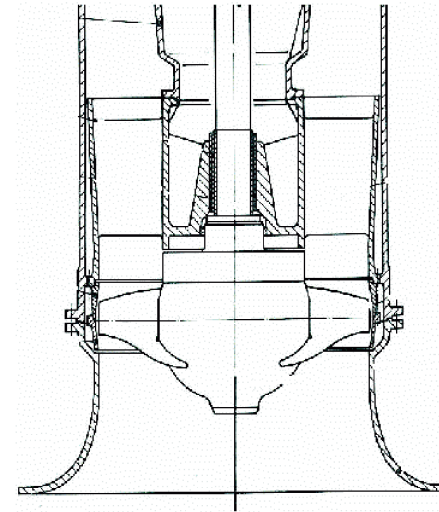


Pumpe mit radialem und axialem Laufrad

Radialmaschine



Axialmaschine



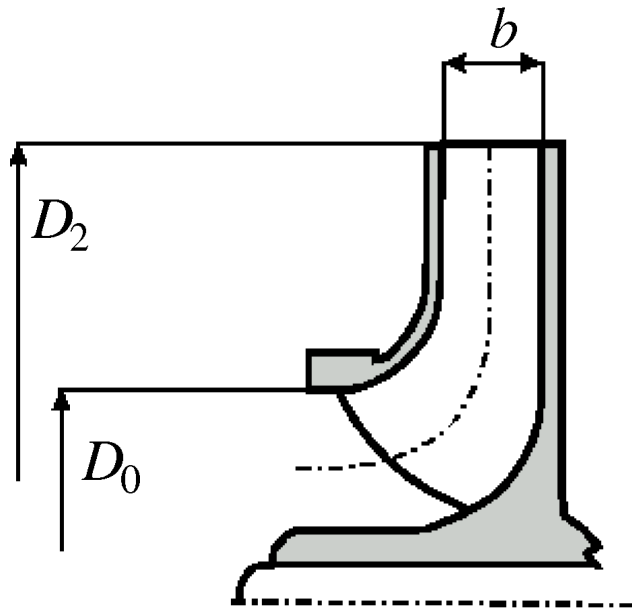
radiales Laufrad



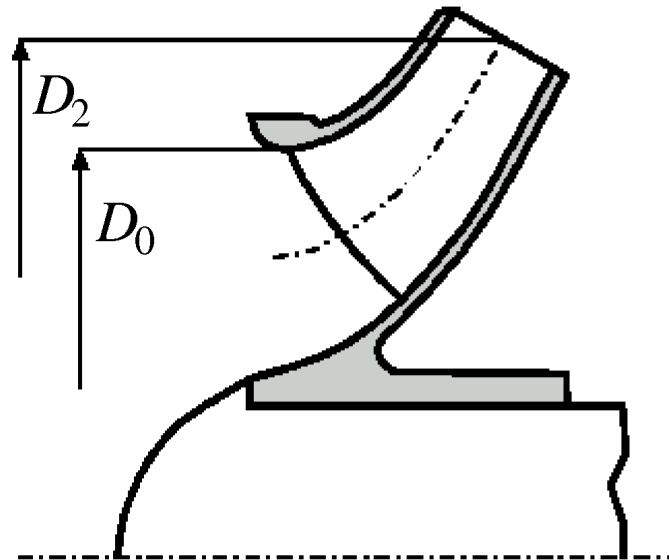
axiales Laufrad



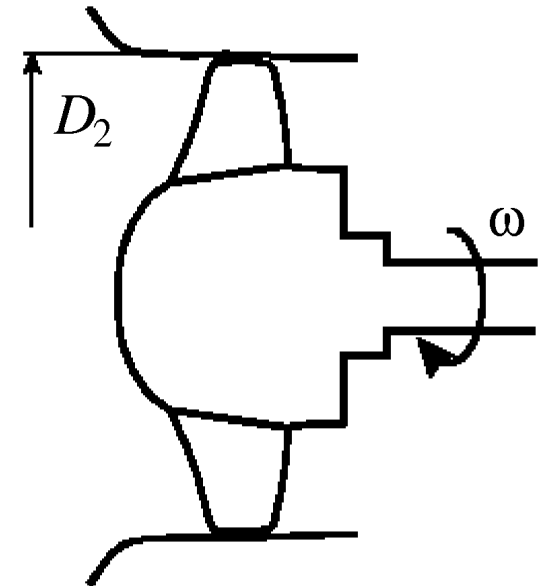
Radiales, halbaxiales und axiales Laufrad



radiales Laufrad



halbaxiales Laufrad

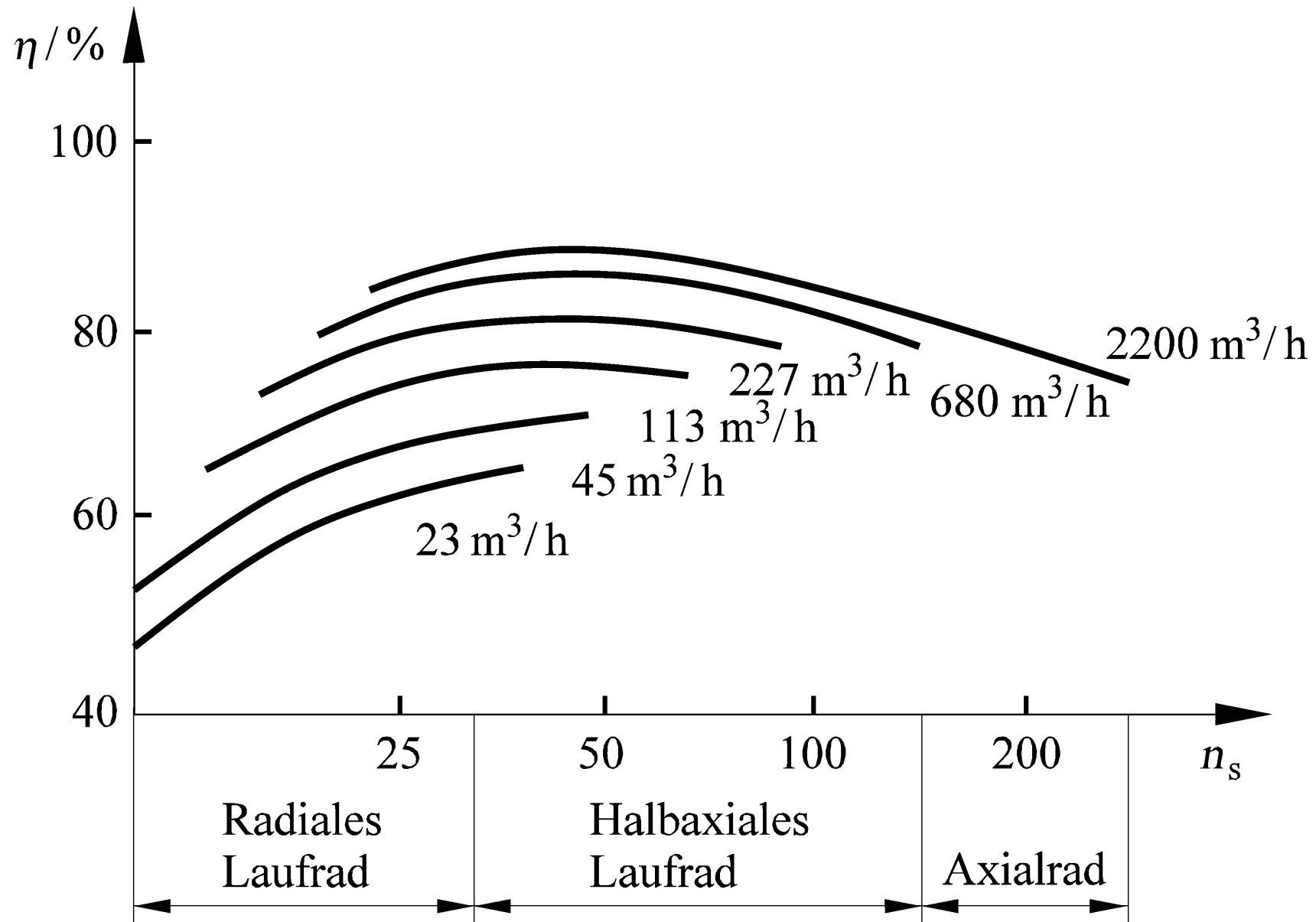


axiales Laufrad

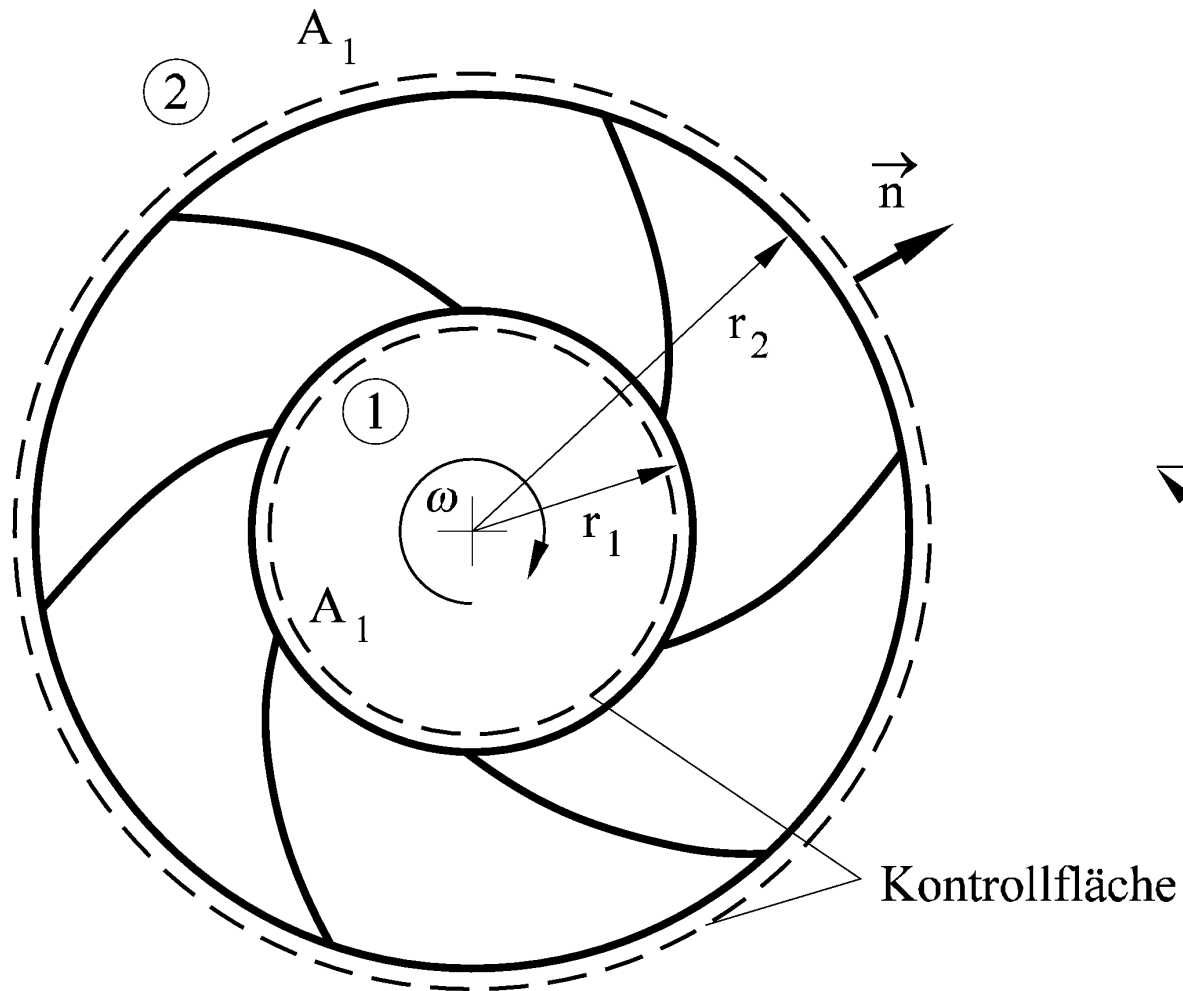
zunehmende spezifische Drehzahl n_s



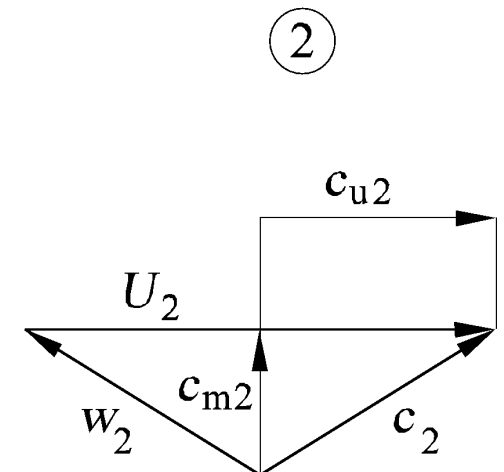
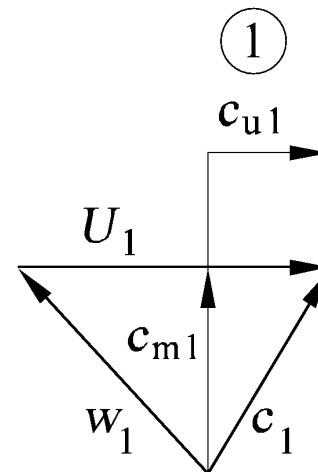
Wirkungsgrad von Laufrädern als Funktion von Drehzahl und Volumenstrom



Größen am Radiallaufrad



Geschwindigkeitsdreiecke an den Stellen

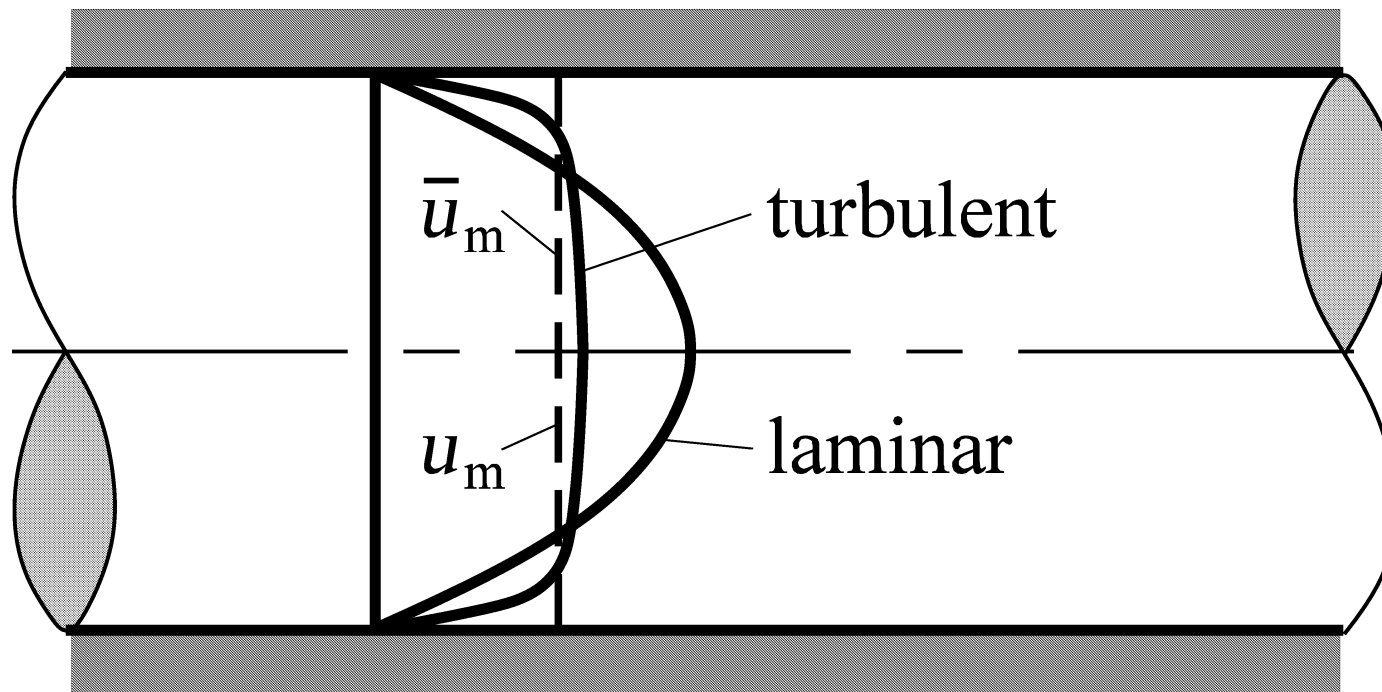


Geschwindigkeitsprofile, laminare und turbulente Rohrströmung

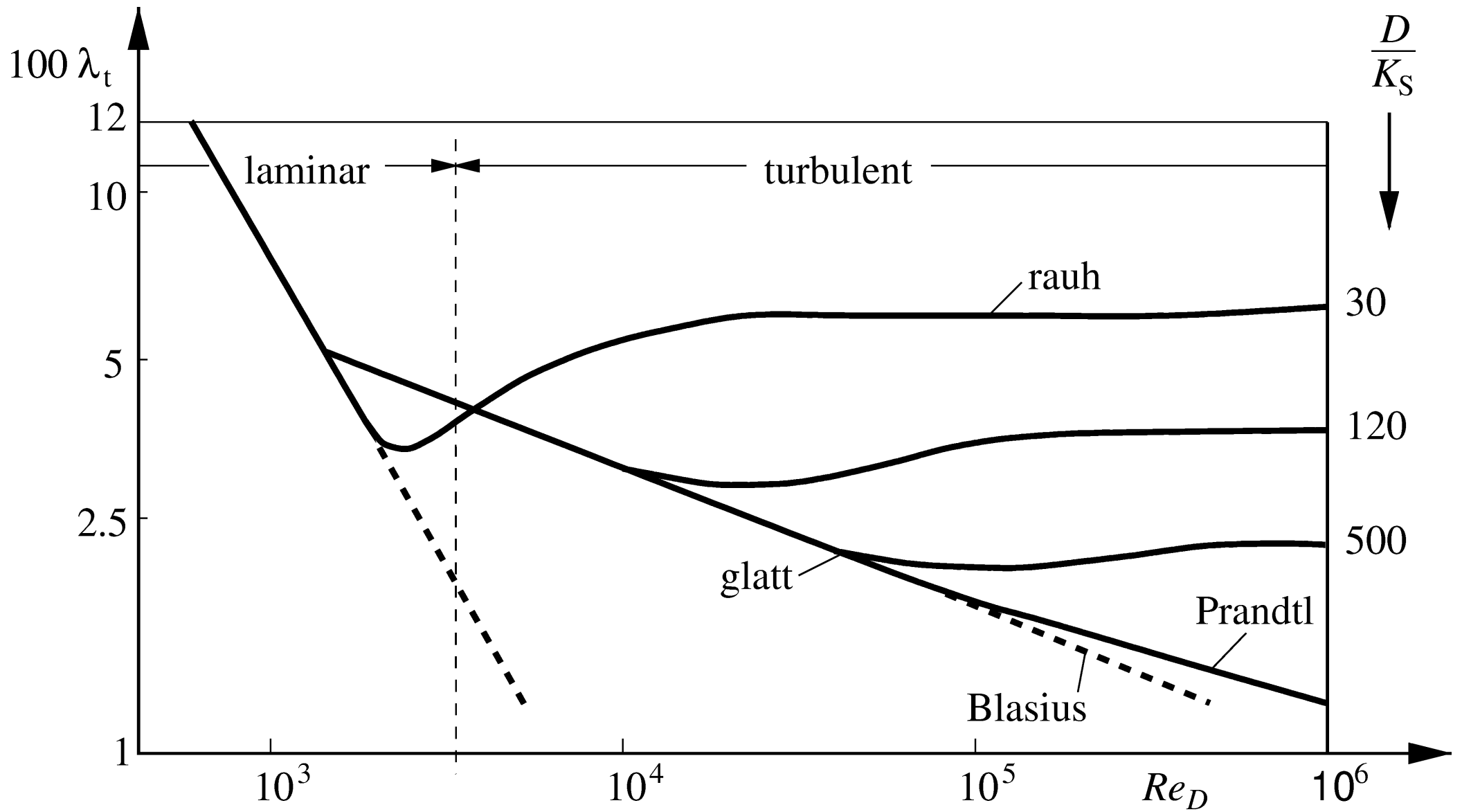
Nikuradse-Diagramm



Geschwindigkeitsprofile der laminaren und turbulenten Rohrströmung



Nikuradse-Diagramm



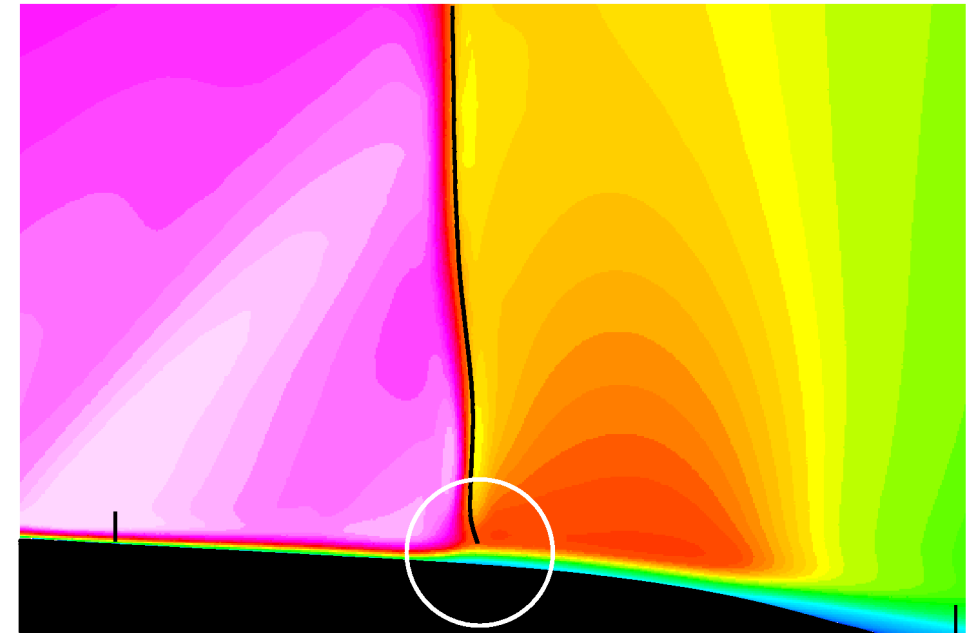
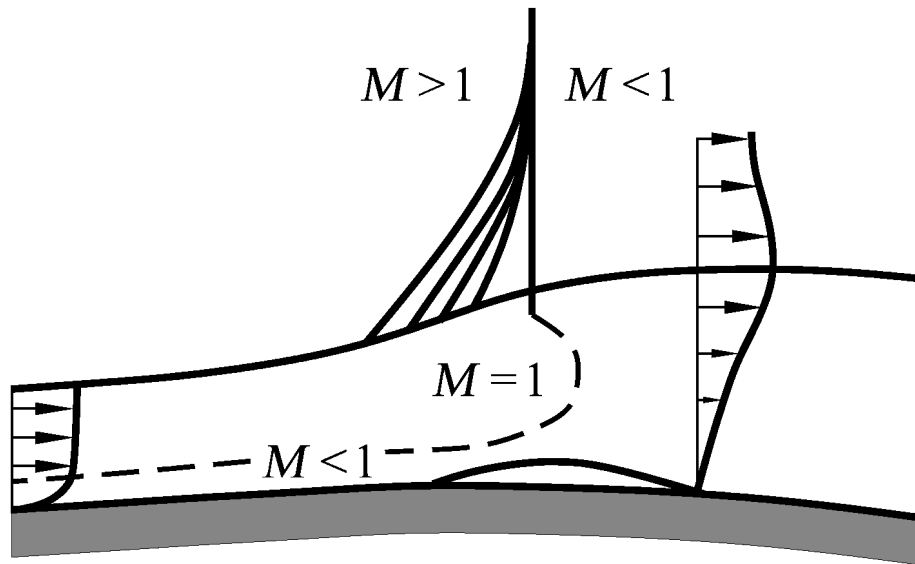
Stoßinduzierte Strömungsablösung, transsonischer Tragflügel

Strömungsablösung im Kanalkrümmen

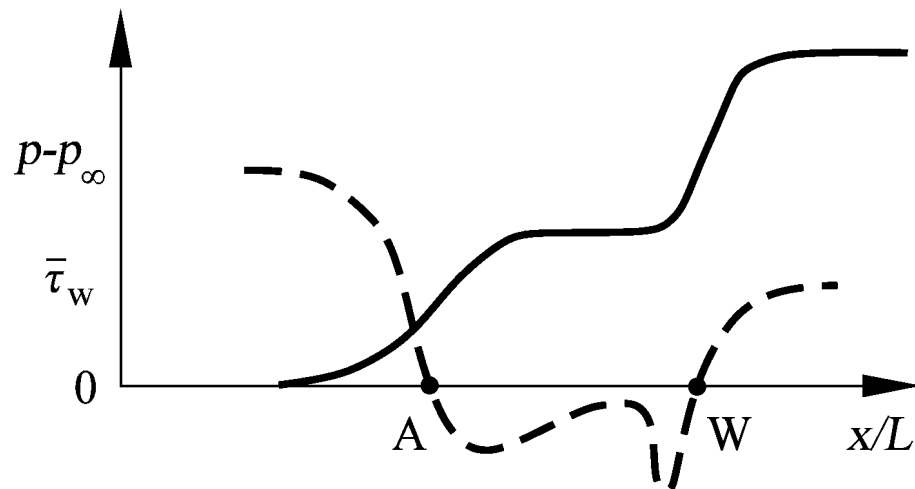
Sekundärströmung im gekrümmten Rohr



Stoßinduzierte Strömungsablösung, transsonisches Flügelprofil



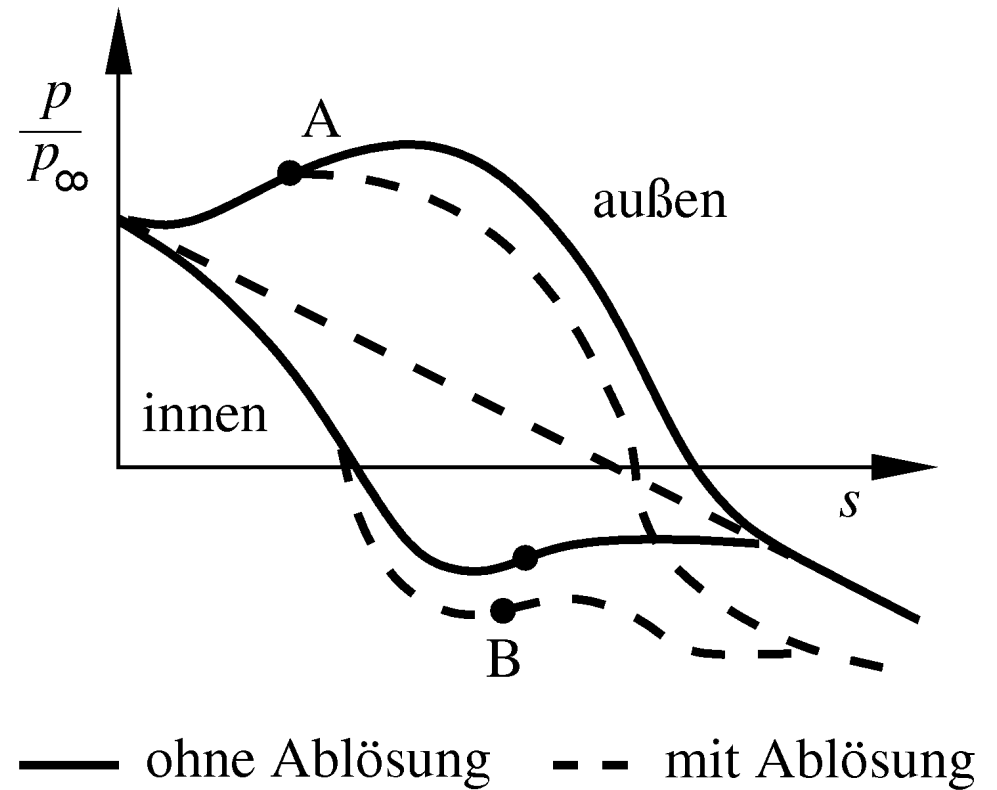
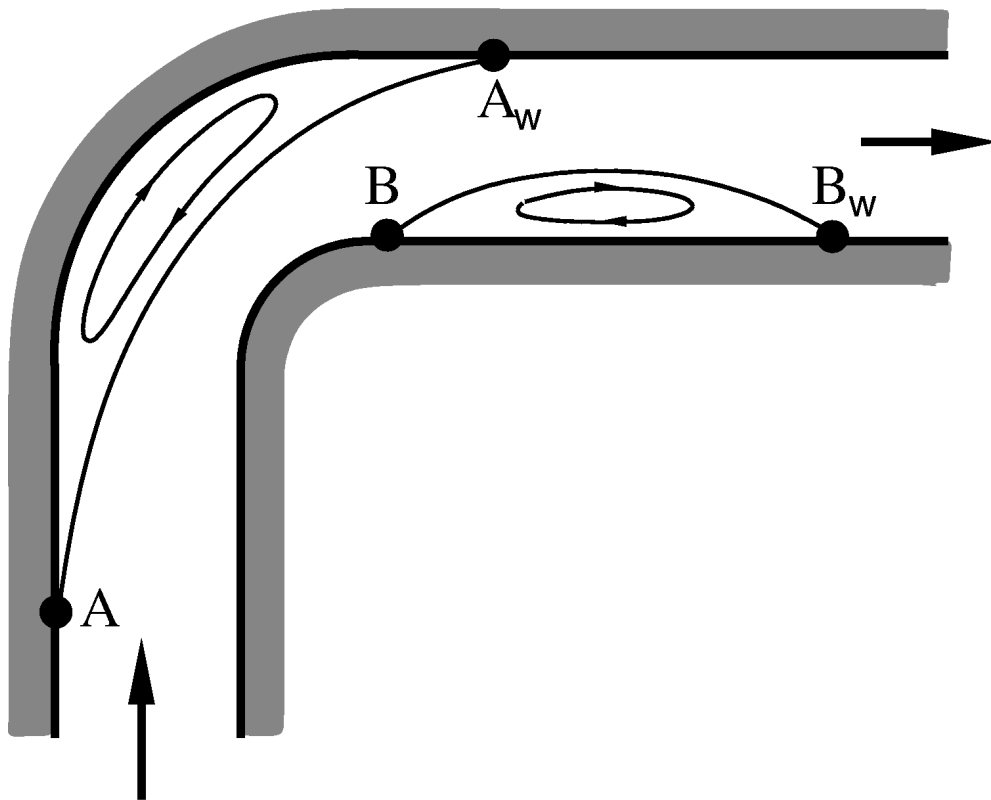
Mach-Zahlverteilung auf dem Profil



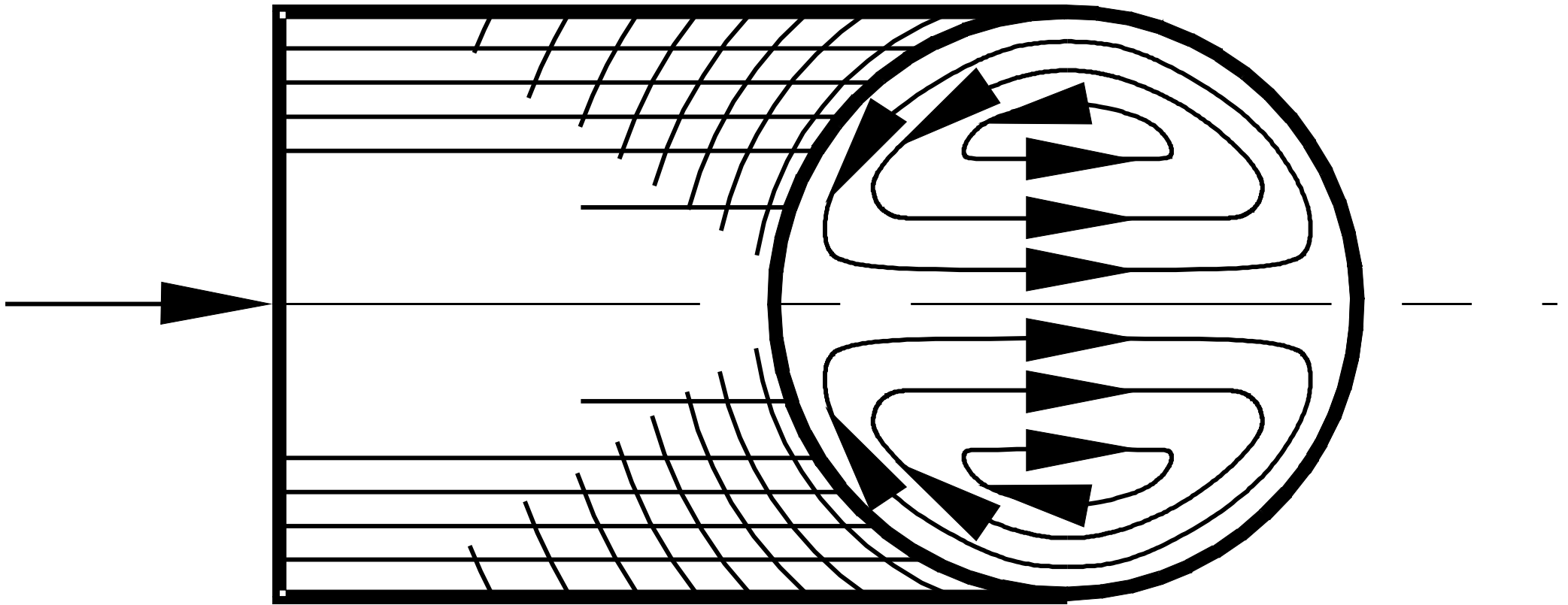
Ablösung Wiederanlegen



Strömungsablösung im Kanalkrümmung



Sekundärströmung im gekrümmten Rohr



Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen



Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v}$$

Strömung	lokale Beschleunigung	konvektive Beschleunigung	Druck	Reibung
Rohrströmung			✓	✓
Platten-grenzschicht		✓		✓
Zylinder-umströmung		✓	✓	✓
Kármánsche Wirbelstraße	✓	✓	✓	✓
Profil-umströmung	✓	✓	✓	✓



Verifikationsbeispiele

Verifikation: laminare Plattengrenzschicht

Verifikation: lokaler Reibungsbeiwert, laminare Plattengrenzschicht

Verifikation: turbulente Plattengrenzschicht

Verifikation: lokaler Reibungsbeiwert, turbulente Plattengrenzschicht

Verifikation: transsonisches RAE 2822 - Profil

Verifikation: Mach-Zahlverteilung, transsonisches RAE 2822 - Profil

Verifikation: Druckverteilung, transsonisches RAE 2822 - Profil

Druck- und Mach-Zahlverteilung, transsonischer Tragflügel

Transsonischer Tragflügel mit Bump



Verifikationsbeispiele

stationäre Umströmungen
laminare Plattengrenzschicht
turbulente Plattengrenzschicht (Turbulenzmodelle)
transsonisches Profil (RAE 2822)
transsonischer Tragflügel (ONERA M6)
SAE-Kraftfahrzeugkörper

stationäre Innenströmungen
laminare Rohrströmung
turbulente Rohrströmung (Turbulenzmodelle)
rückwärts geneigte Stufe (Turbulenzmodelle)
Profil eines Axialverdichters
Radialpumpe

Prallstrahl mit Wärmeübergang

Konvektionsströmung

instationäre Umströmungen
Rayleigh–Stokes–Problem
laminare Kármánsche Wirbelstraße
turbulente Kármánsche Wirbelstraße

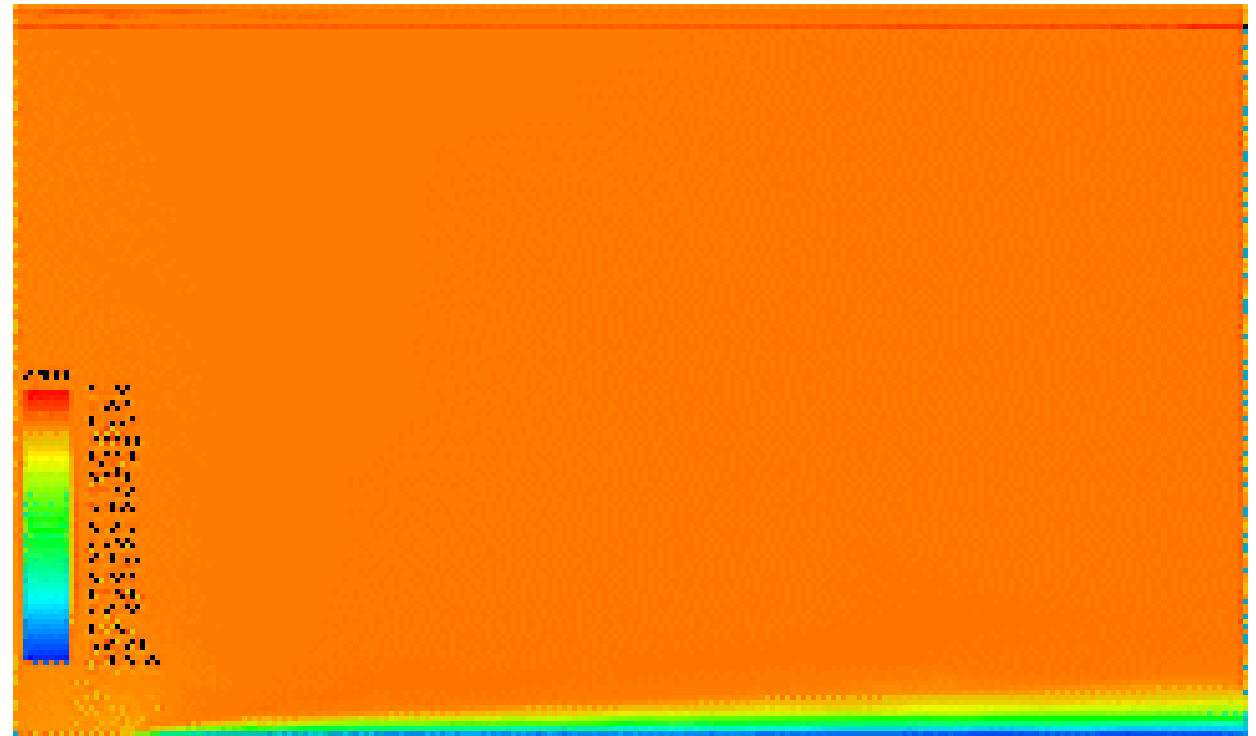
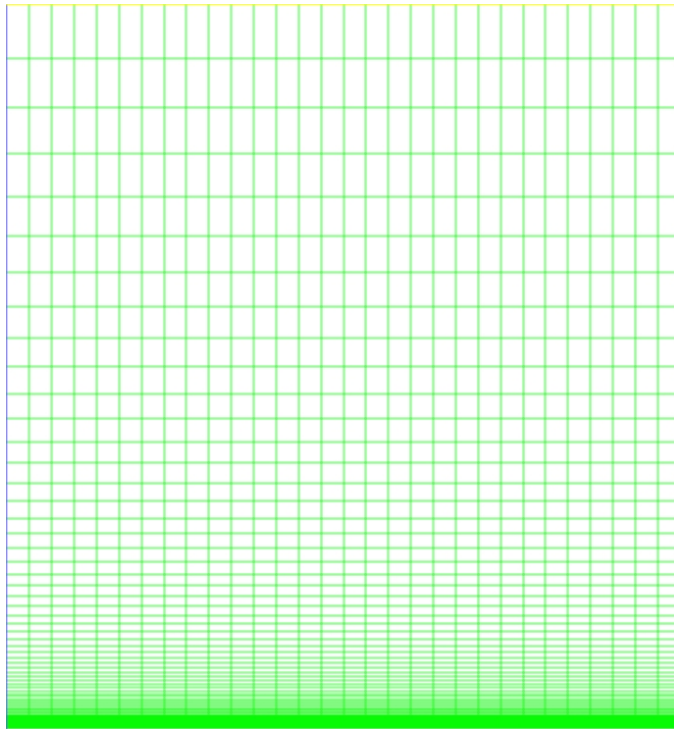
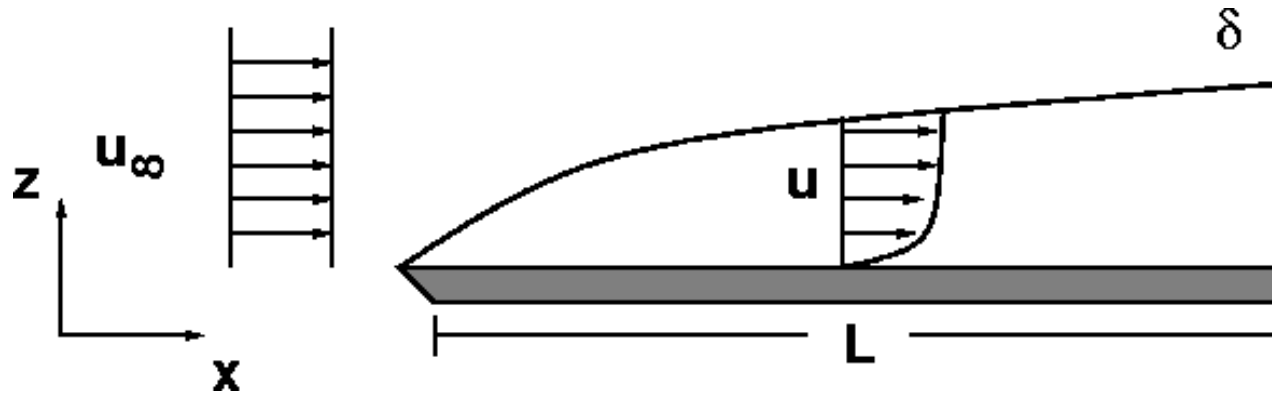
instationäre Innenströmungen
pulsierende Rohrströmung
Ventrikelströmung
Stoßrohr

Umströmungen

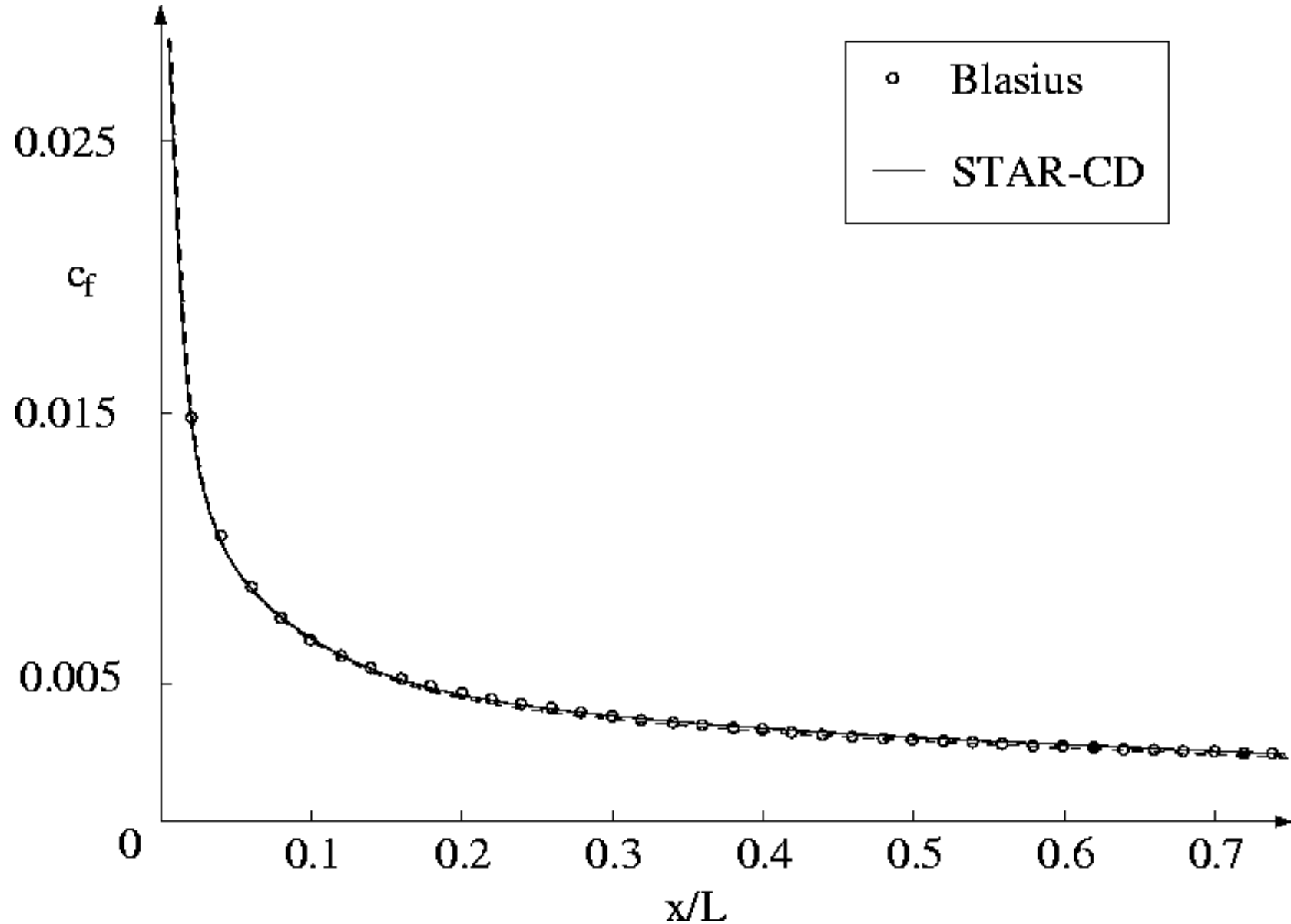
Innenströmungen



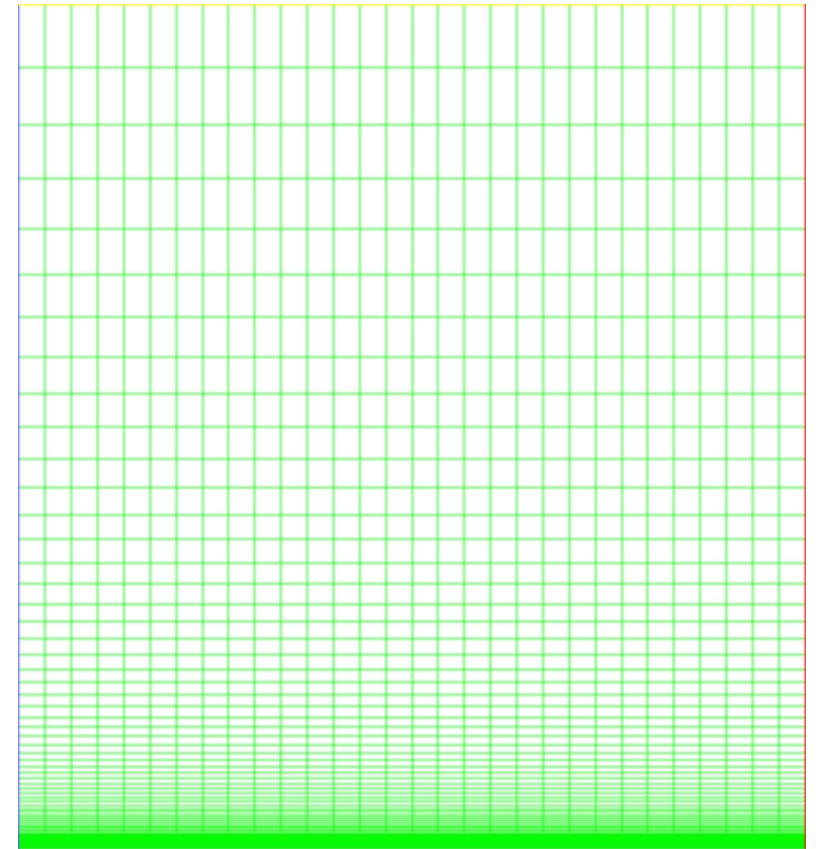
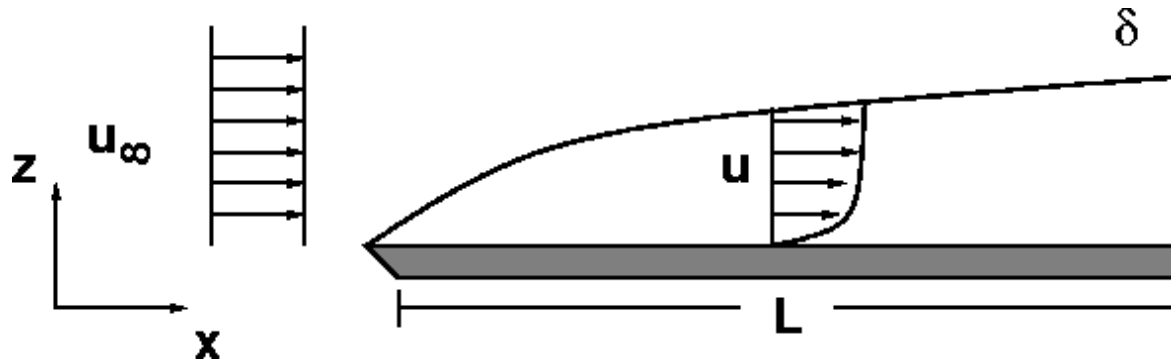
Verifikation: laminare Plattengrenzschicht



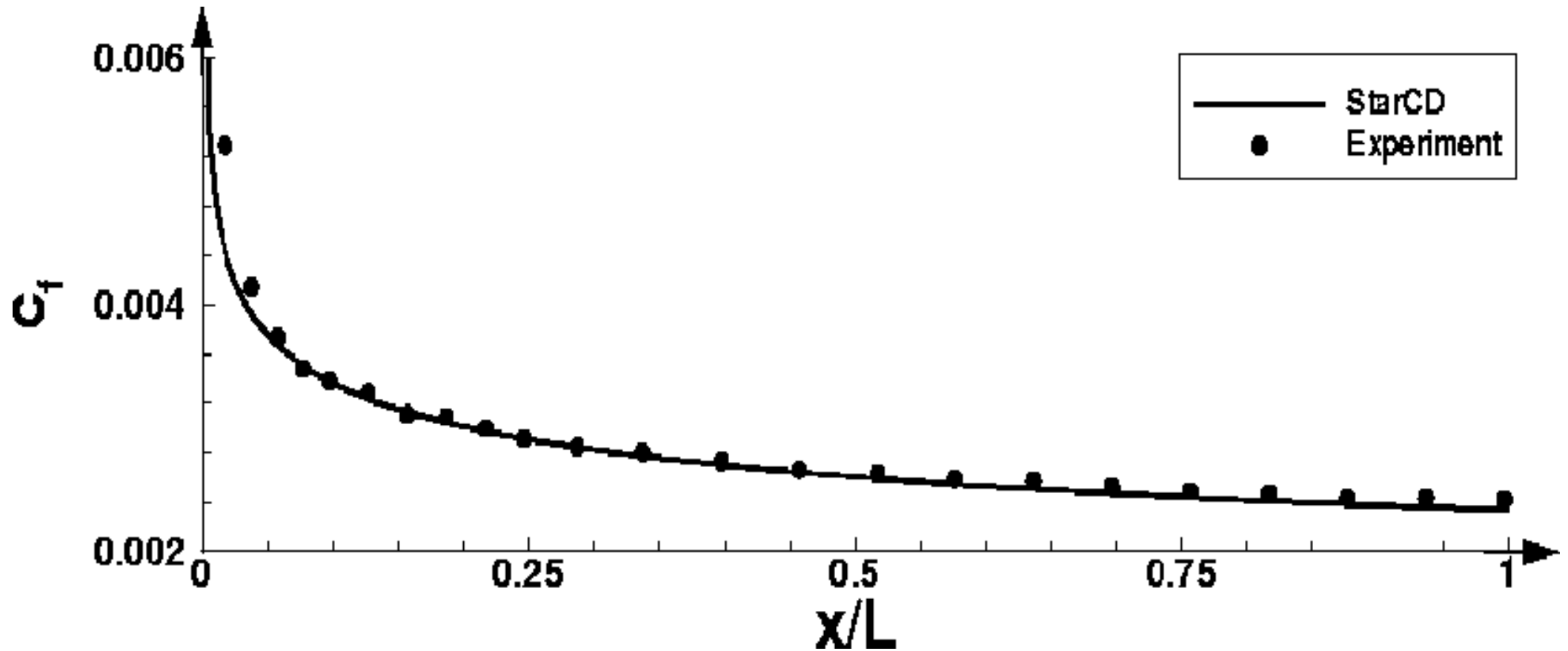
Verifikation: Lokaler Reibungsbeiwert der laminaren Plattengrenzschicht



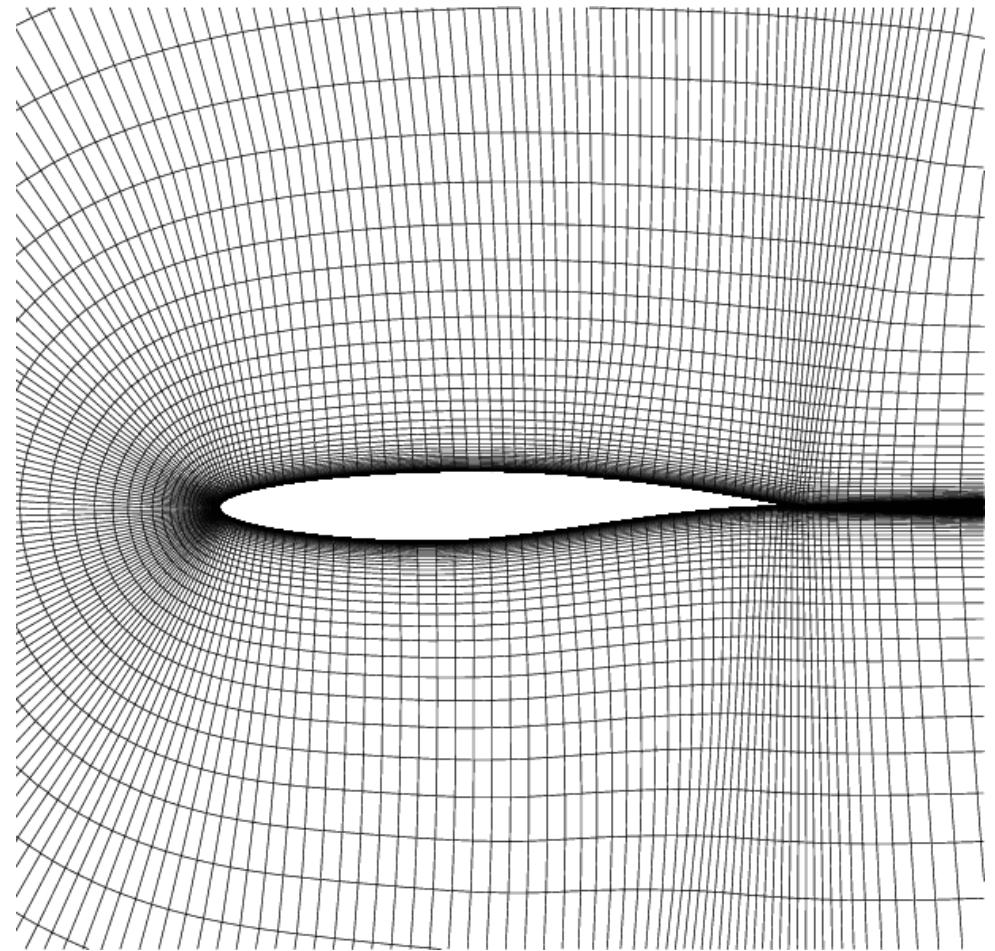
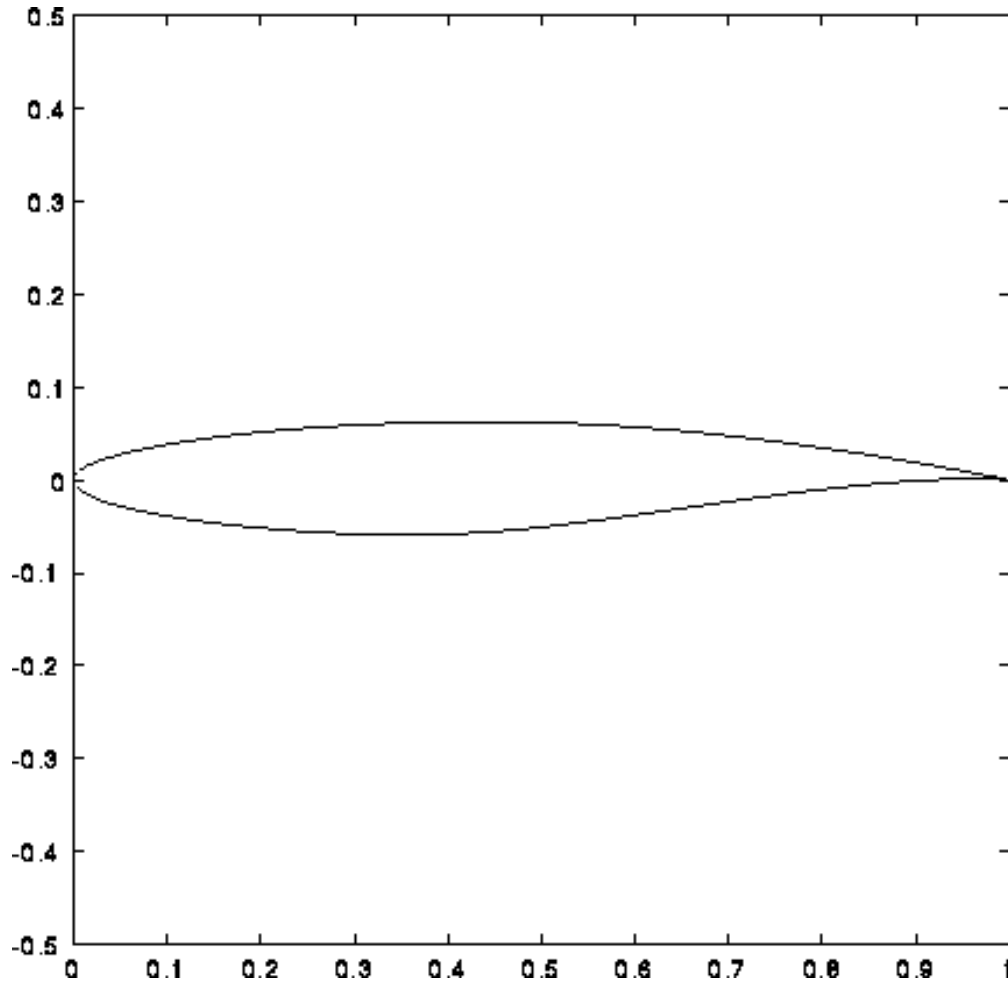
Verifikation: turbulente Plattengrenzschicht



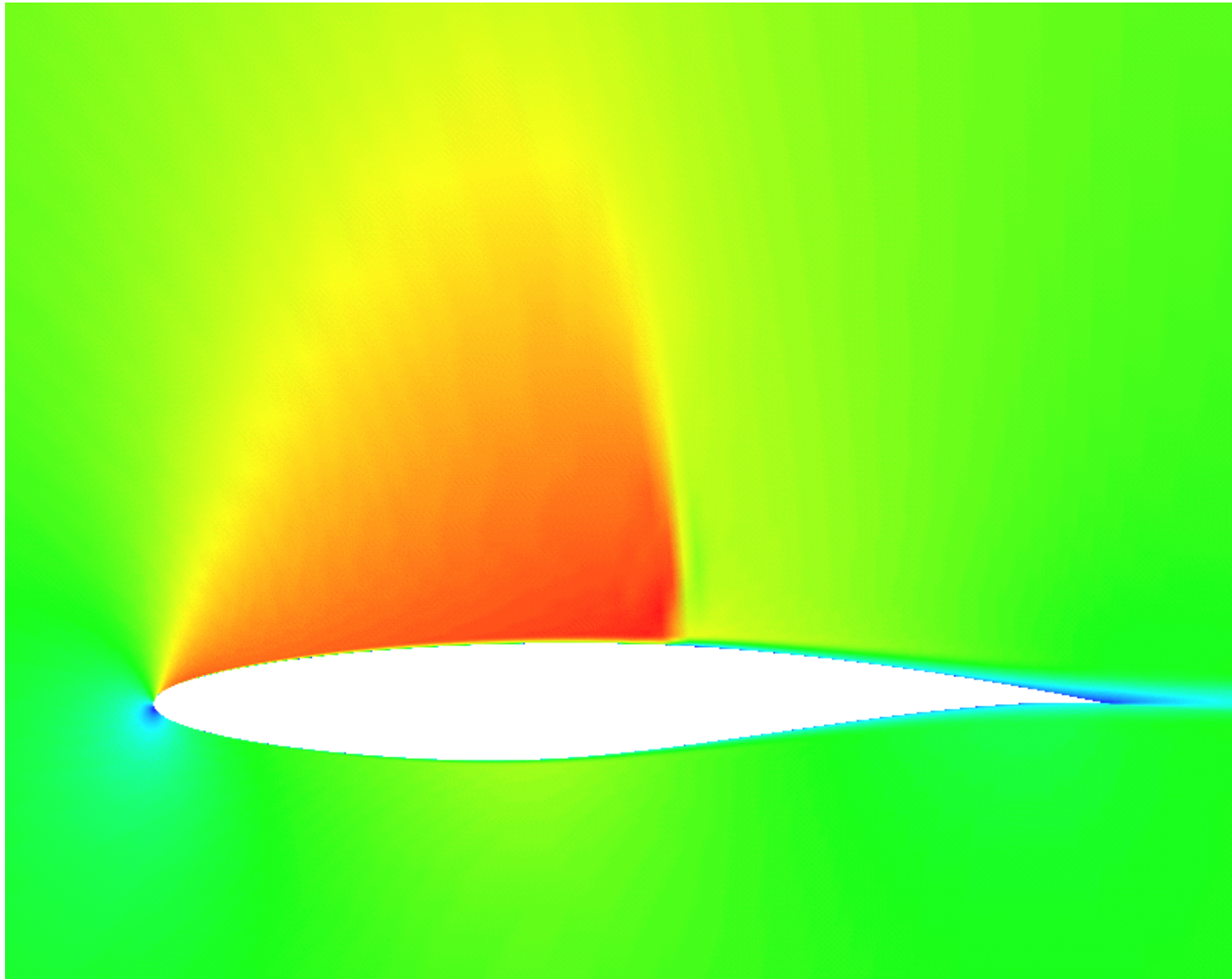
Verifikation: Lokaler Reibungsbeiwert der turbulenten Plattengrenzschicht



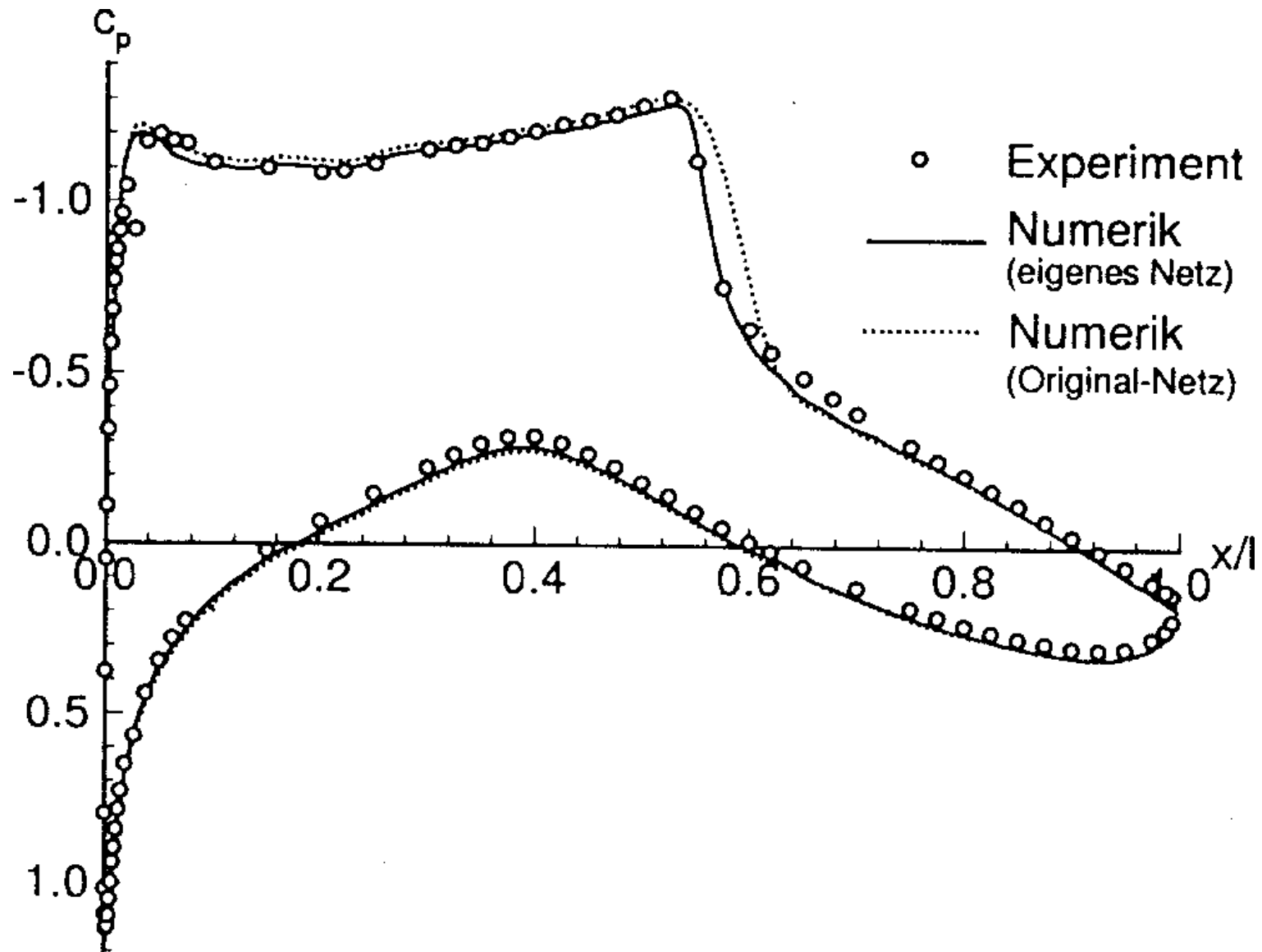
Verifikation: transsonisches RAE 2822 - Profil



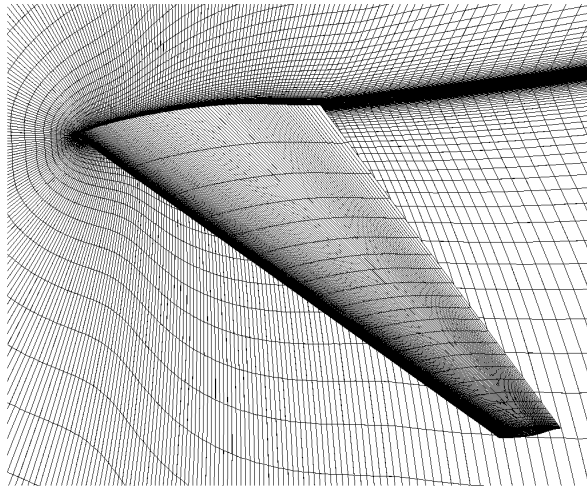
Verifikation: Mach-Zahlverteilung des transsonischen RAE 2822 - Profils



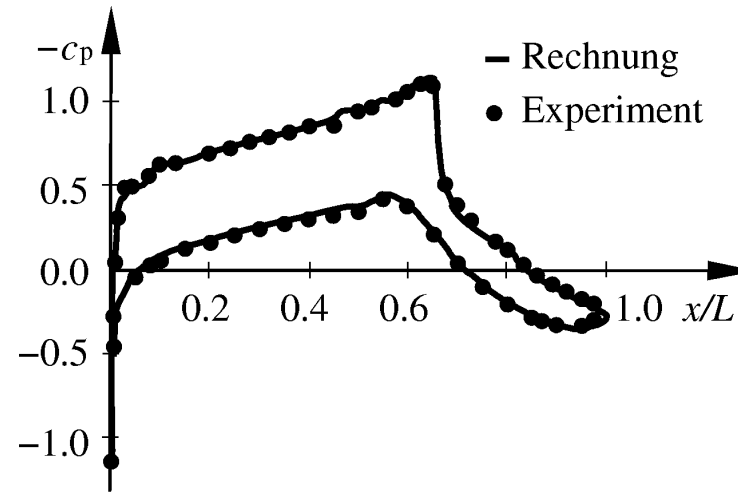
Verifikation: Druckverteilung des transsonischen RAE 2822 - Profils



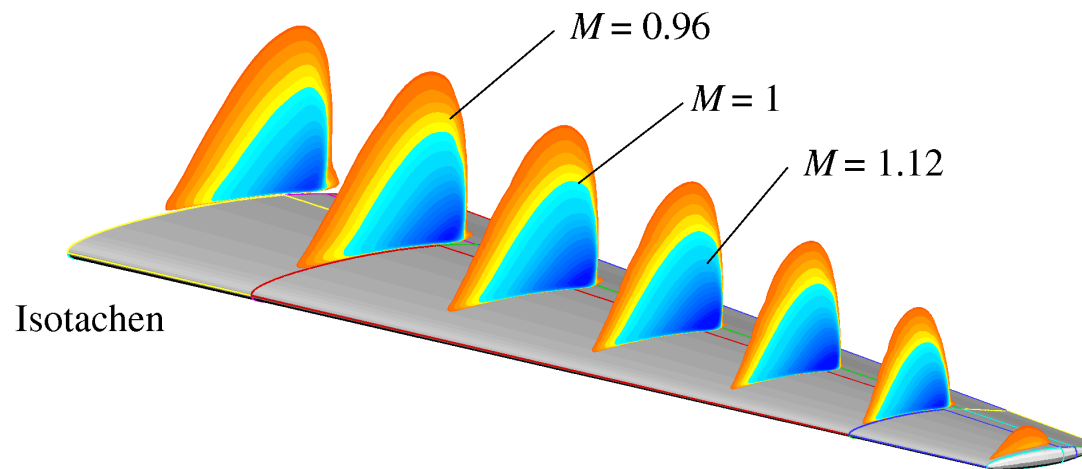
Druck- und Mach-Zahlverteilung, transsonischer Tragflügel



Finite-Volumen-Netz, 8 10⁶ Gitterpunkte



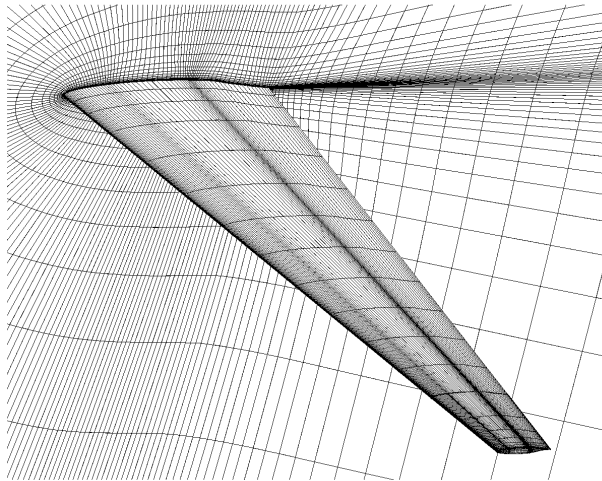
Druckverteilung



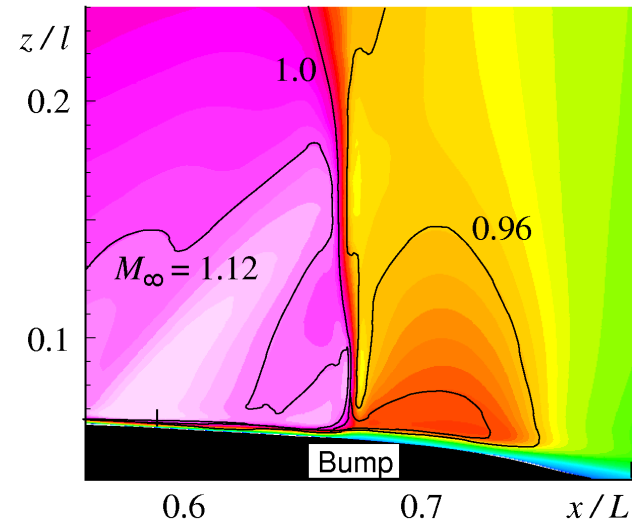
Isotachen



Transsonischer Tragflügel mit Bump



Rechennetz, $1.2 \cdot 10^6$ Gitterpunkte



Isotachen, $y/s = 0.66$

