

Vorlesungsübersicht

Vorlesungsinhalt, Strömungslehre

Vorlesungsinhalt, Kapitel 1

Vorlesungsinhalt, Kapitel 2

Vorlesungsinhalt, Kapitel 3

Vorlesungsinhalt, Kapitel
5



VORLESUNGEN

Strömungslehre

5

Angewandte
Strömungsmechanik

Math. Methoden
der Strömungslehre

6

Numerische
Strömungsmechanik

7

Trainings-Kurs

8

Diplomarbeit

Strömungsmechanik Kolleg



STRÖMUNGSLEHRE

- 1. Einführung**
 - 1.1 Strömungen in Natur und Technik
 - 1.2 Strömungsbereiche
 - 1.3 Produktentwicklung
- 2. Grundlagen der Strömungsmechanik**
 - 2.1 Eigenschaften strömender Medien
 - 2.2 Hydro- und Aerostatik
 - 2.3 Hydro- und Aerodynamik
 - 2.4 Berechnung von technischen Strömungen
- 3. Grundgleichungen der Strömungsmechanik**
 - 3.1 Kontinuitätsgleichung
 - 3.2 Navier-Stokes-Gleichung
 - 3.3 Energiegleichung
- 5. Strömungsmechanik - Software**
 - 5.1 Einführungskurs



STRÖMUNGSLEHRE

1. Strömungen in Natur und Technik

1.1 Strömungen in Natur und Technik

1.2 Strömungsbereiche

1.3 Produktentwicklung



STRÖMUNGSLEHRE

2. Grundlagen der Strömungsmechanik

2.1 Eigenschaften strömender Medien

2.1.1 Transporteigenschaften

2.1.2 Thermodynamische Eigenschaften

2.2 Hydro- und Aerostatik

2.2.1 Hydrostatik

2.2.2 Aerostatik

2.3 Hydro- und Aerodynamik

2.3.1 Kinematische Grundbegriffe

2.3.2 Inkompressible Strömungen

2.3.3 Kompressible Strömungen

2.4 Berechnung von technischen Strömungen

2.4.1 Turbulente Strömungen

2.4.2 Impulssatz

2.4.3 Drehimpulssatz

2.4.4 Rohrhydraulik

2.4.5 Umströmungen



STRÖMUNGSLEHRE

3. Grundgleichungen der Strömungsmechanik

3.1 Kontinuitätsgleichung

3.2 Navier-Stokes-Gleichung

3.2.1 Laminare Strömungen

3.2.2 Reynolds-Gleichungen für turbulente Strömungen

3.3 Energiegleichung

3.3.1 Laminare Strömungen

3.3.2 Turbulente Strömungen



STRÖMUNGSLEHRE

5. Strömungsmechanik - Software

5.1 Einführungskurs



Film: Faszination Strömungsmechanik

Strömungen in der Natur

Tiefdruckgebiet Nordhalbkugel

Windgeschwindigkeiten Erdkugel

Strömungen in Atmosphäre

Hurrikan Georges

Meeresströmungen im Atlantik

Drift der Kontinente

Supernova

Strömungen in der Technik

Storchenflügel, Hanggleiter Lilienthal

Airbus A380

Entwicklung
Verkehrsflugzeuge/Schienerfahrzeuge

Tragflügel im Windkanal

Airbus A340 im Windkanal

CFD Boeing 747

Mercedes-Benz W125 im Windkanal

Widerstandsentwicklung Kfz.

Nachlaufströmung Kraftfahrzeug

Abhebender Rennwagen, Petit Le Mans

Tacoma Brücke

Chemische Produktionsanlage

Experiment: Finger im Wasserstrahl

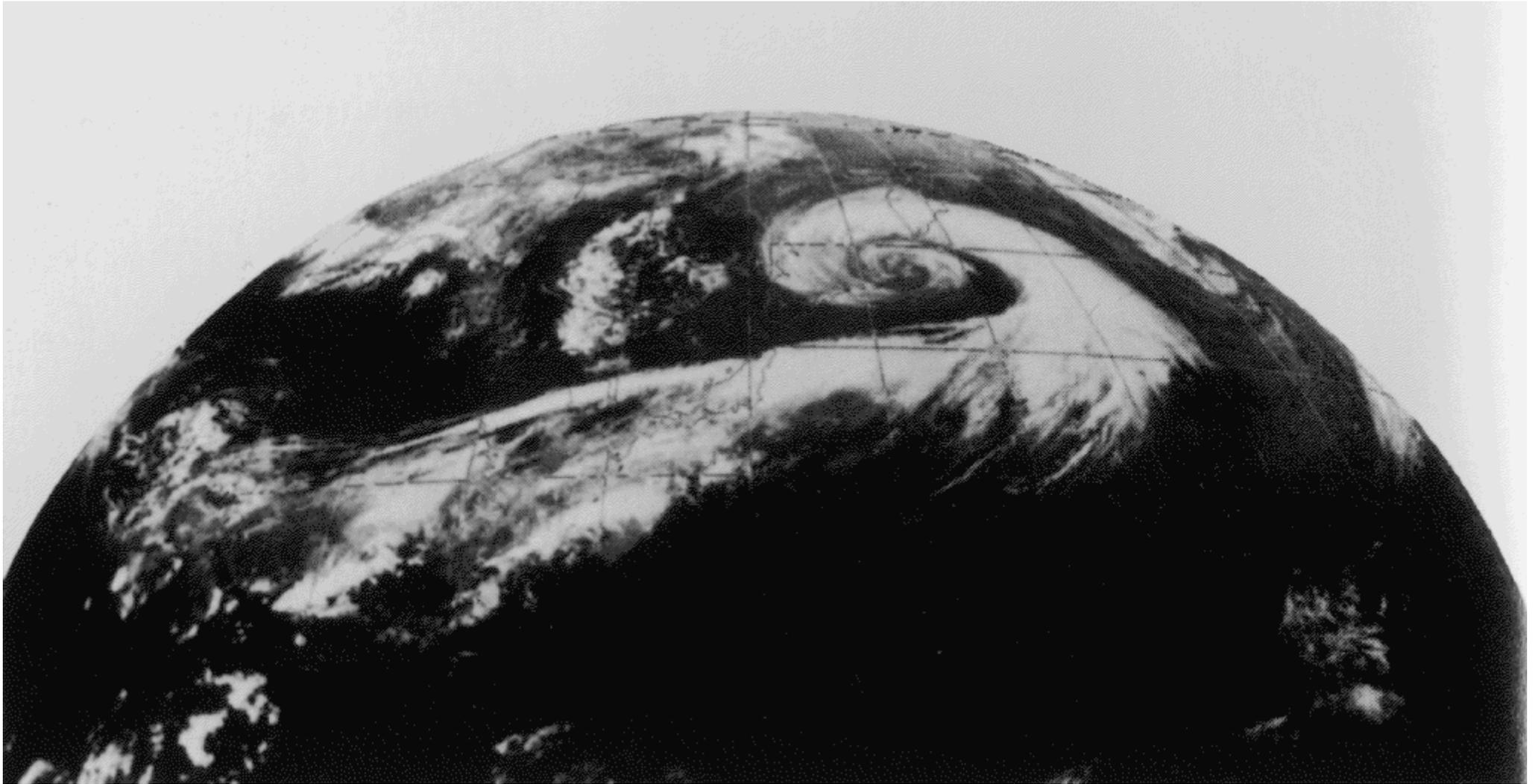
Experiment: Kraftwirkung im Windkanal



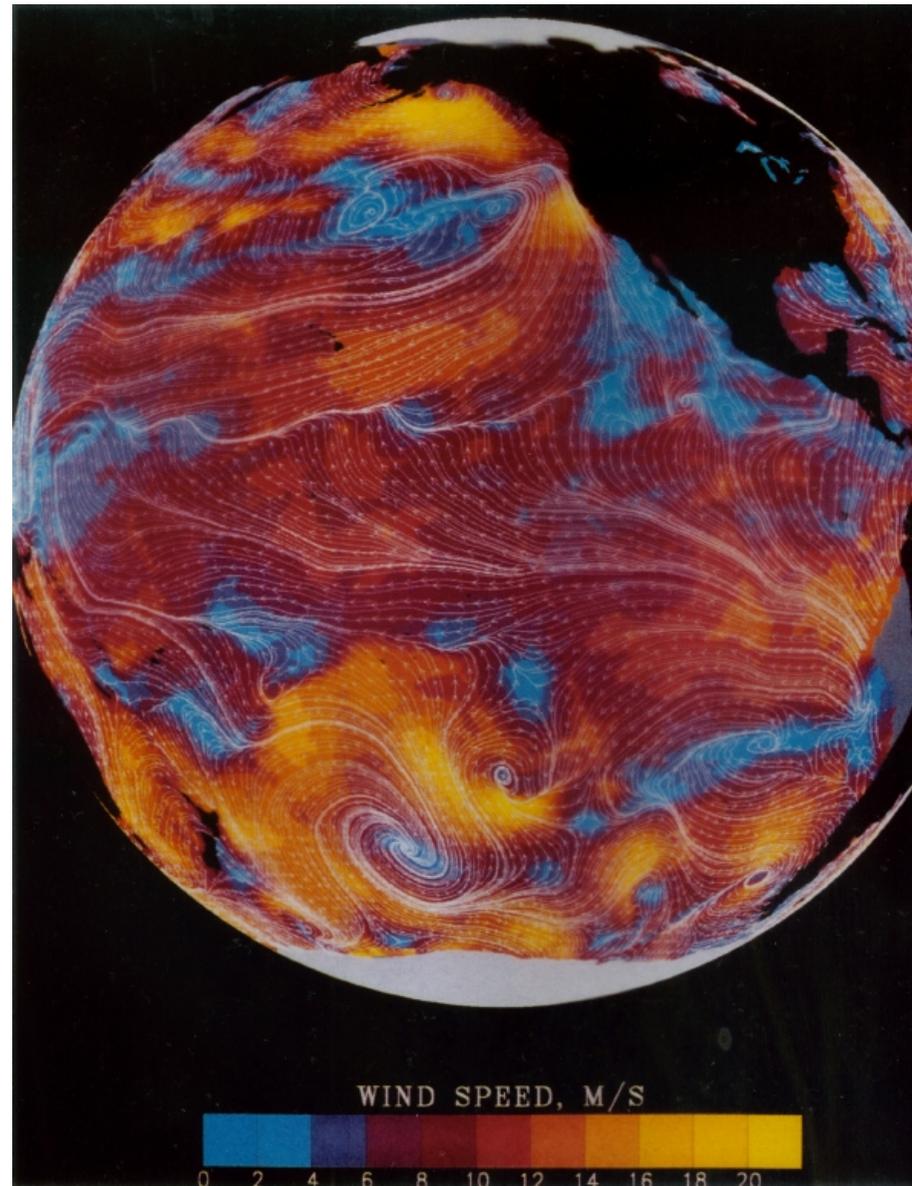
Film: Faszination Strömungsmechanik



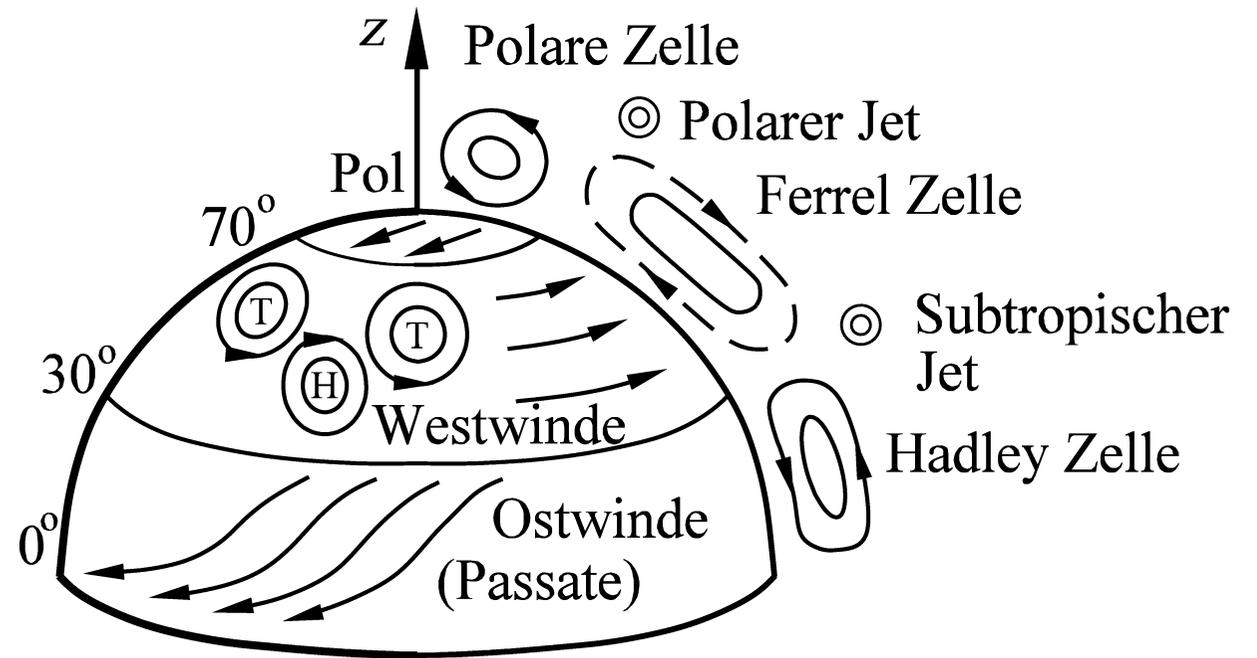
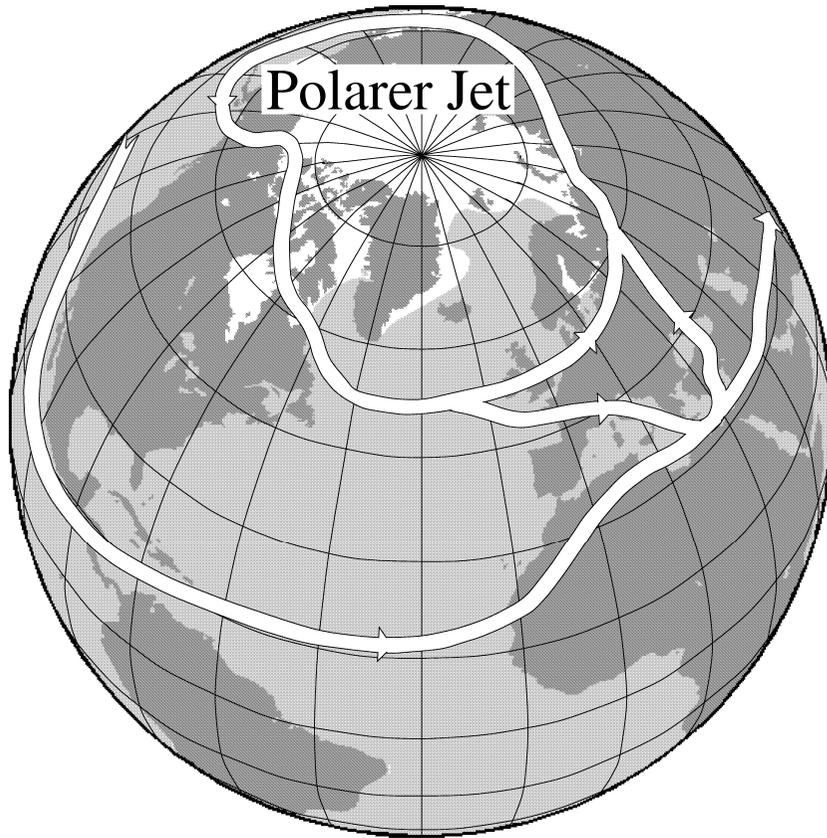
Tiefdruckgebiet auf der nördlichen Erdhalbkugel



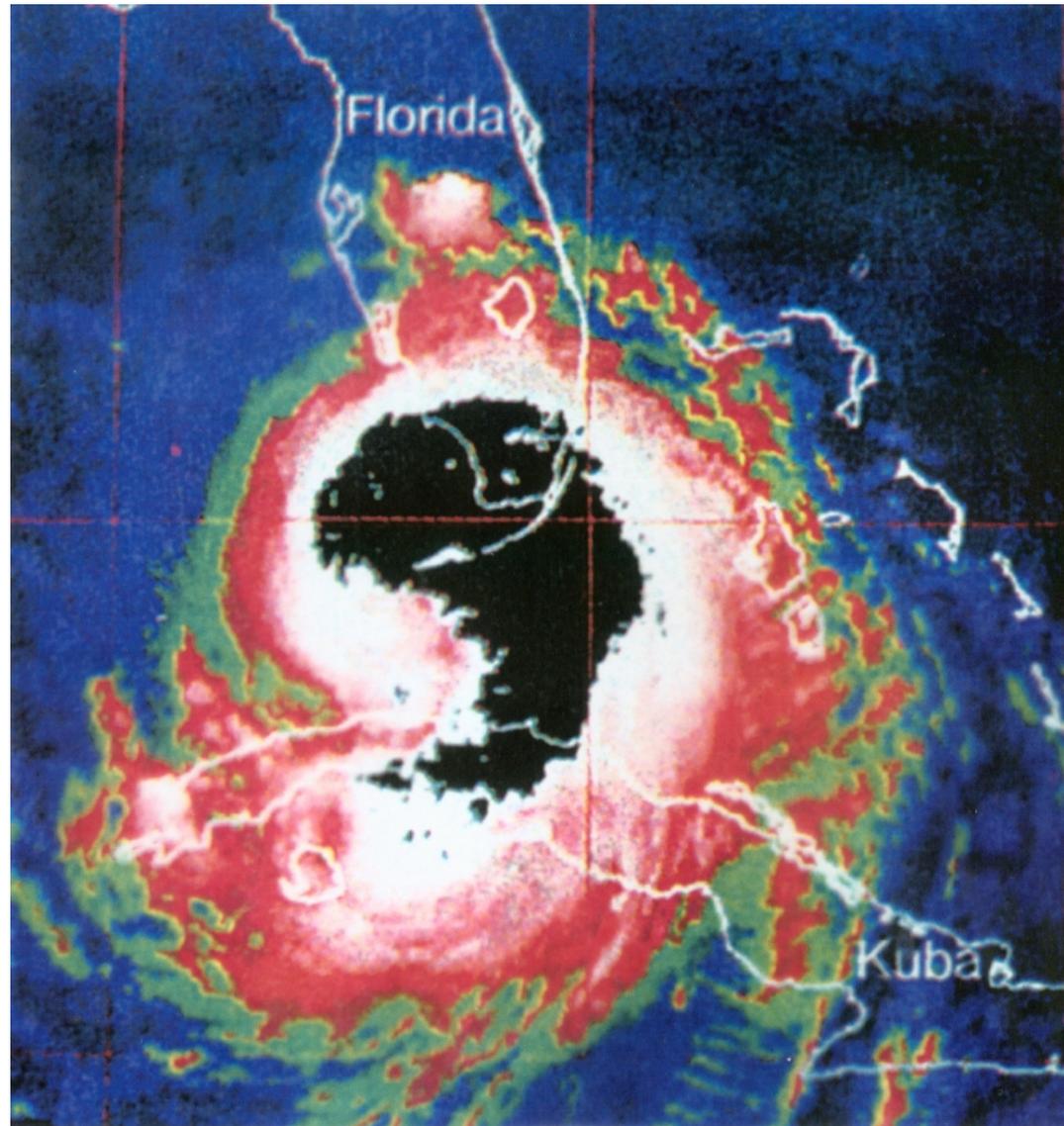
Windgeschwindigkeiten auf der Erde



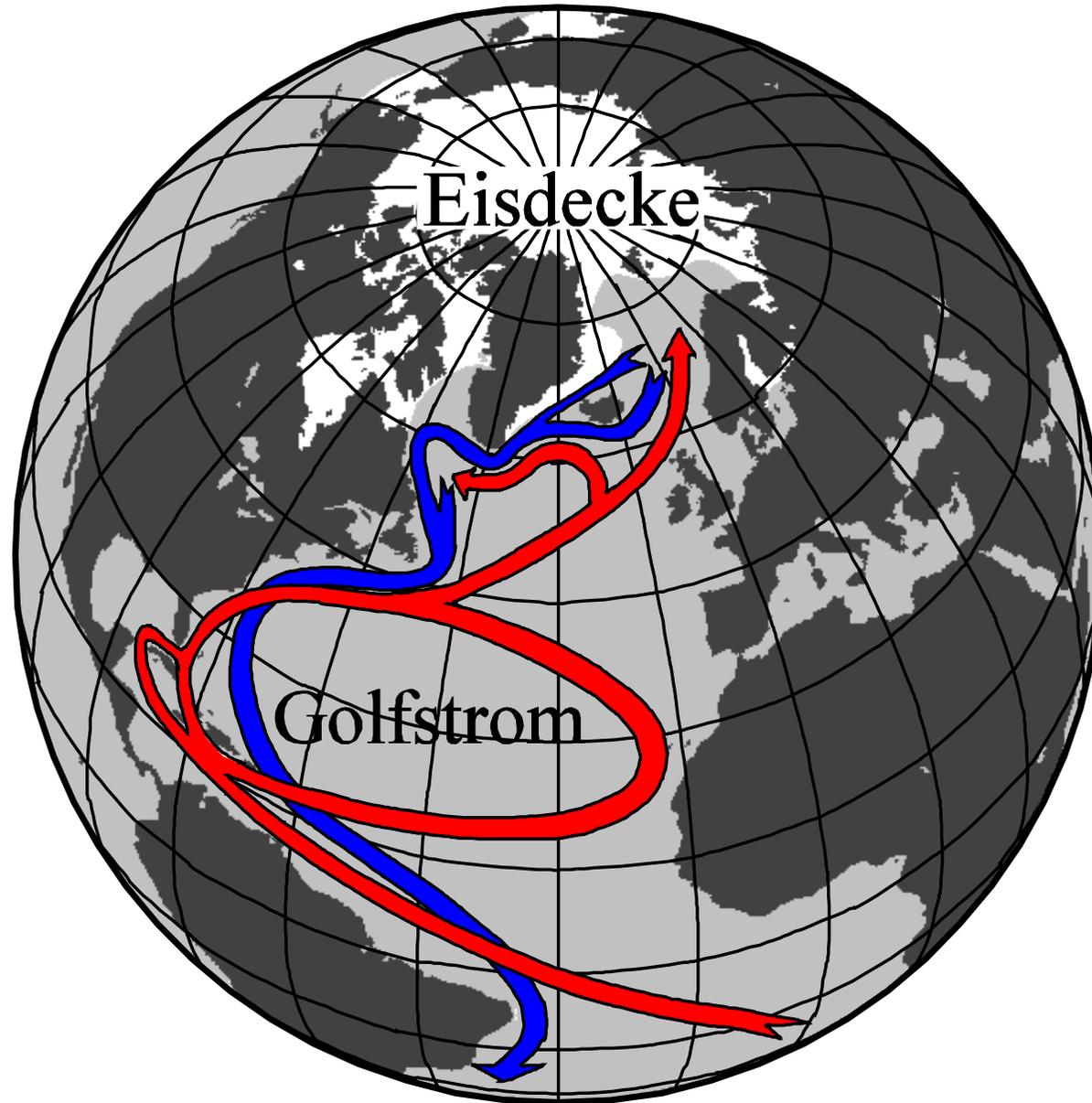
Strömungen in der Atmosphäre



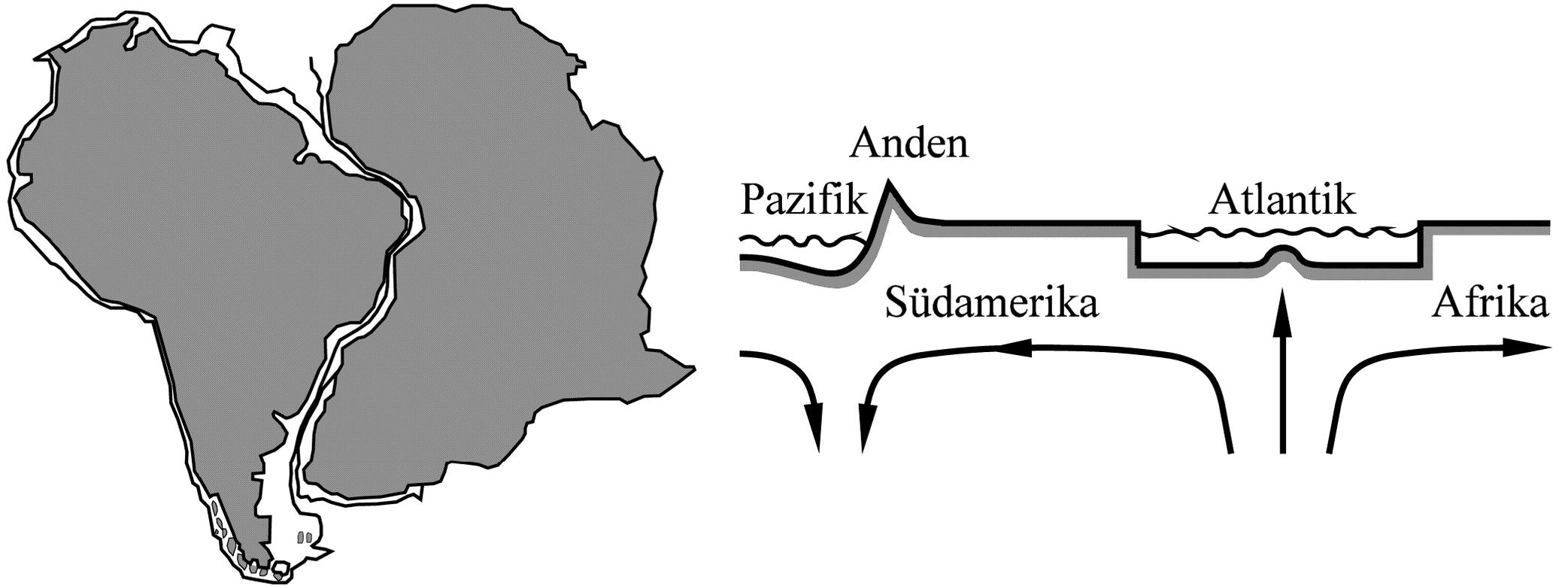
Hurrikan Georges 1998



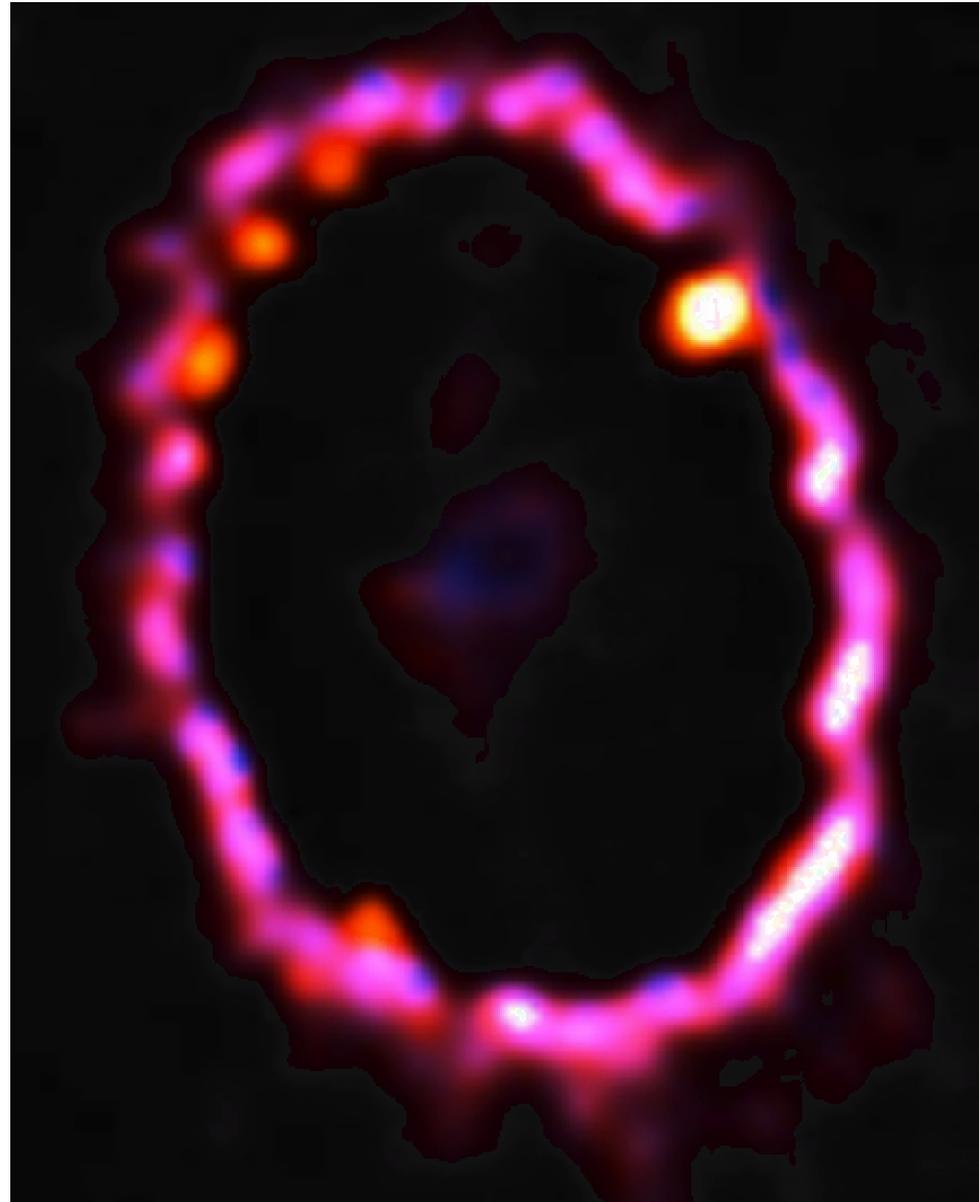
Meeresströmungen im Atlantik



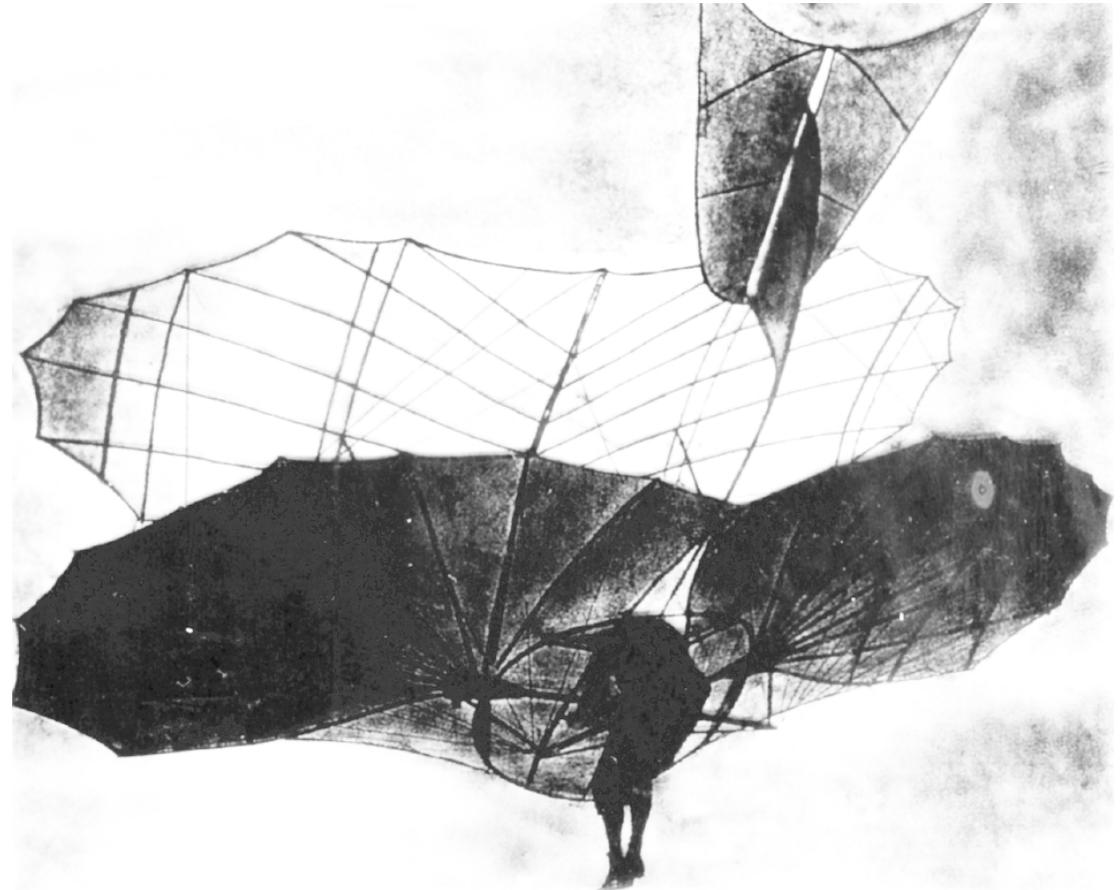
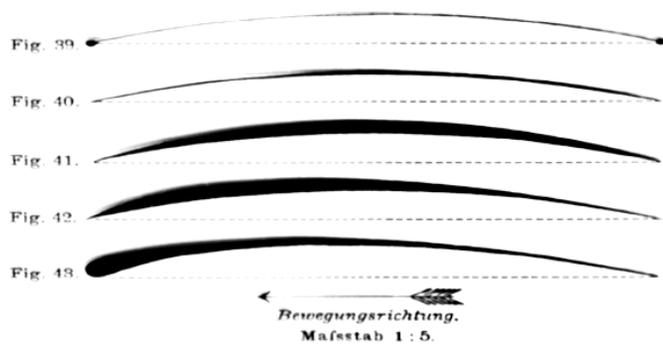
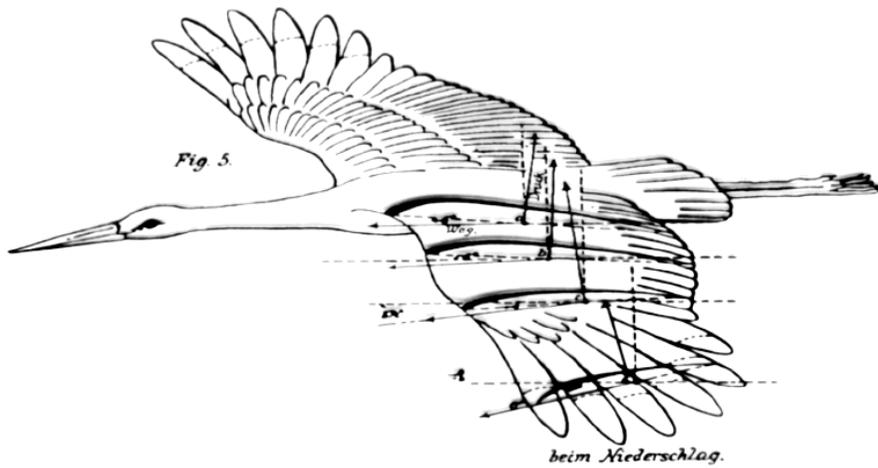
Drift der Kontinente



Supernova



Storchenflügel und Hanggleiter von Lilienthal



Airbus A380



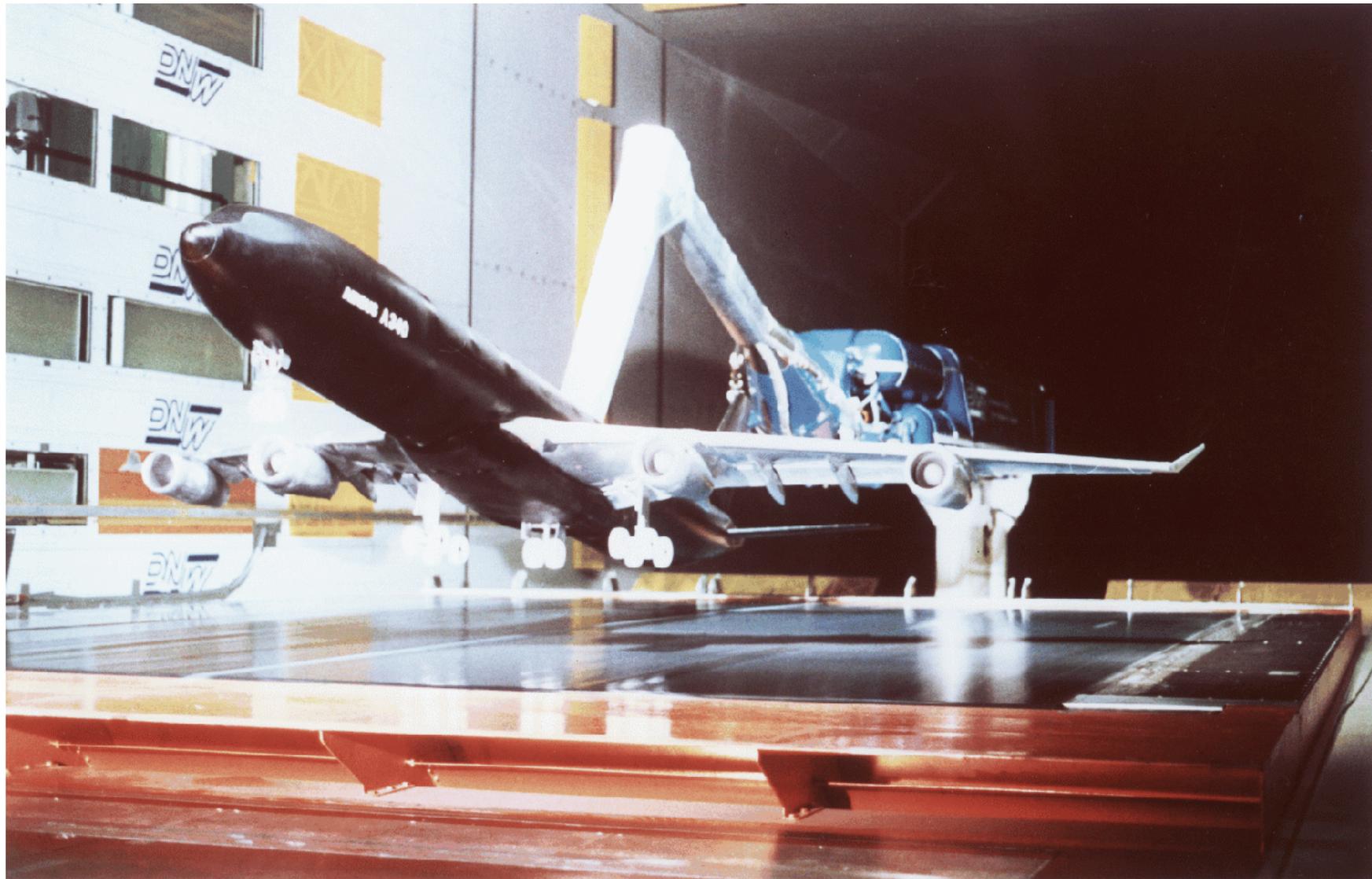
Entwicklung der Verkehrsflugzeuge und Schienenfahrzeuge



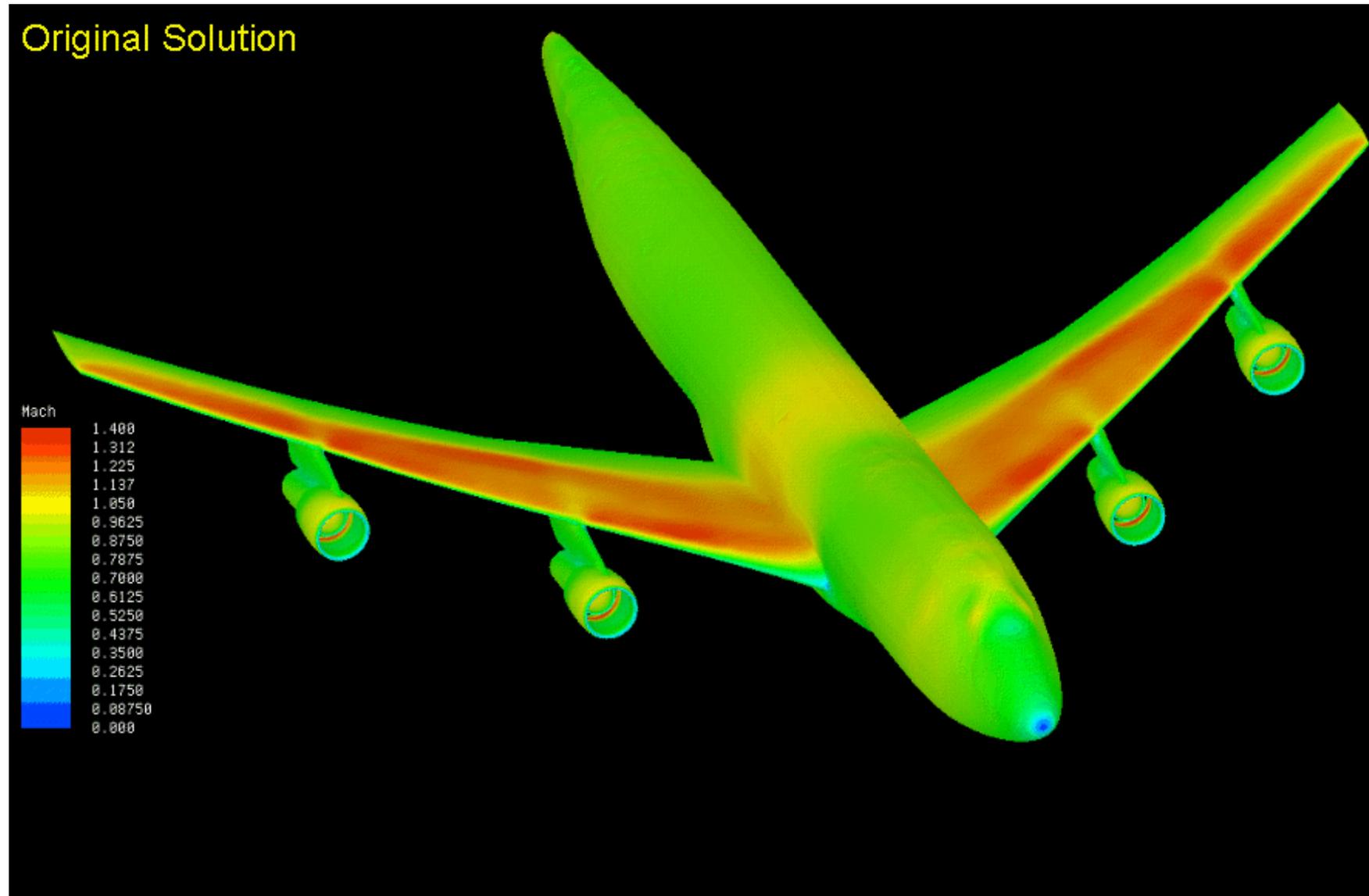
Strömungsspuren auf der Oberfläche einer Tragflügels im Windkanal



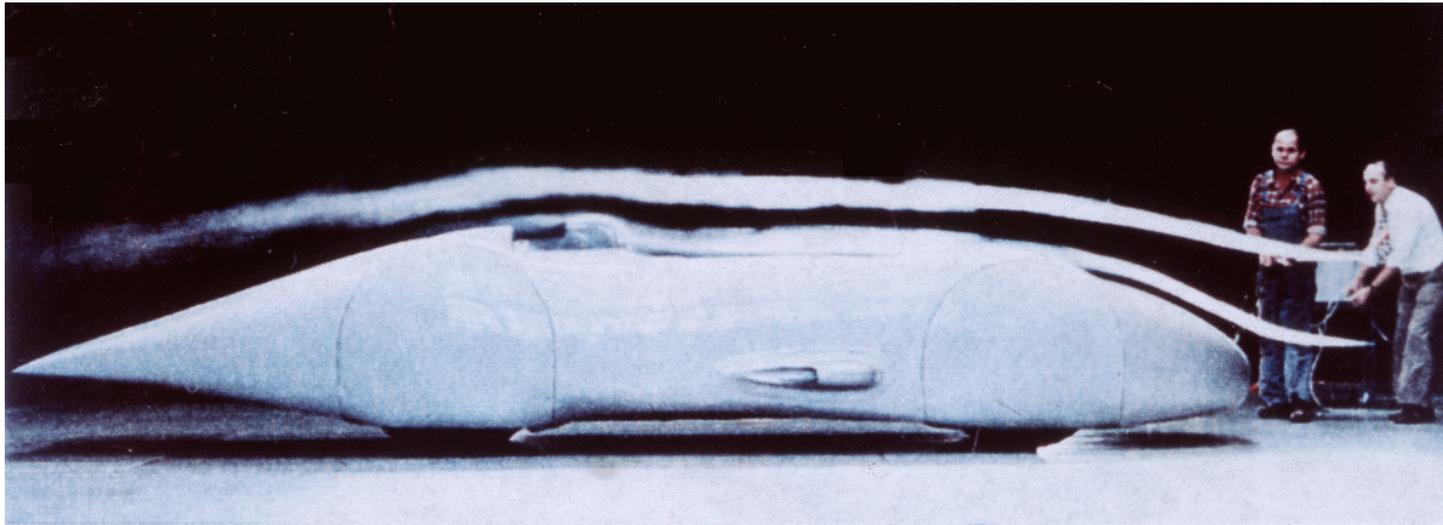
Modell des Airbus A340 im Windkanal



Mach-Zahlverteilung Boeing 747



Mercedes-Benz W125 im Windkanal



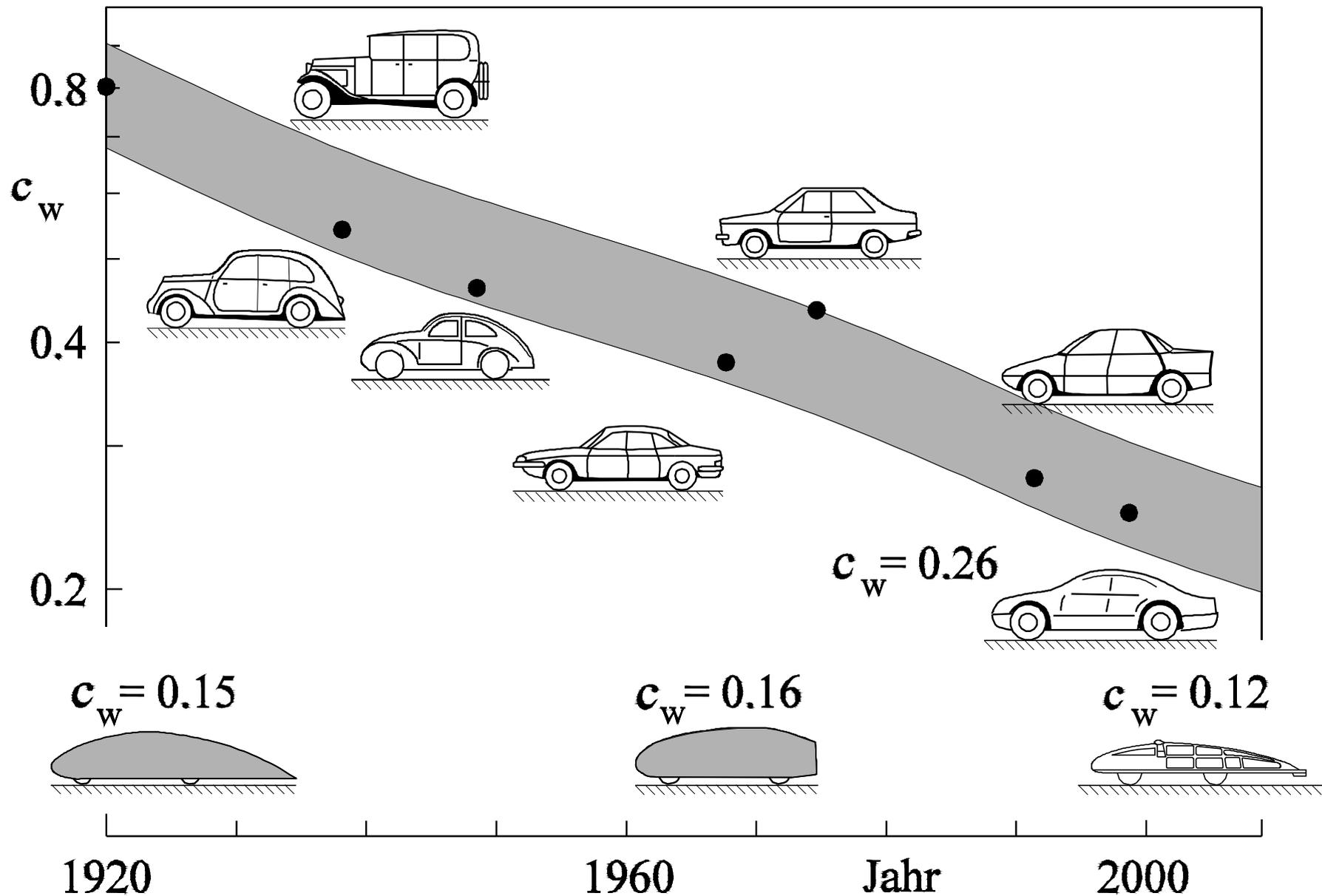
$c_w = 0.170$ 1938



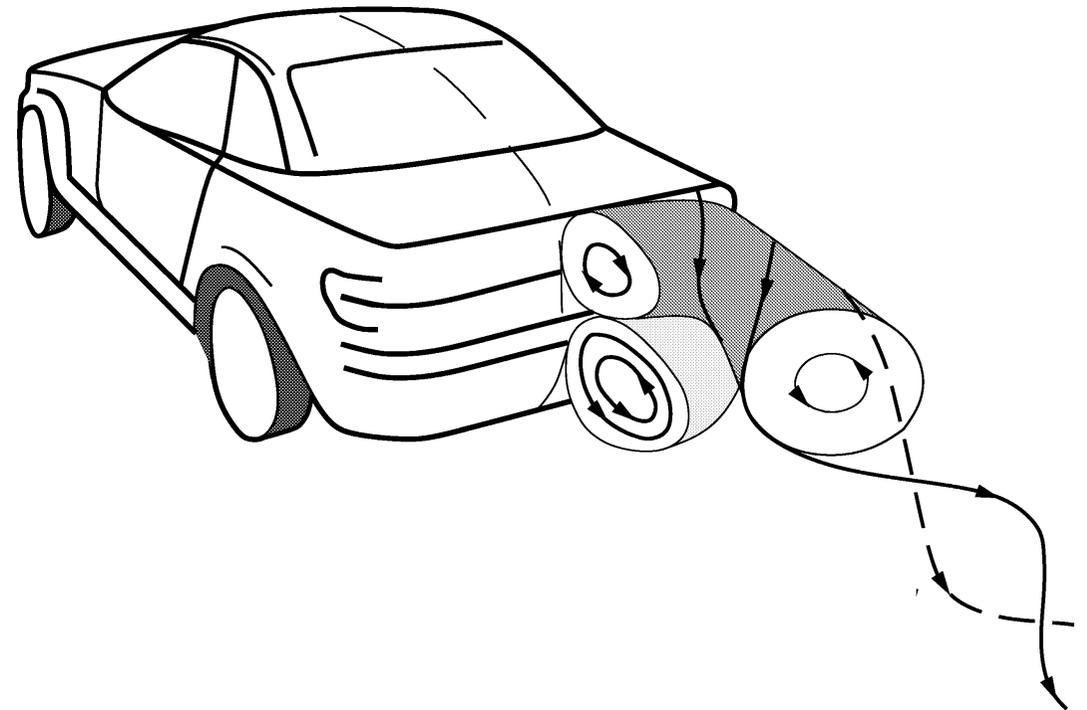
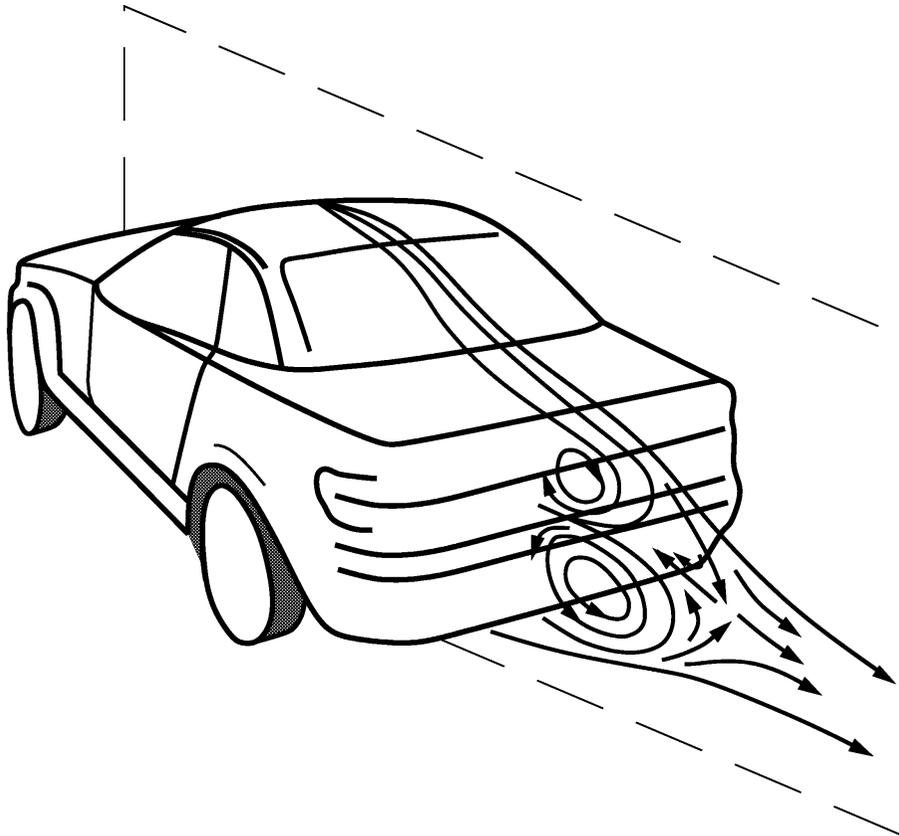
$c_w = 0.365$ 1937



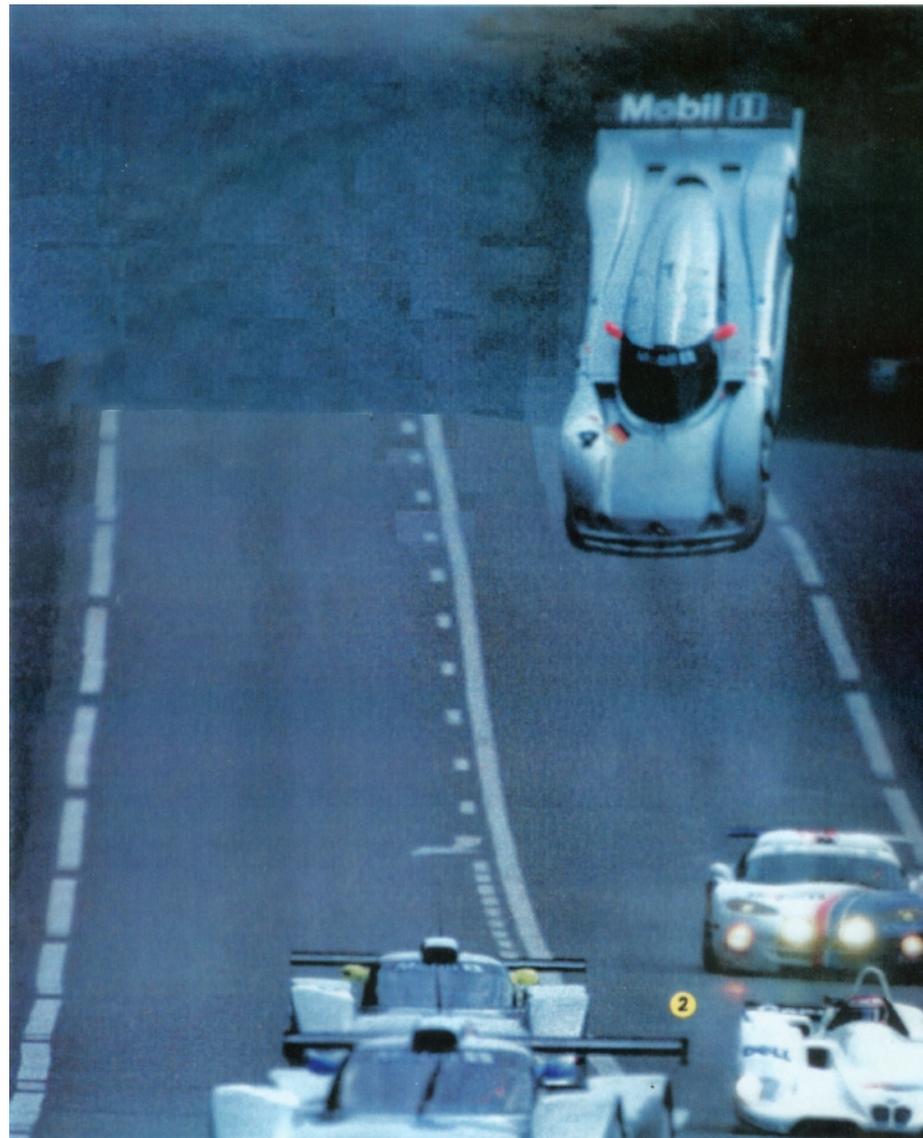
Entwicklung des c_w -Wertes von Kraftfahrzeugen



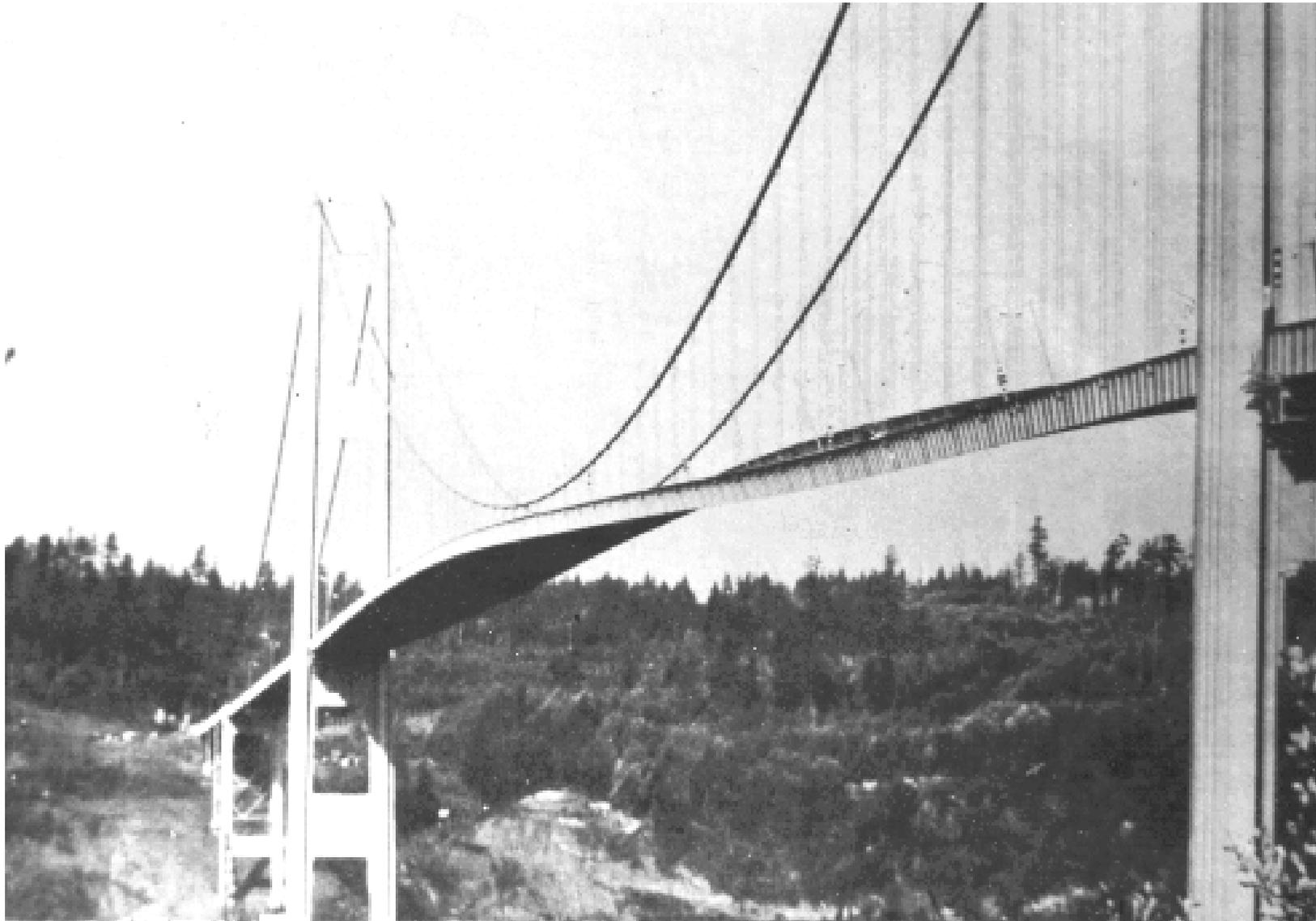
Struktur der Nachlaufströmung eines Kraftfahrzeuges



Abhebender BMW V12 LMR beim Rennen in Petit LeMans 2000



Aerodynamische Schwingungsanregung der Tacoma Brücke



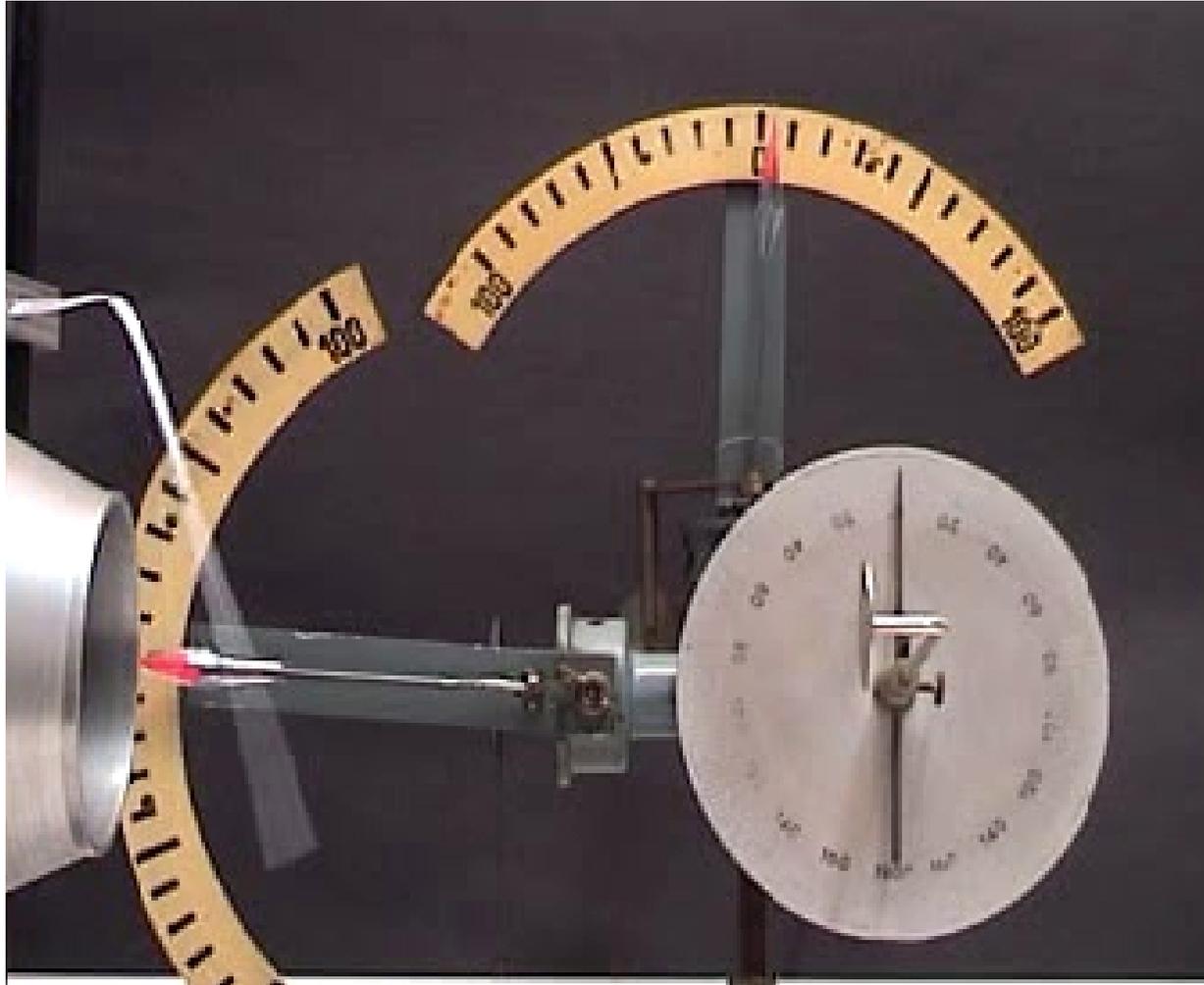
Produktionsanlage in der chemischen Verfahrenstechnik



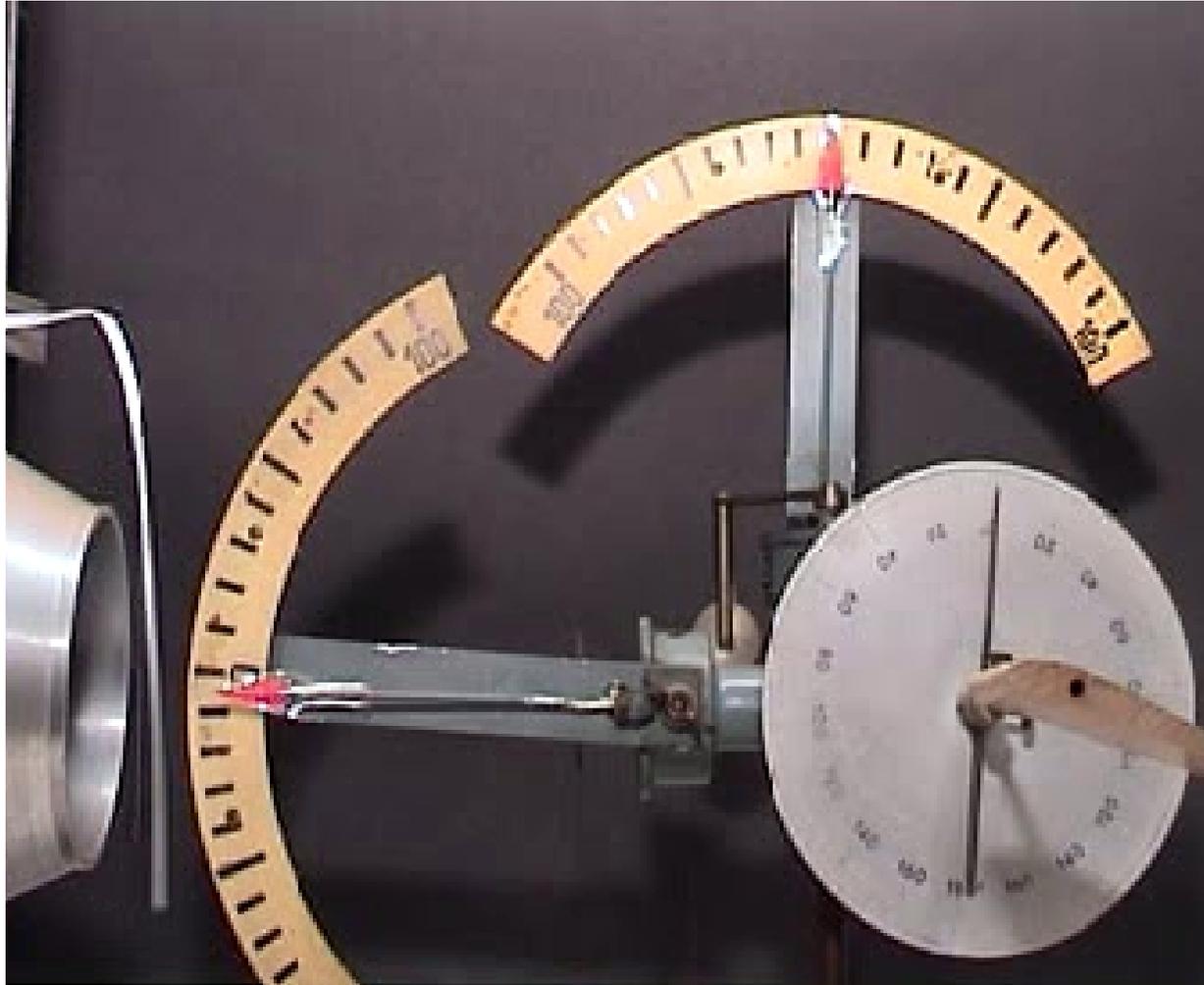
Experiment: Finger im Wasserstrahl



Experiment: Kraftwirkung im Windkanal, Platte



Experiment: Kraftwirkung im Windkanal, Profil



2. Vorlesung (Tafelübung) Strömungsbereiche

Rechnereinführung

Strömungsbereiche

Einteilung der Strömungsgebiete

Prallstrahl

Experiment: Finger im Wasserstrahl

Kraftwirkung auf Platte

Flüssigkeitsstrahl gegen horizontale Platte

Kraftfahrzeug

Umströmung eines Kraftfahrzeuges

Strömungsbereiche und Druckkraft auf Fahrzeug

Film: Kraftfahrzeugnachlauf

Film: Simulation Kraftfahrzeugumströmung

Nachlaufströmung Kraftfahrzeug

Druckverteilung Kraftfahrzeug

Kraftfahrzeug im Windkanal

Messung Kfz.-Widerstandsbeiwert

Widerstandsbeiwert und Messzeit

Experiment: Kraftwirkung im Windkanal

Tragflügel

Strömungsbereiche und Druckverteilung auf Tragflügel

Strömungsspuren am Tragflügel im Windkanal



Rechnereinführung: Homepage Lehrstuhl und Institut für Strömungslehre



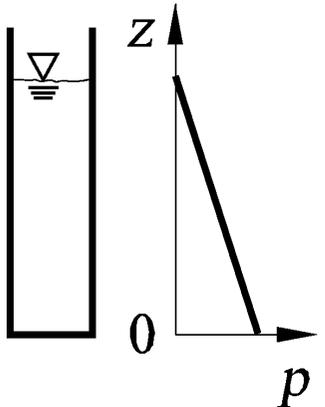
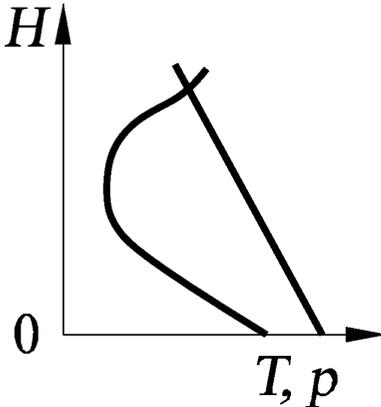
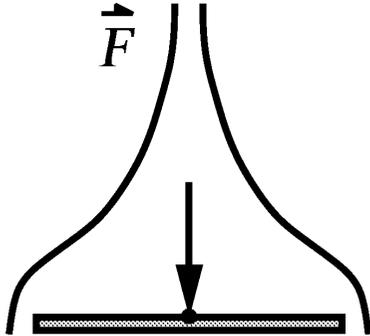
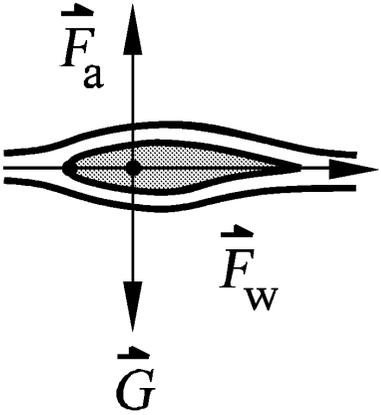
Rechnereinführung: Lehre



Rechnereinführung: Übungen und Klausuren



Einteilung der Strömungsgebiete

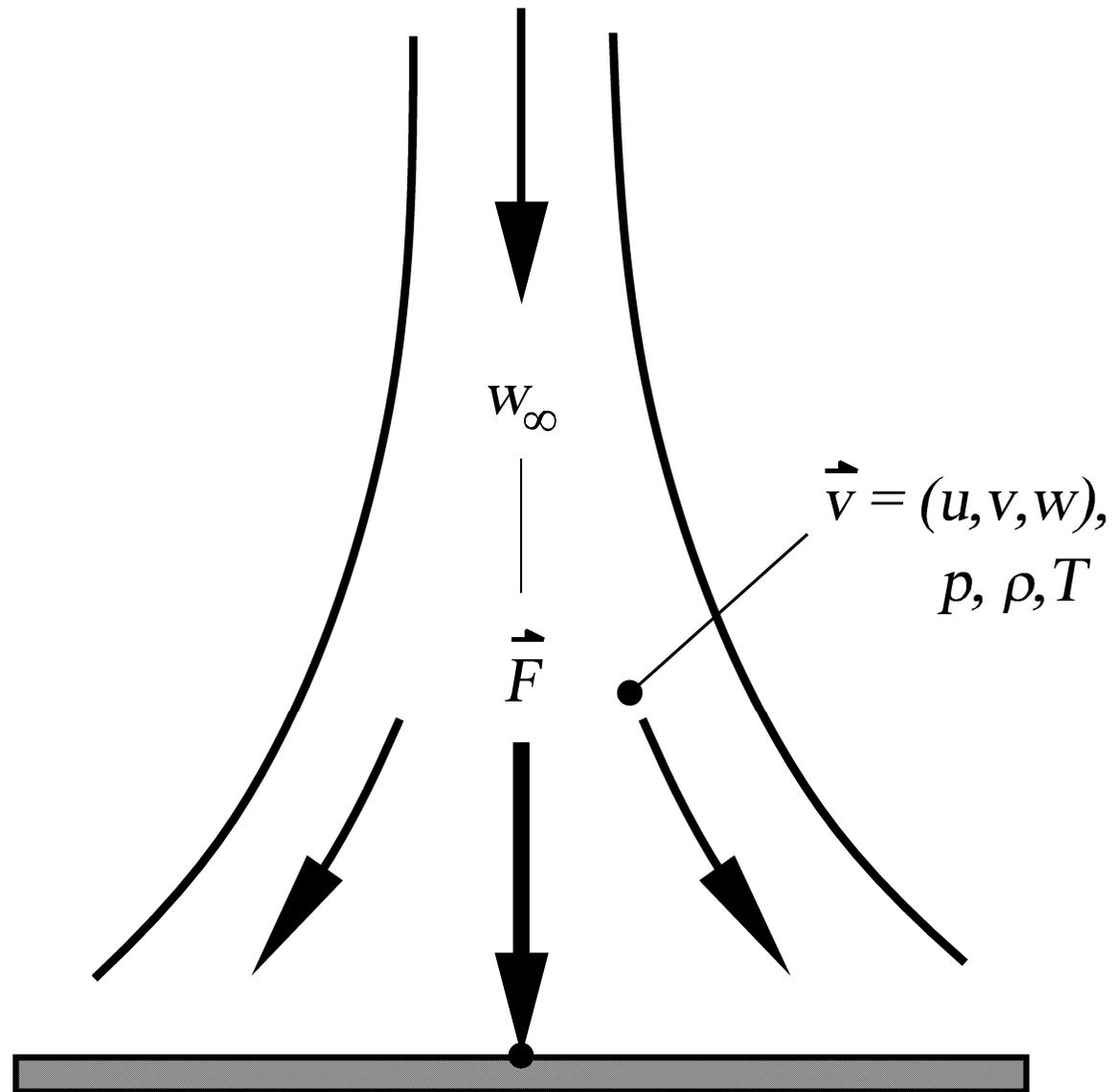
Beispiele	Ruhendes Medium		Strömung	
	Hydrostatik	Aerostatik	Hydrodynamik	Aerodynamik
	inkompressibel	kompressibel	inkompressibel	kompressibel
	<p>stehende Wassersäule</p> 	<p>ruhende Atmosphäre</p> 	<p>strömende Flüssigkeit</p> 	<p>strömendes Gas</p> 



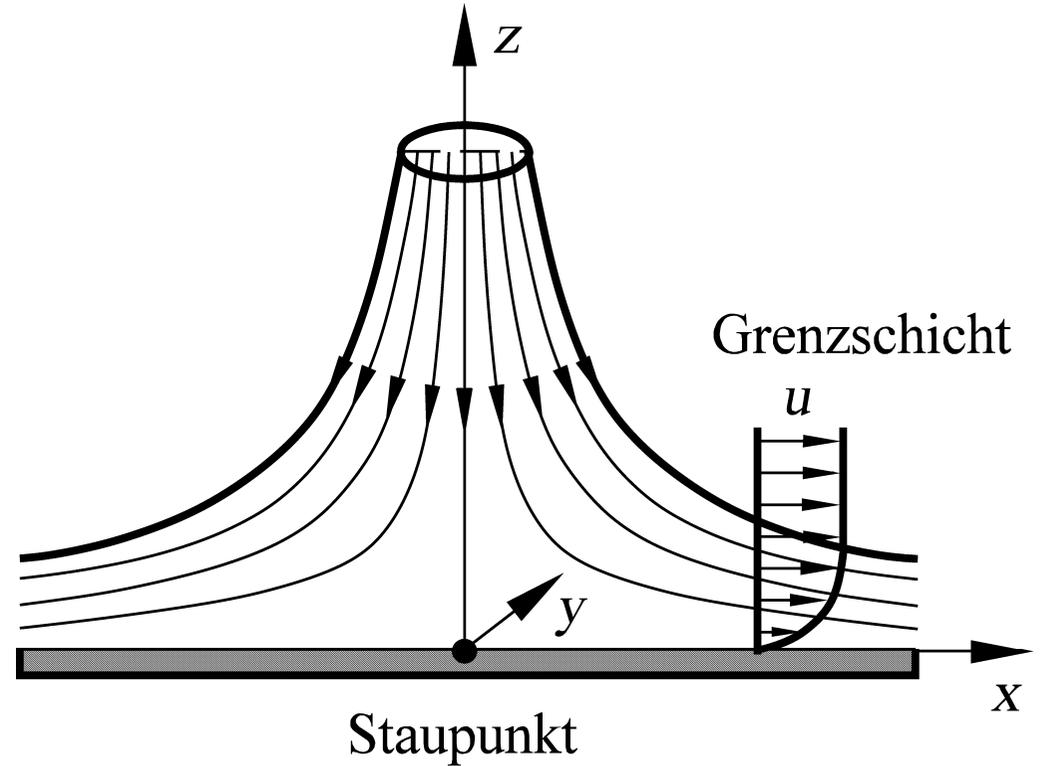
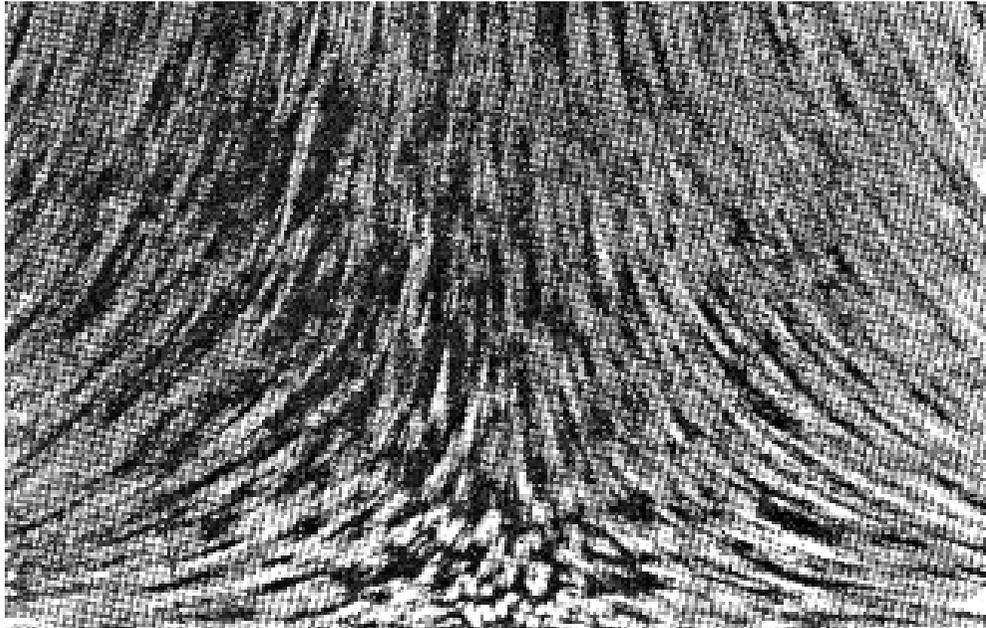
Experiment: Finger im Wasserstrahl



Kraftwirkung einer Strömung

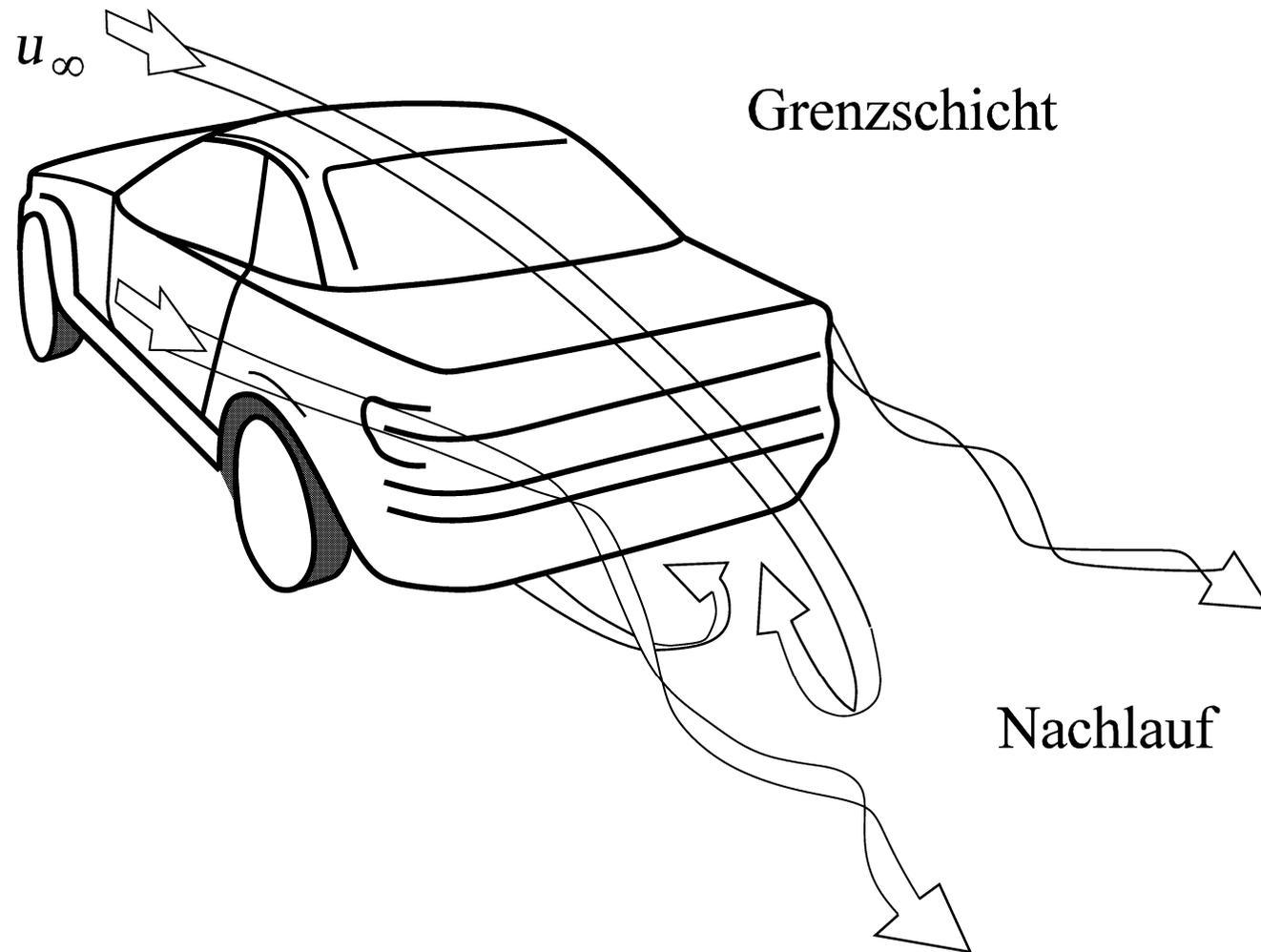


Flüssigkeitsstrahl gegen eine horizontale Platte



Umströmung eines Kraftfahrzeuges

reibungsfreie Umströmung

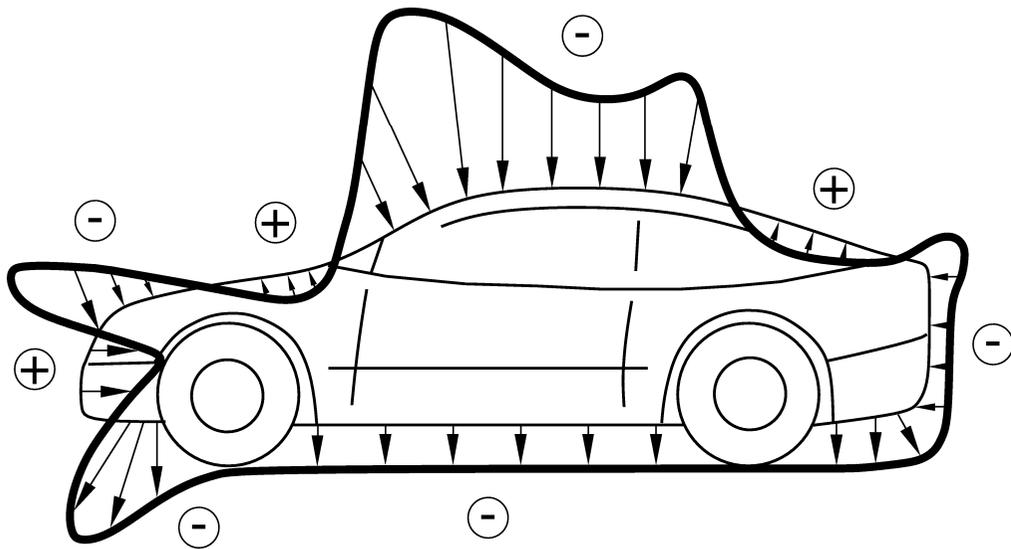
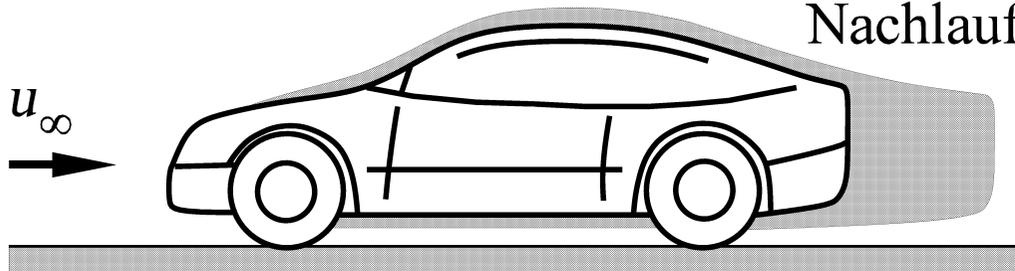


Strömungsbereiche und Druckkraft auf einem Fahrzeug

reibungsfreie Umströmung

Grenzschicht

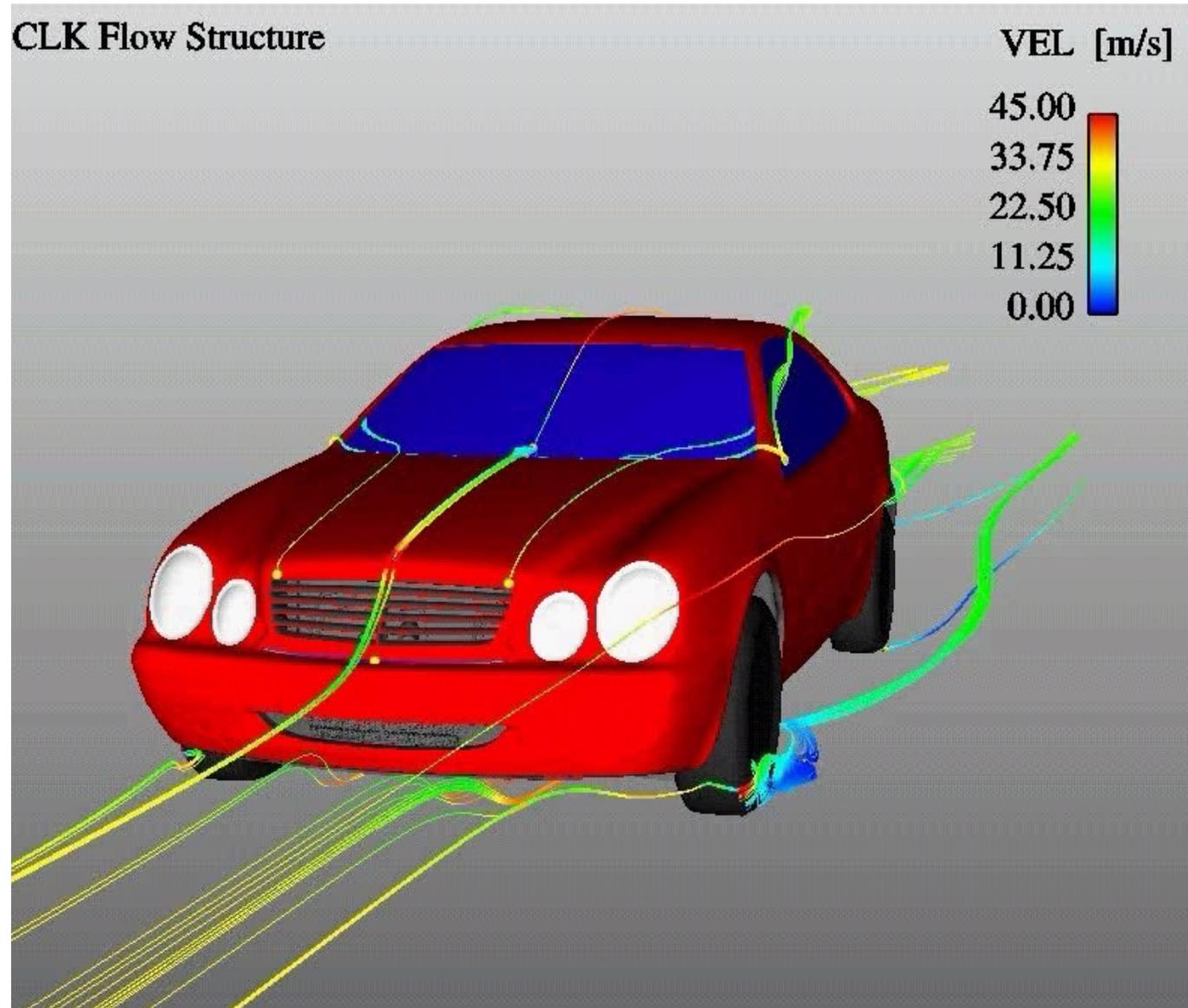
Nachlauf



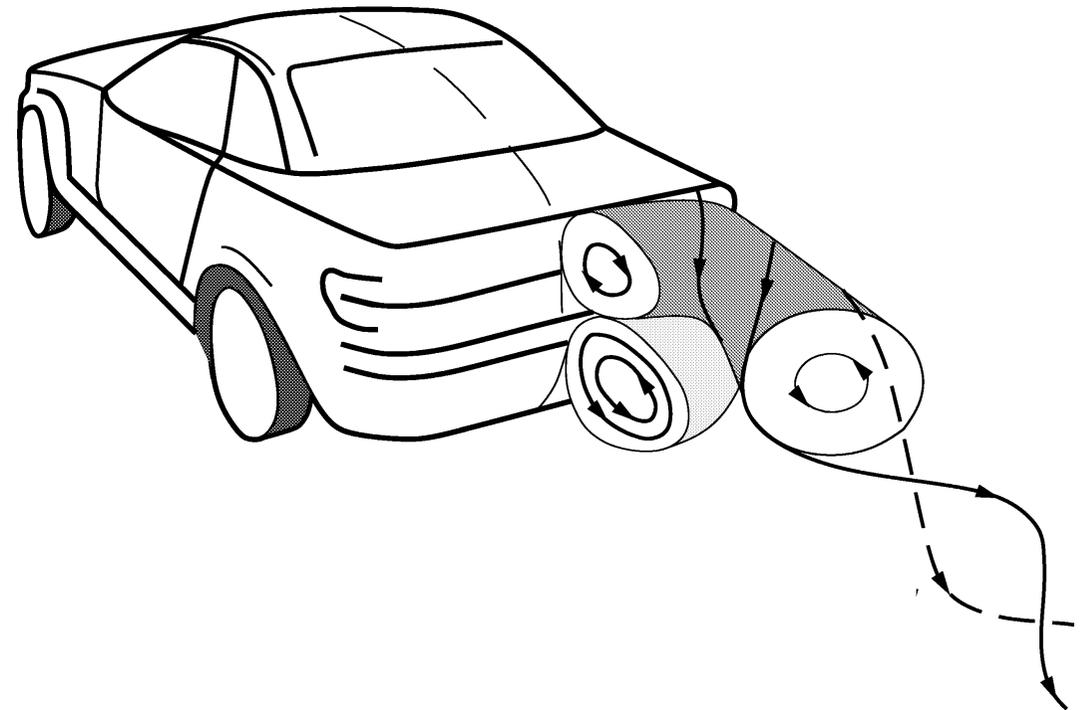
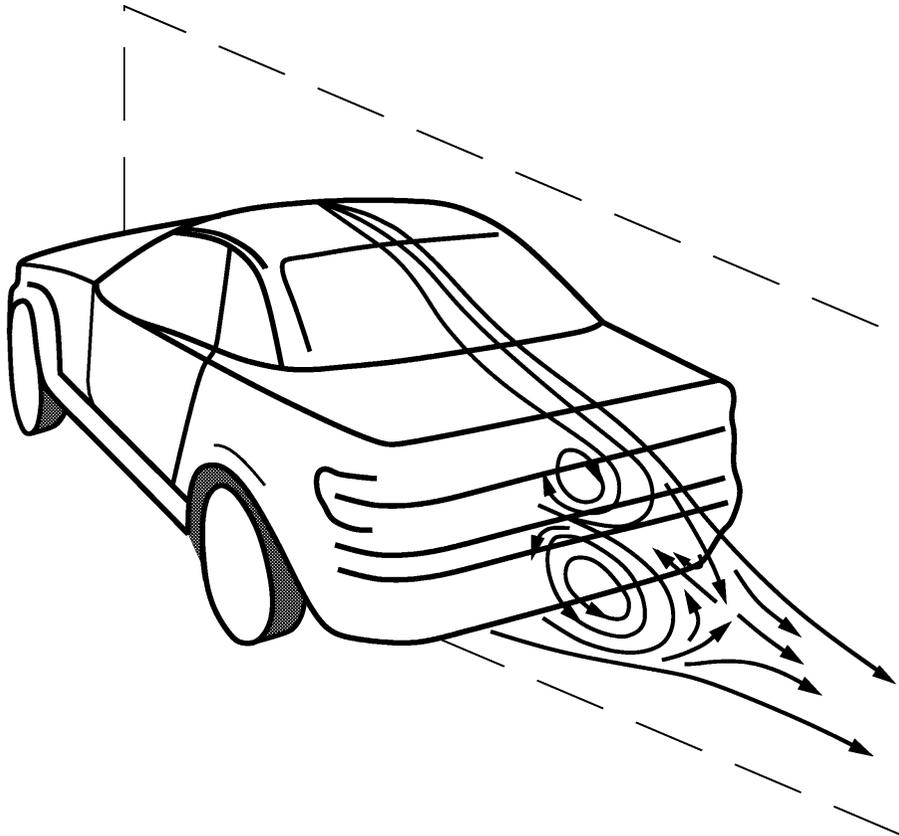
Film: Kraftfahrzeugnachlauf



Film: Simulation Kraftfahrzeugumströmung CLK



Struktur der Nachlaufströmung eines Kraftfahrzeuges



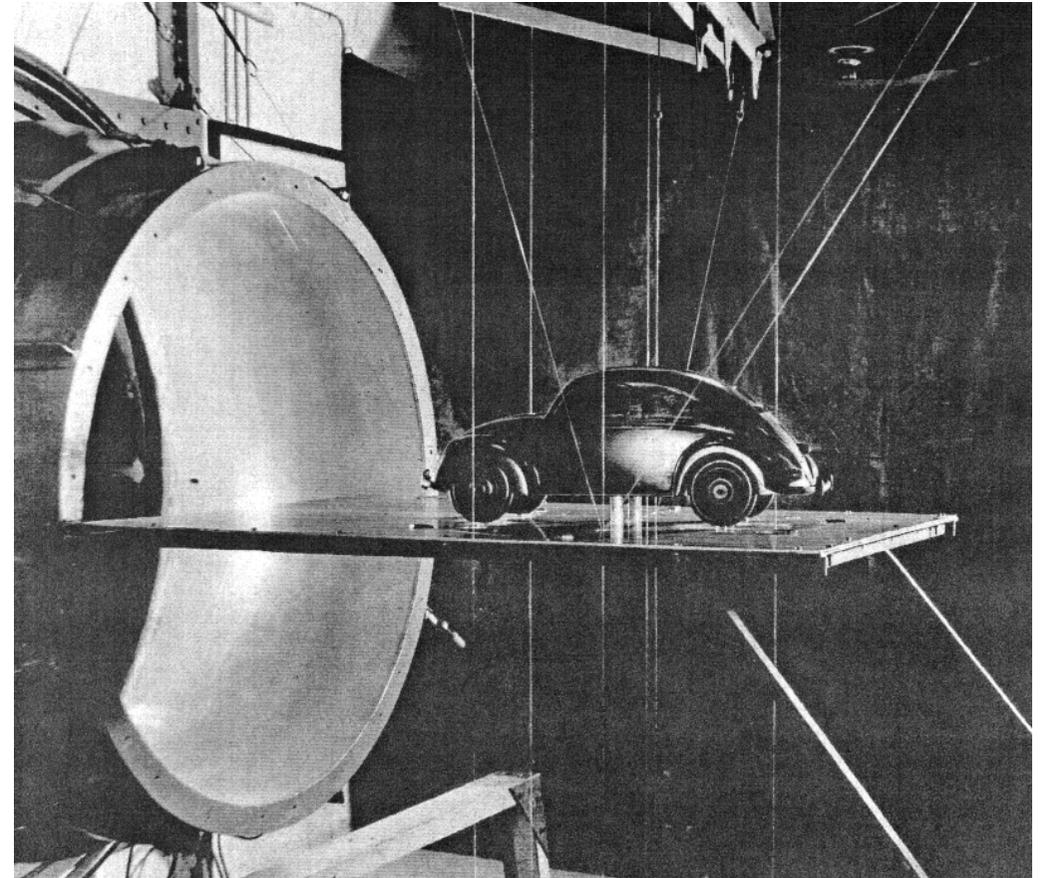
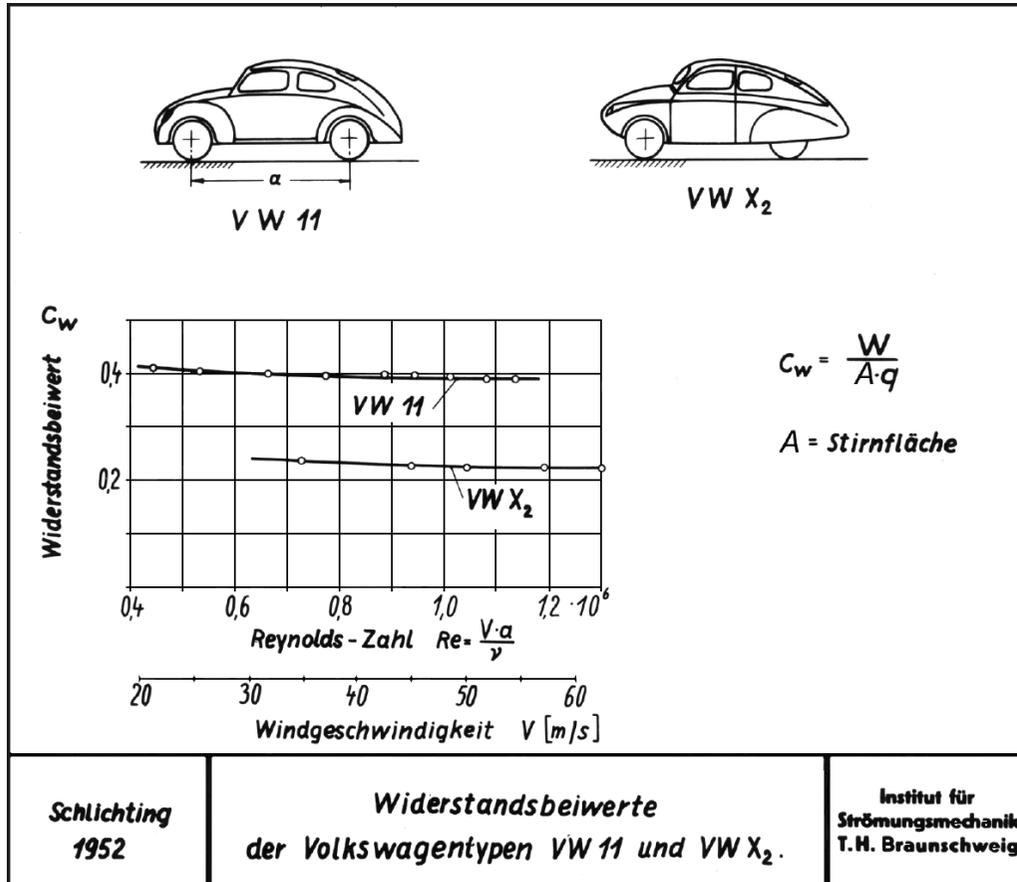
Druckverteilung an einem Kraftfahrzeug



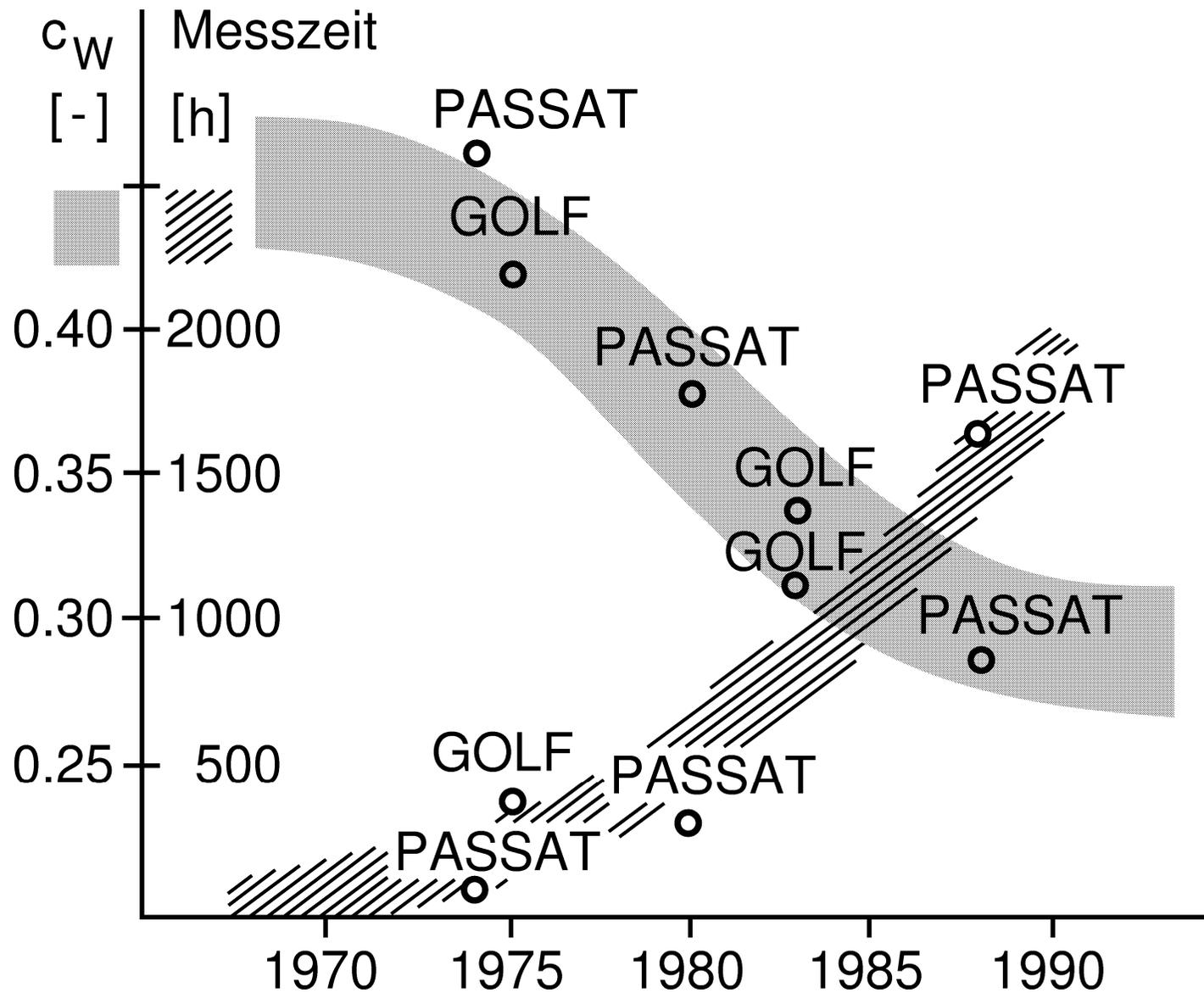
Strömungssichtbarmachung am Kraftfahrzeug im Windkanal



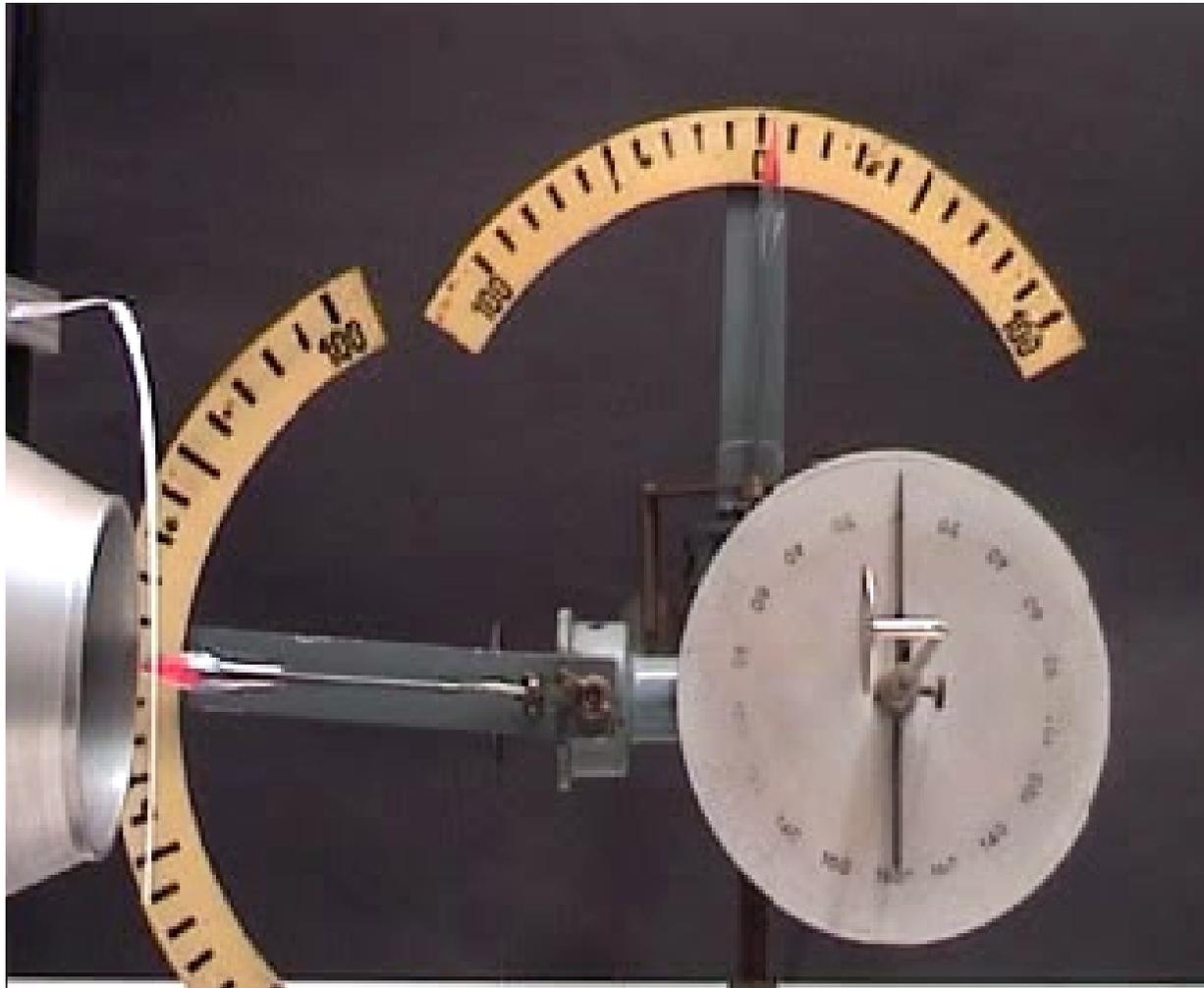
Messung der Kraftfahrzeug-Widerstandsbeiwerte im Windkanal



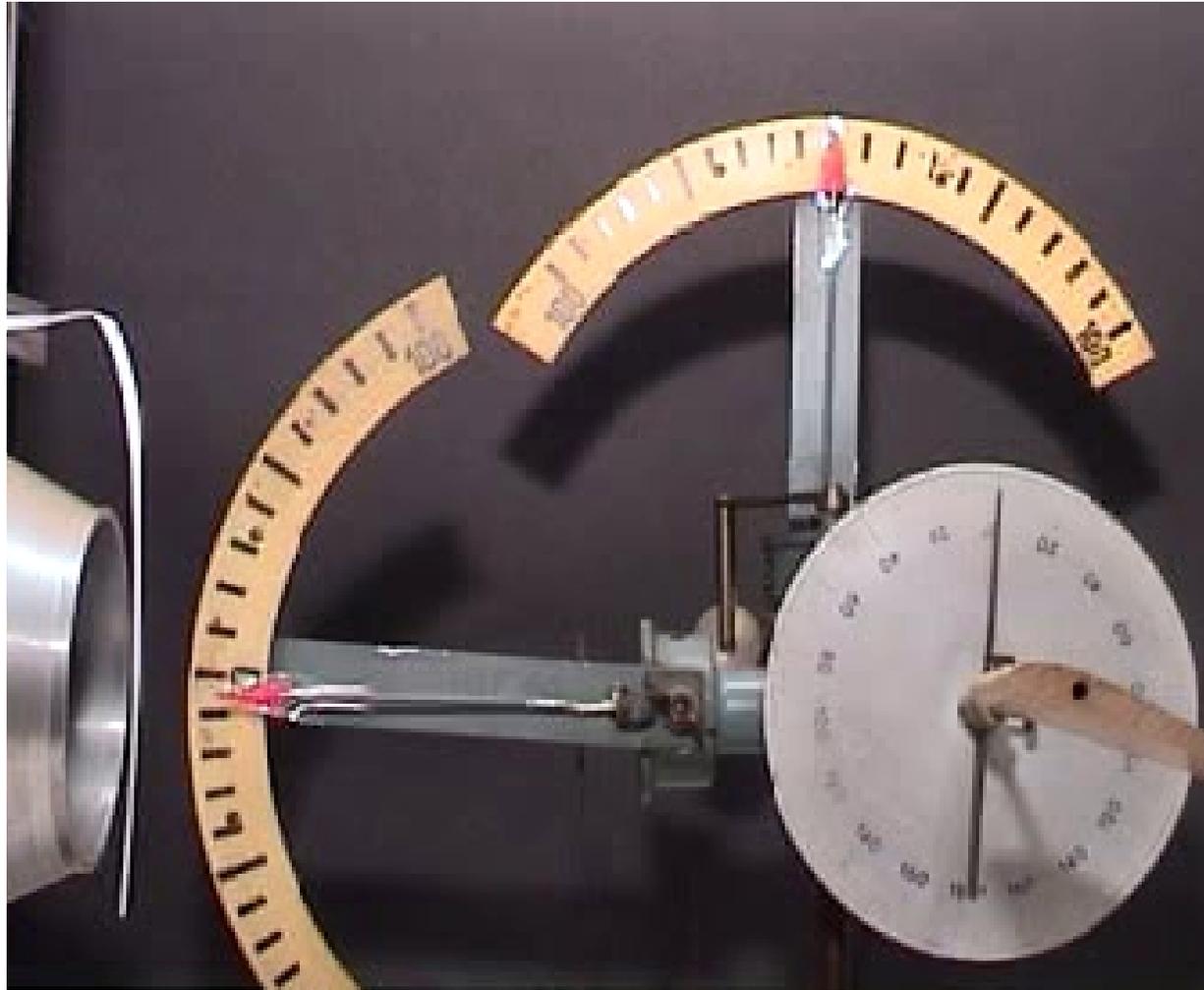
Entwicklung von c_w -Wert und Messzeit im Windkanal beim Kraftfahrzeug



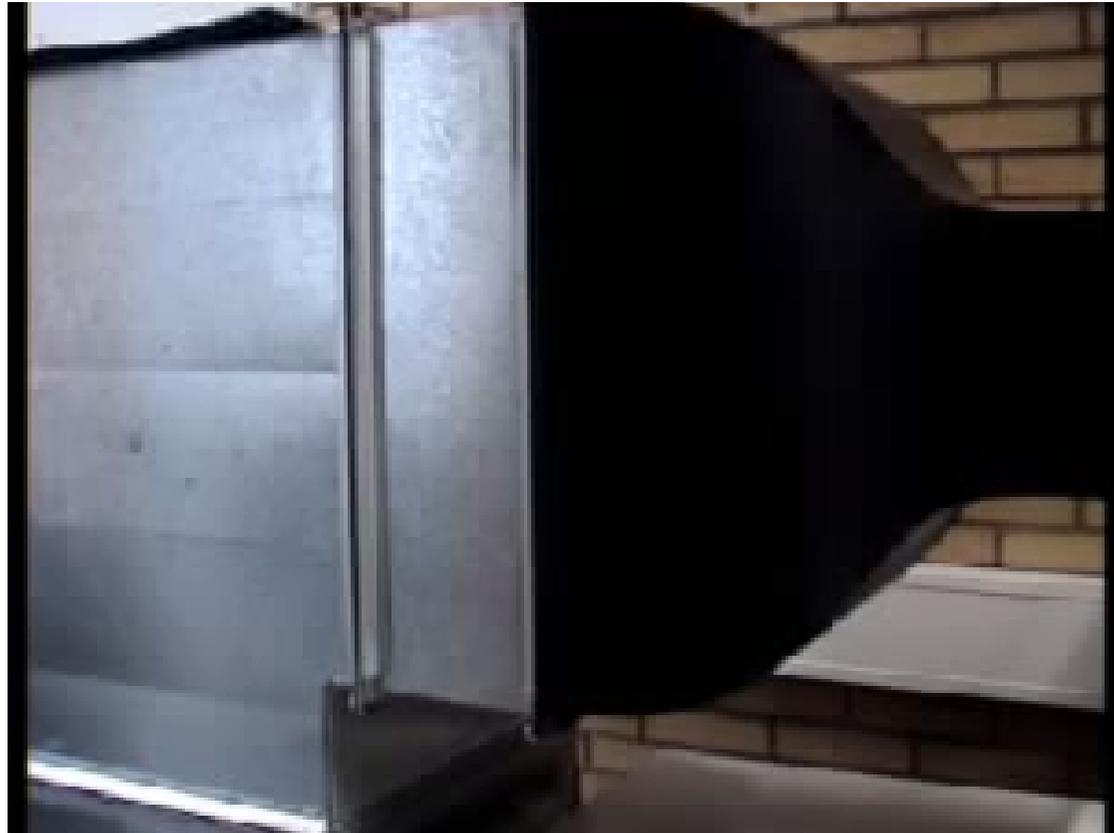
Experiment: Kraftwirkung im Windkanal, Platte



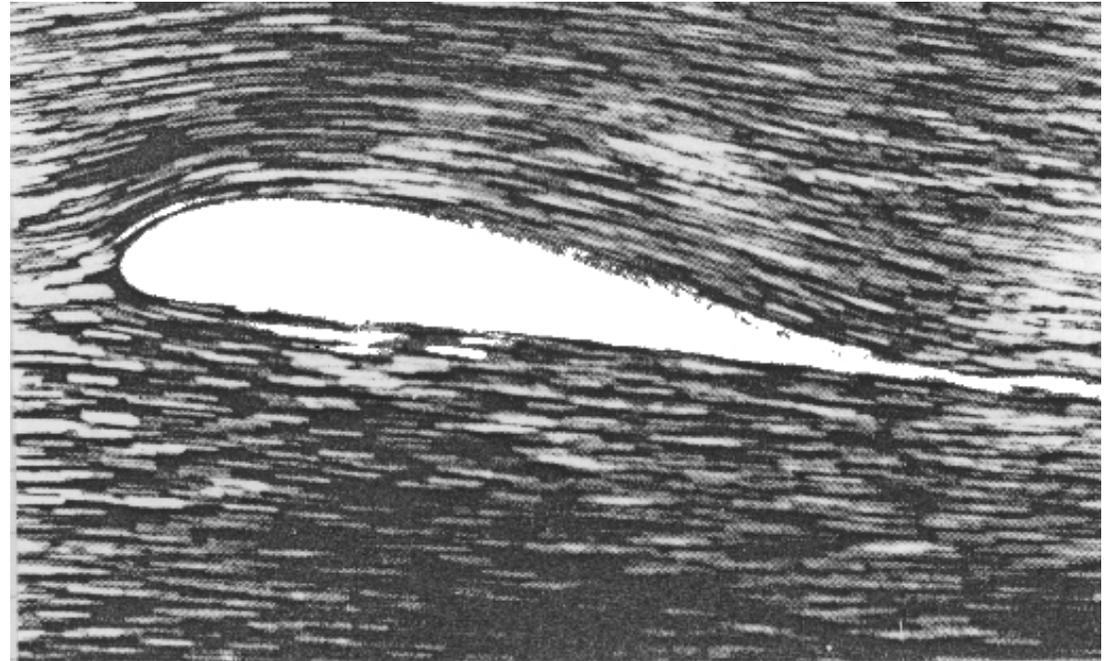
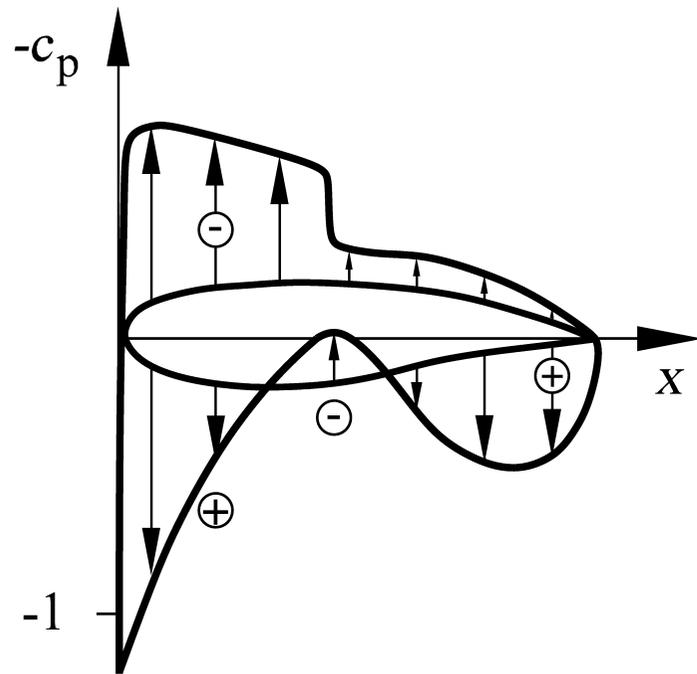
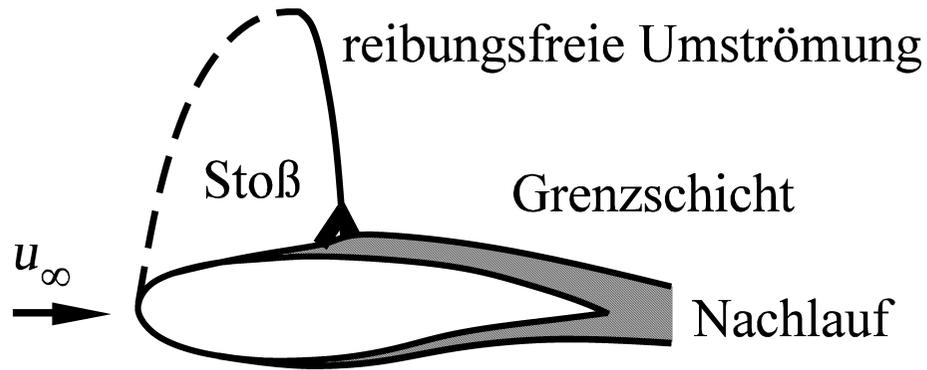
Experiment: Kraftwirkung im Windkanal, Profil



Experiment: Kraftmessung im Windkanal am Tragflügelprofil



Strömungsbereiche und Druckverteilung auf einem Tragflügel



Strömungsspuren auf der Oberfläche eines Tragflügels im Windkanal



Produktentwicklung

Produktentwicklung

Film: Produktentwicklung

Reibung

Couette-Strömung

Experiment: Kraftmessung
Couette-Strömung

Experiment: Hüpfender Kitt

Schubspannung
Newtonsche, Nicht-Newtonsche

Temperaturabhängigkeit
dynamische Zähigkeit

Analogie Reibung-Wärmeleitung

Oberflächenspannung

Oberflächenspannung

Experiment: Benetzungswinkel

Kontaktwinkel Quecksilber, Wasser und Öl

Insekt auf Wasseroberfläche

Experiment: Vortrieb Schiffchen

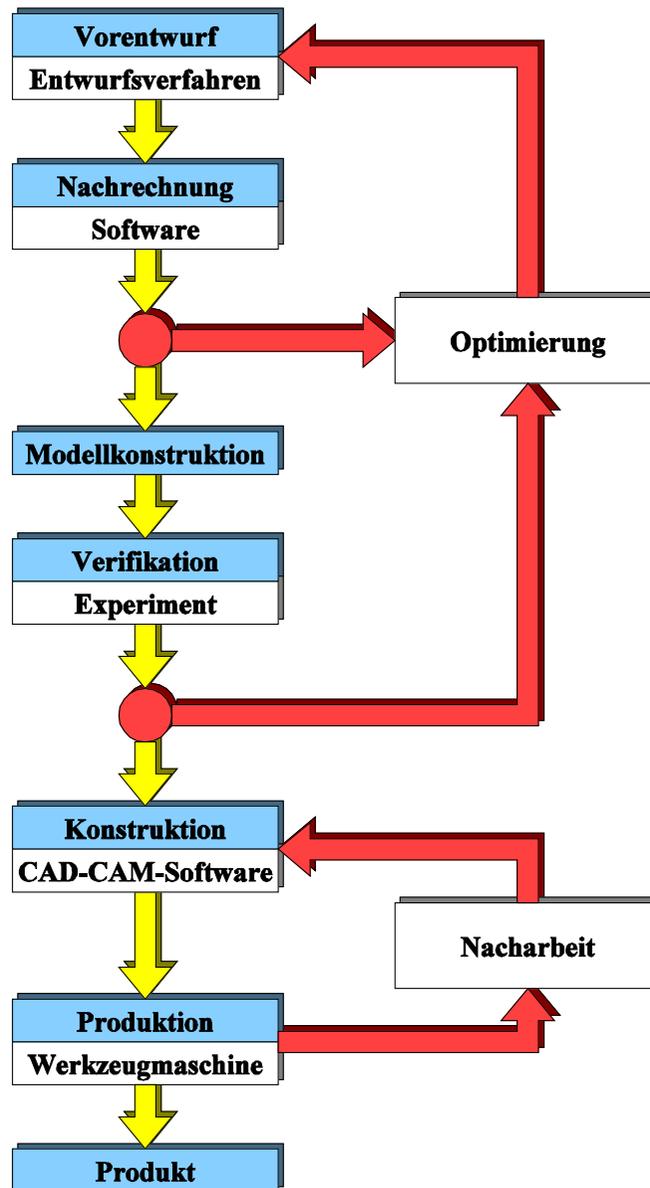
Experiment: Minimalfläche

Minimalflächen

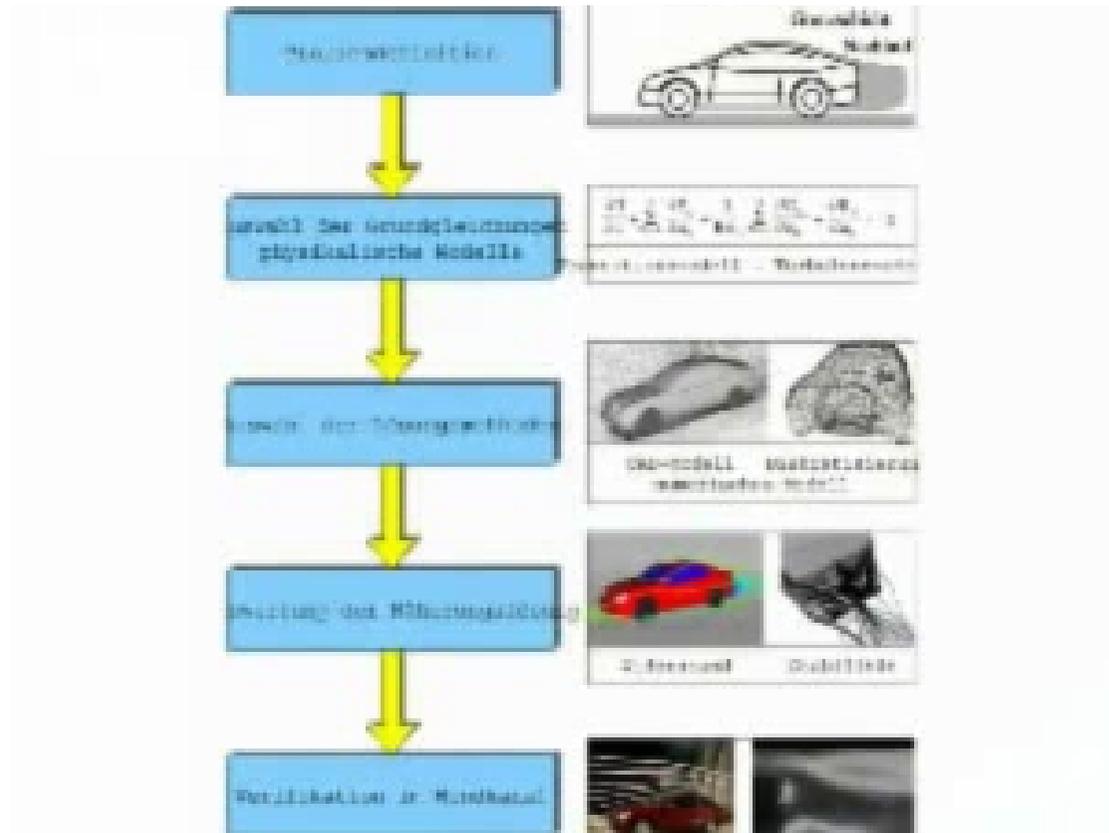
Reinigung genoppter Oberflächen



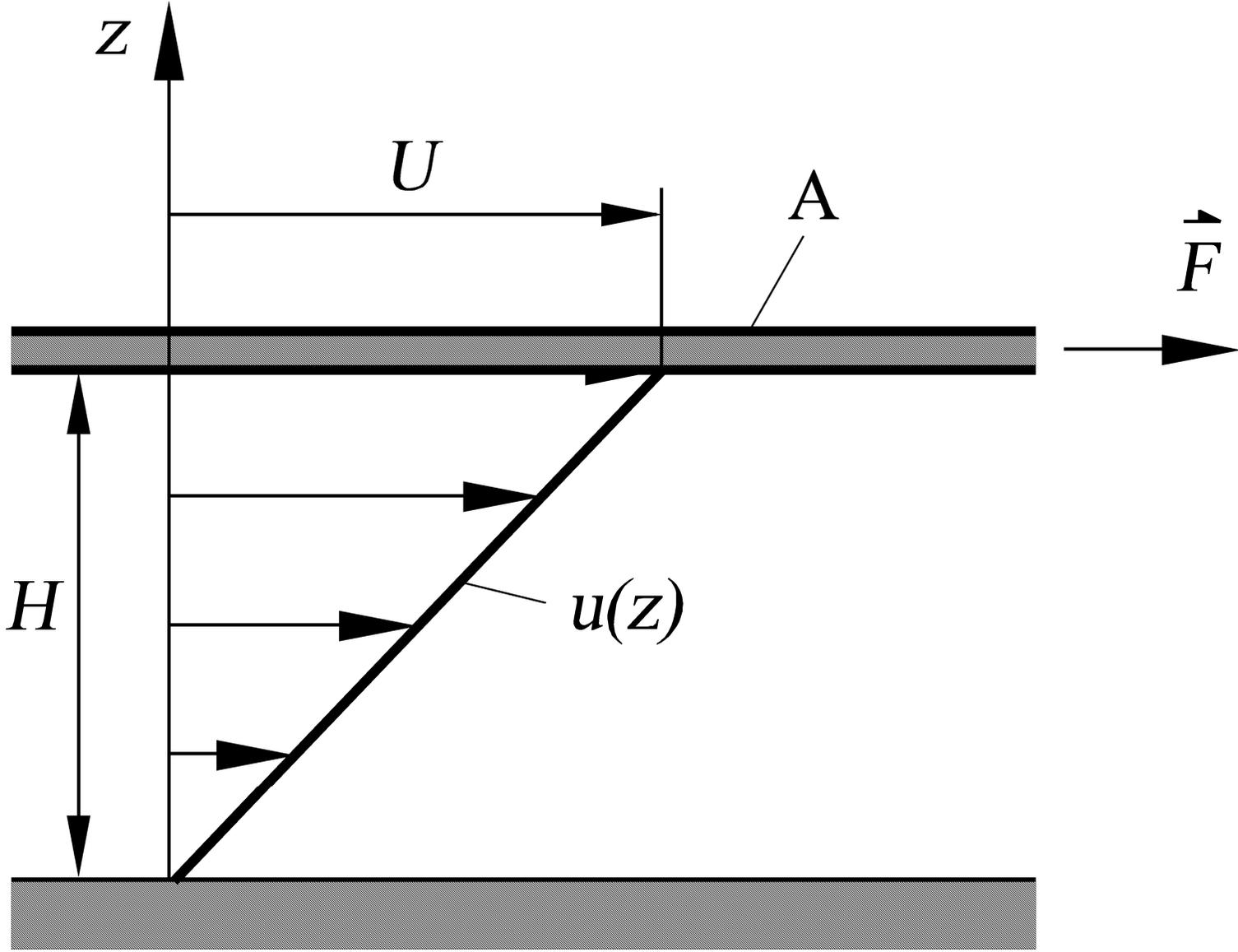
Produktentwicklung



Film: Produktentwicklung



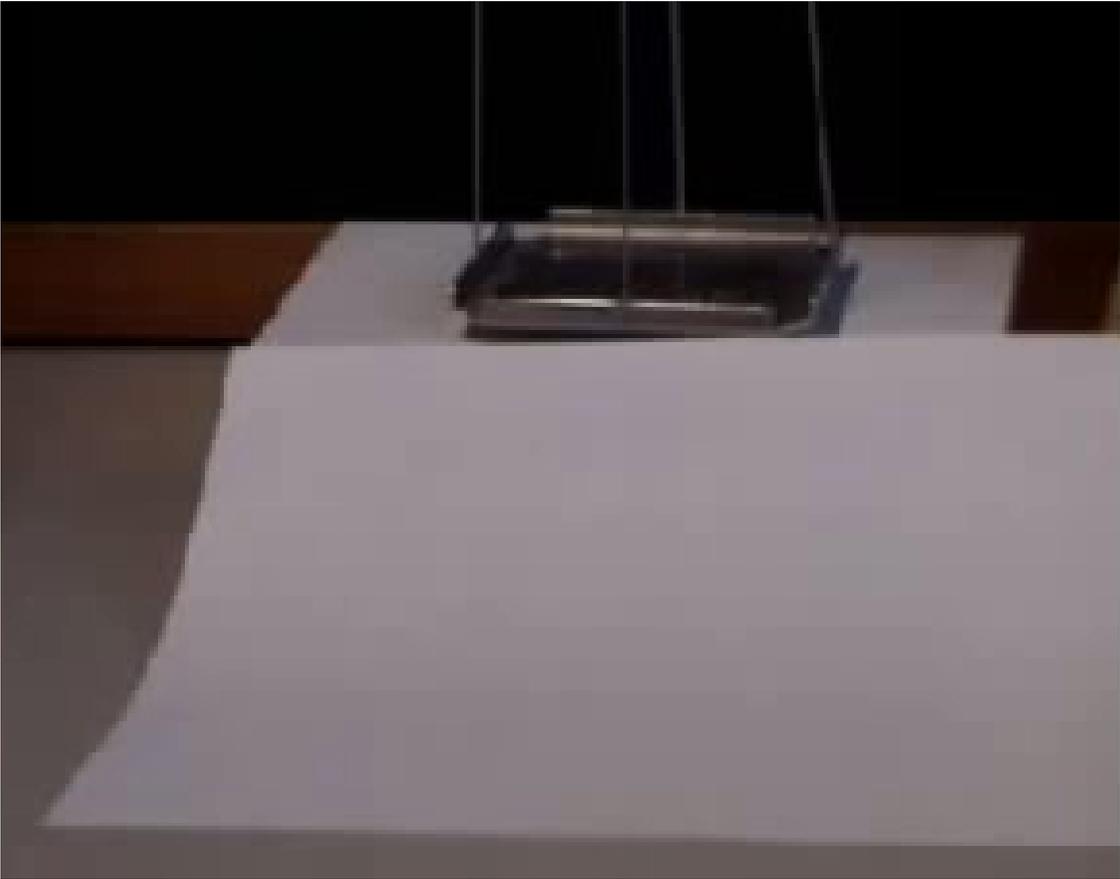
Couette-Strömung, Definition der Schubspannung τ



Experiment: Kraftmessung bei Couette-Strömung, Newtonsches Fluid



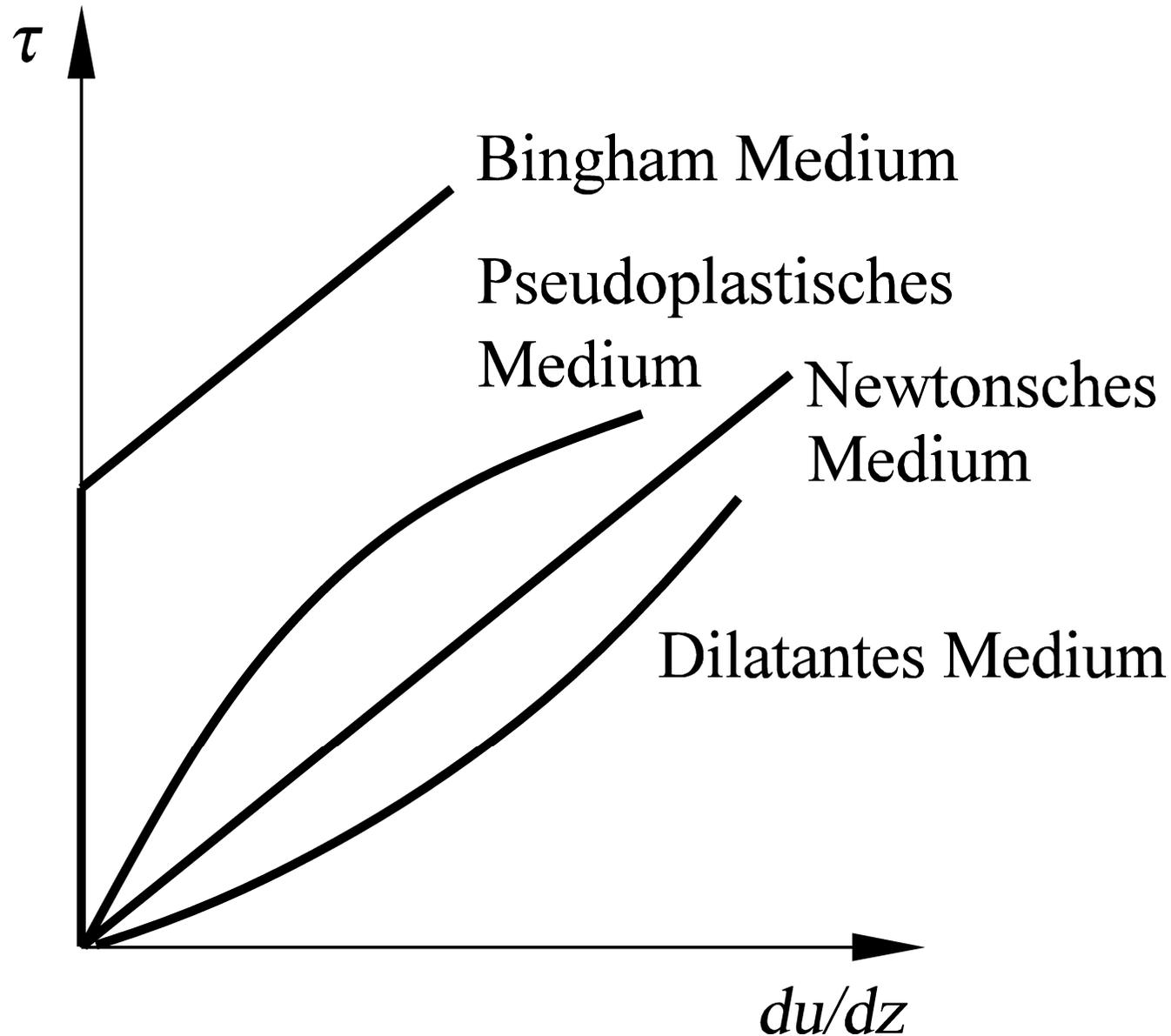
Experiment: Kraftmessung bei Couette-Strömung, nicht-Newton'sches Fluid



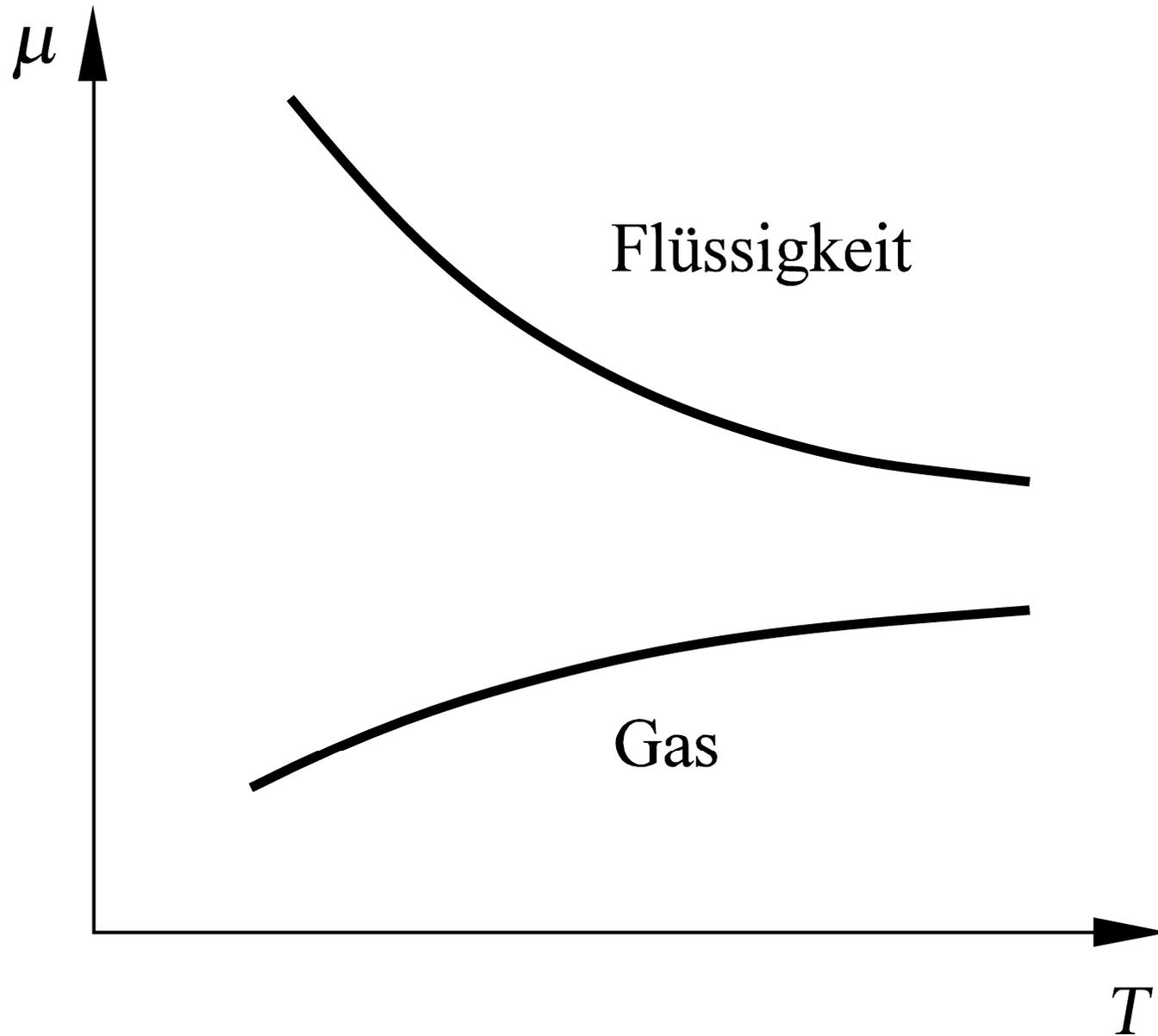
Experiment: Hüpfender Kitt



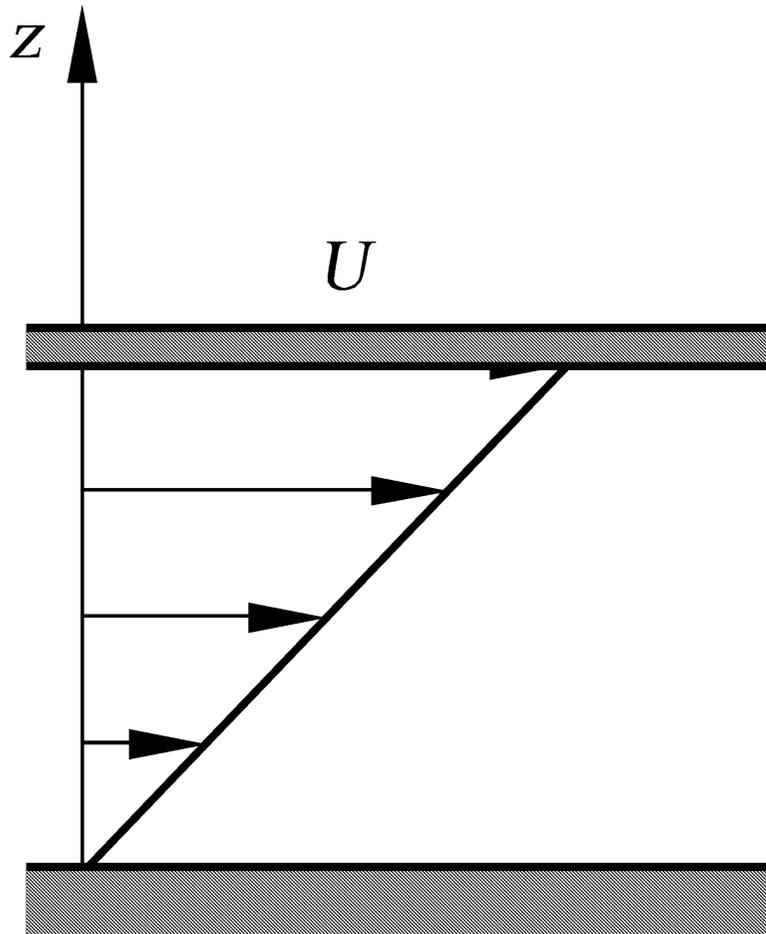
Schubspannung τ für Newtonsche und nicht-Newtonsche Fluide



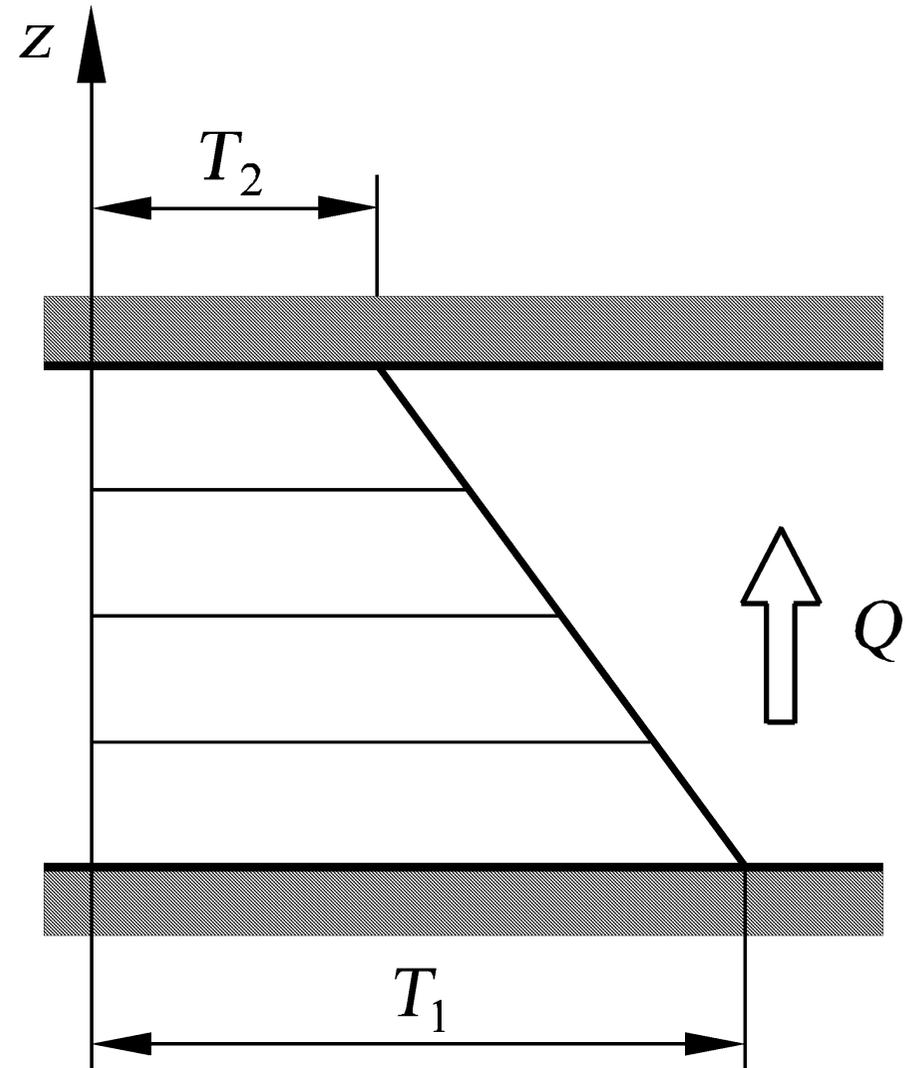
Temperaturabhängigkeit der dynamischen Zähigkeit μ



Analogie zwischen Reibung und Wärmeleitung



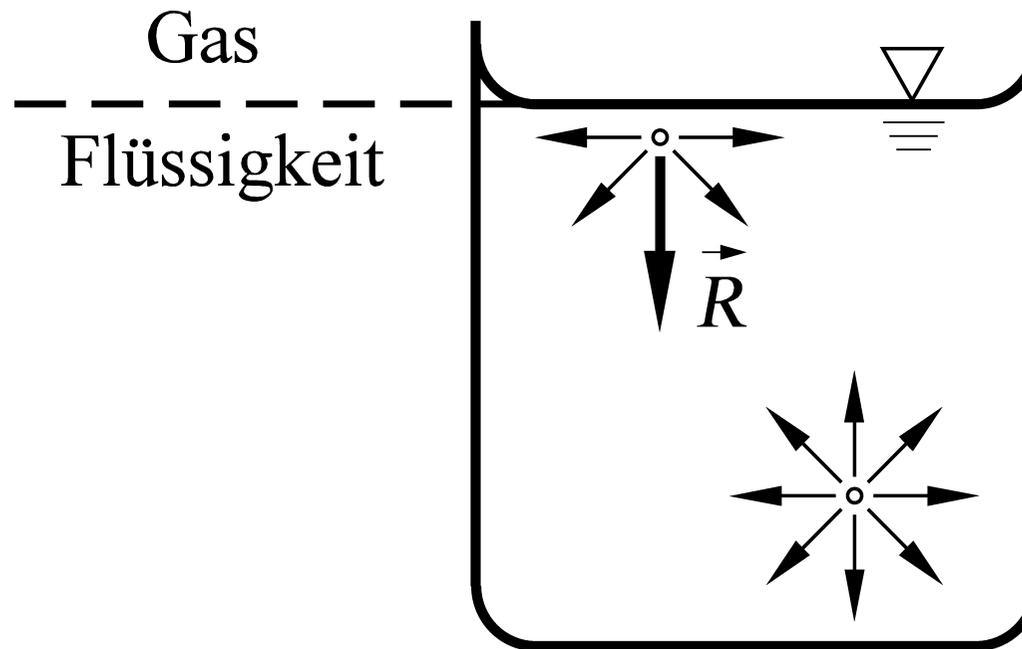
Couette-Strömung



Wärmeleitung



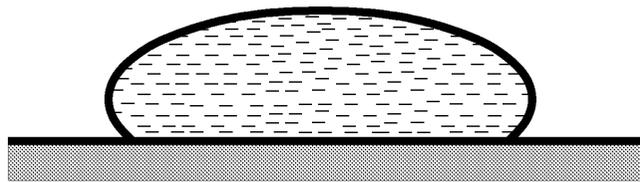
Oberflächenspannung



Experiment: Benetzungswinkel

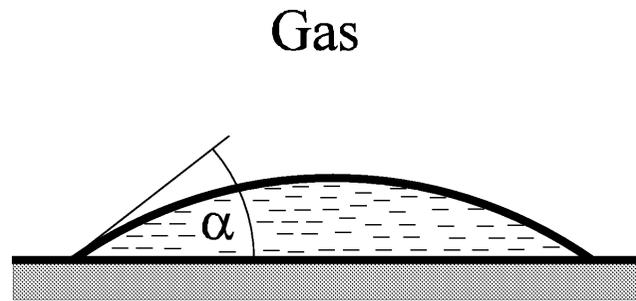


Kontaktwinkel zwischen Festkörper, Quecksilber, Wasser, Öl und Luft



$$\alpha > 90^\circ$$

Quecksilber



$$\alpha < 90^\circ$$

Wasser

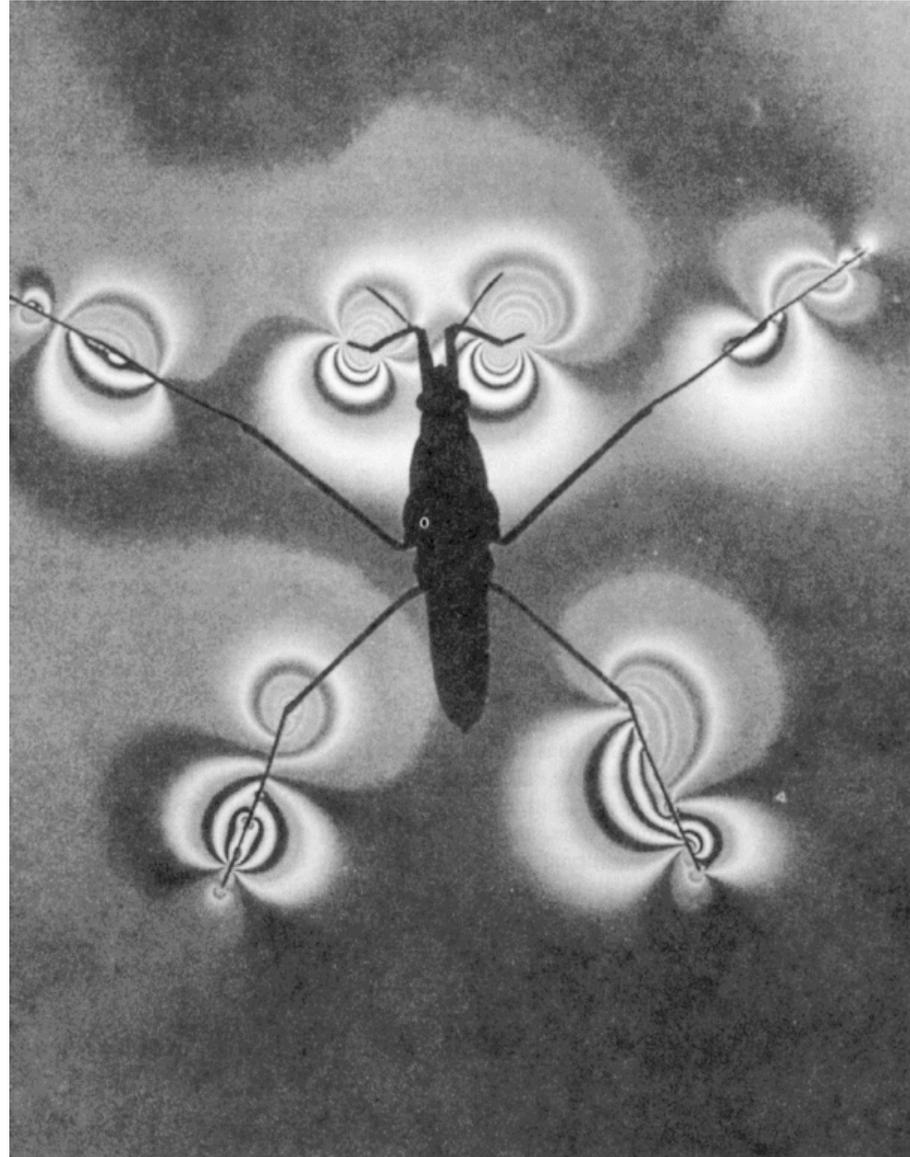


$$\alpha \rightarrow 0$$

Öl



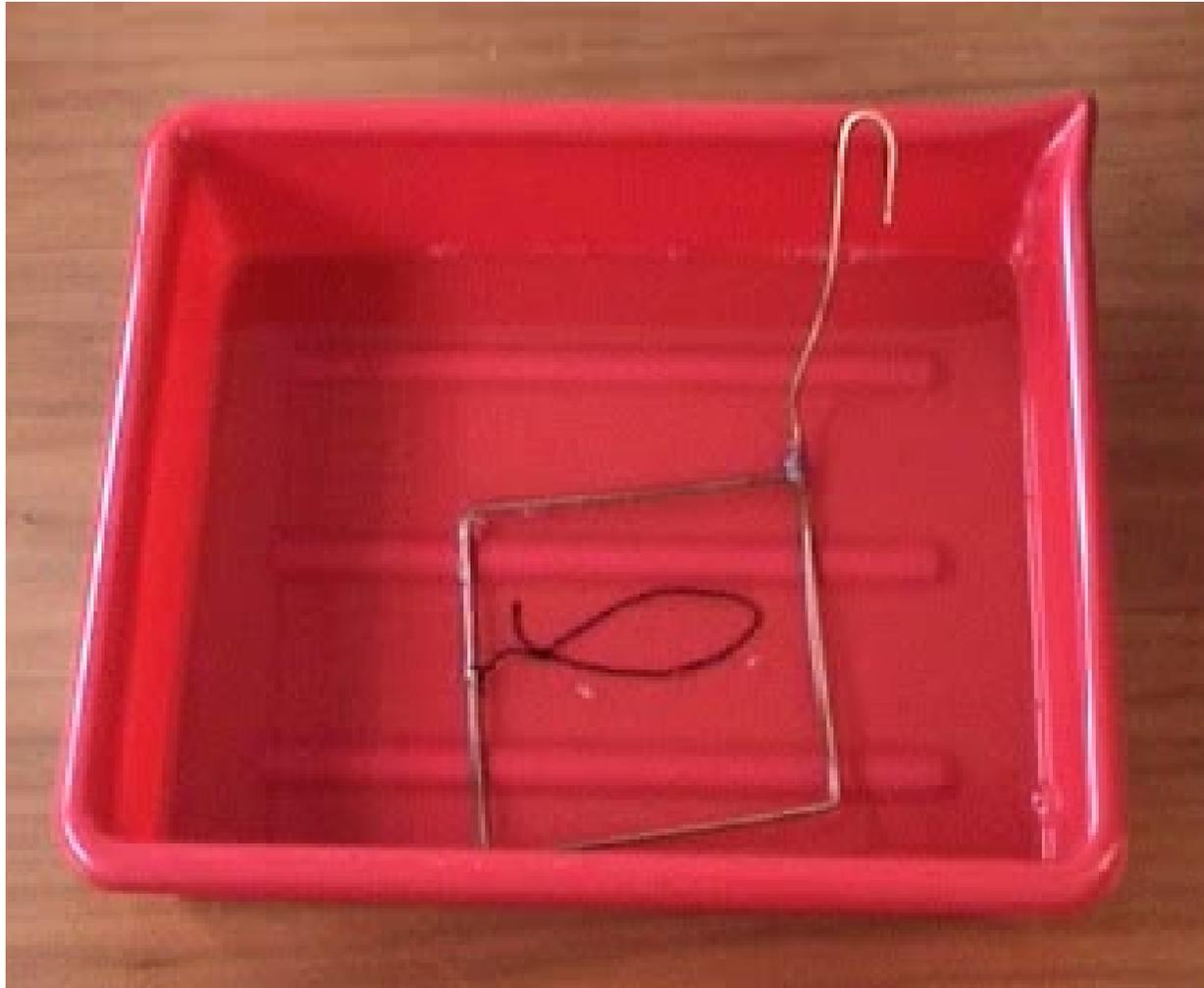
Insekt auf Wasseroberfläche



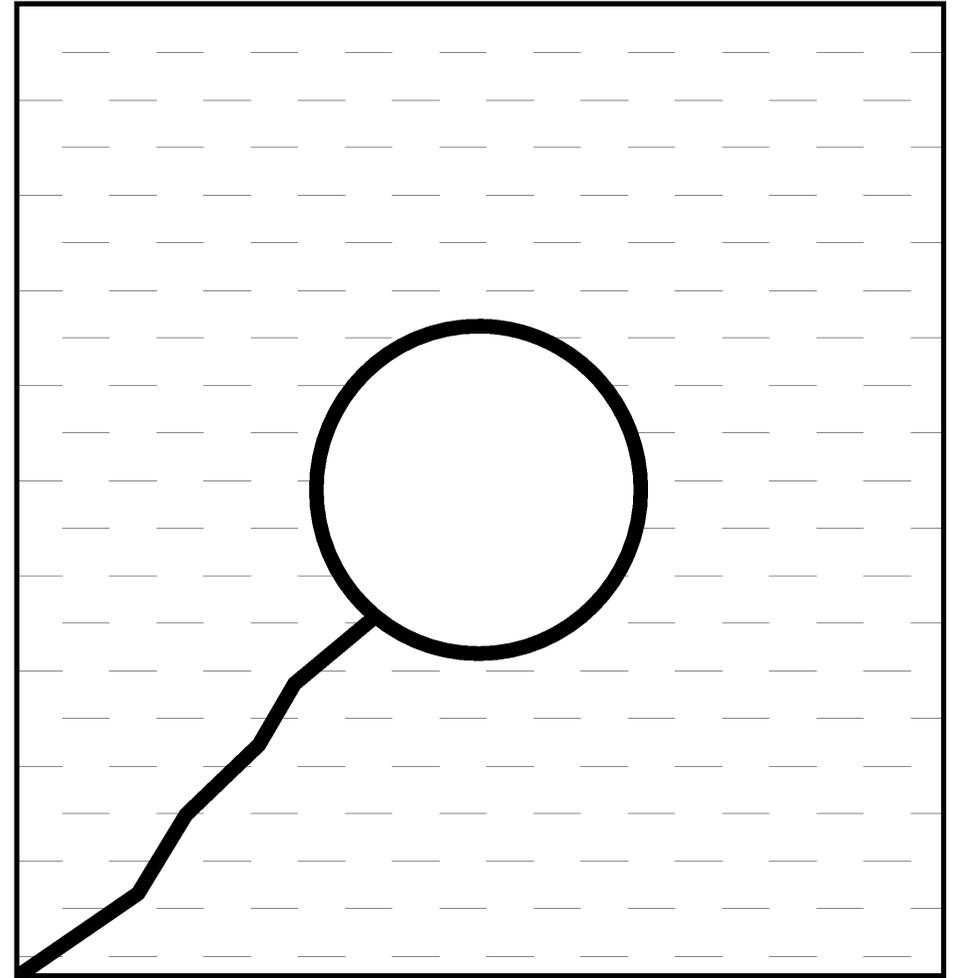
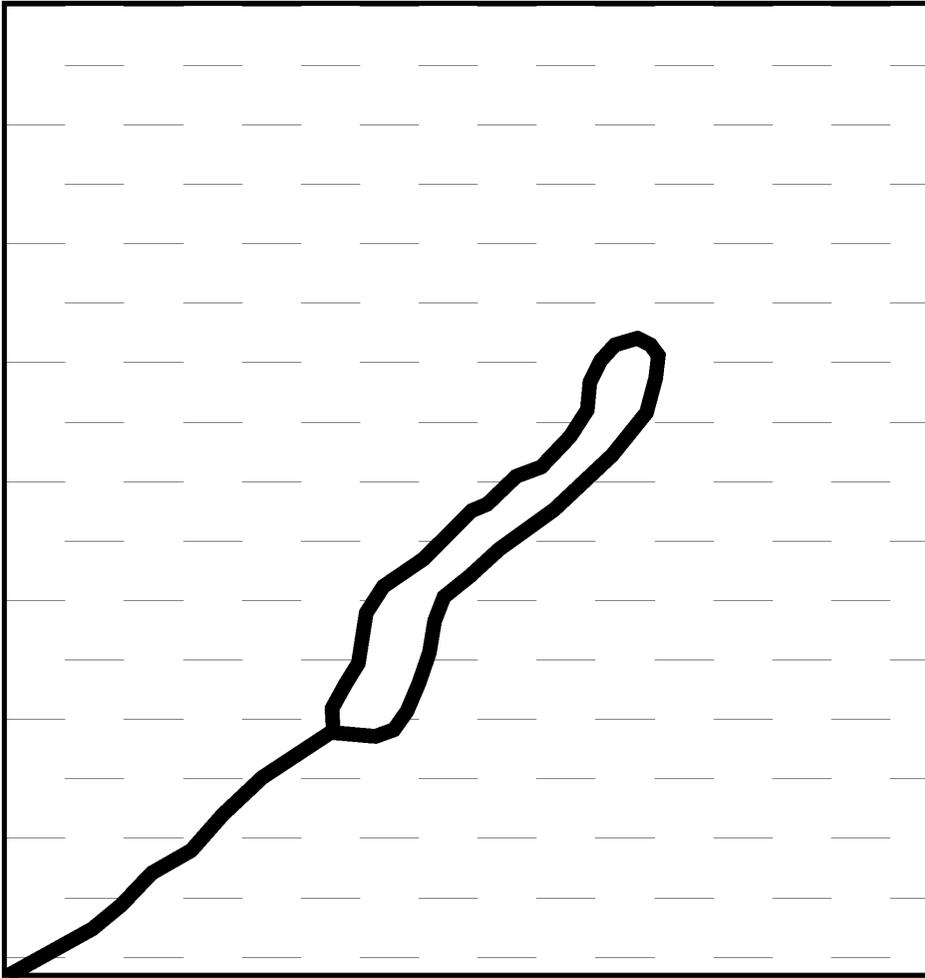
Experiment: Vortrieb Schiffchen



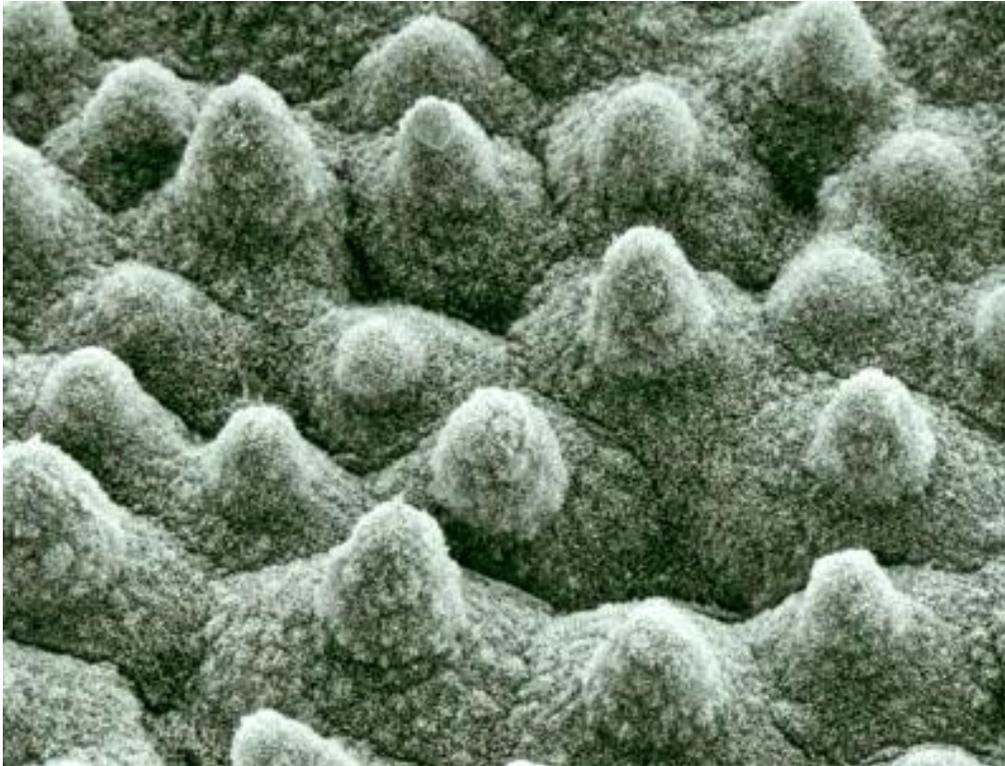
Experiment: Minimalfläche



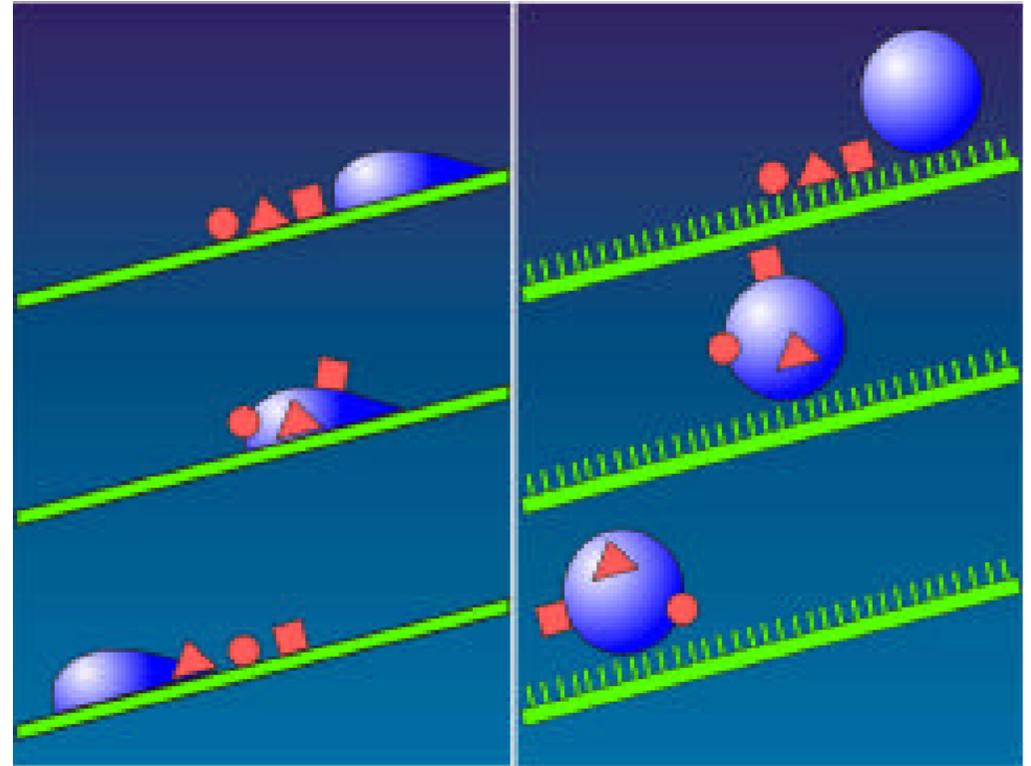
Minimalflächen



Reinigung genoppter Oberflächen



Lotusblume



glatte
Oberfläche

genoppte
Oberfläche



Hydrostatik

Kräftegleichgewicht Fluidelement

Druckverlauf im

Hydrostatisches Paradoxon,
U-Rohrmanometer

Aerostatik

Atmosphäre

Gliederung der Atmosphäre

Temperatur- und Druckverteilung
Atmosphäre

US-Standardatmosphäre

Temperatur- und Druckverlauf
in Standardatmosphäre

Experiment: Brennender Teebeutel

Belastung Stratosphäre

Flugzeug, Kondensstreifen

Internationaler Luftverkehr

Eiskristalle durch Flugverkehr

Wasserdampfgehalt und Ozonpartialdruck
in Atmosphäre

Schadstoffverteilung NO_x

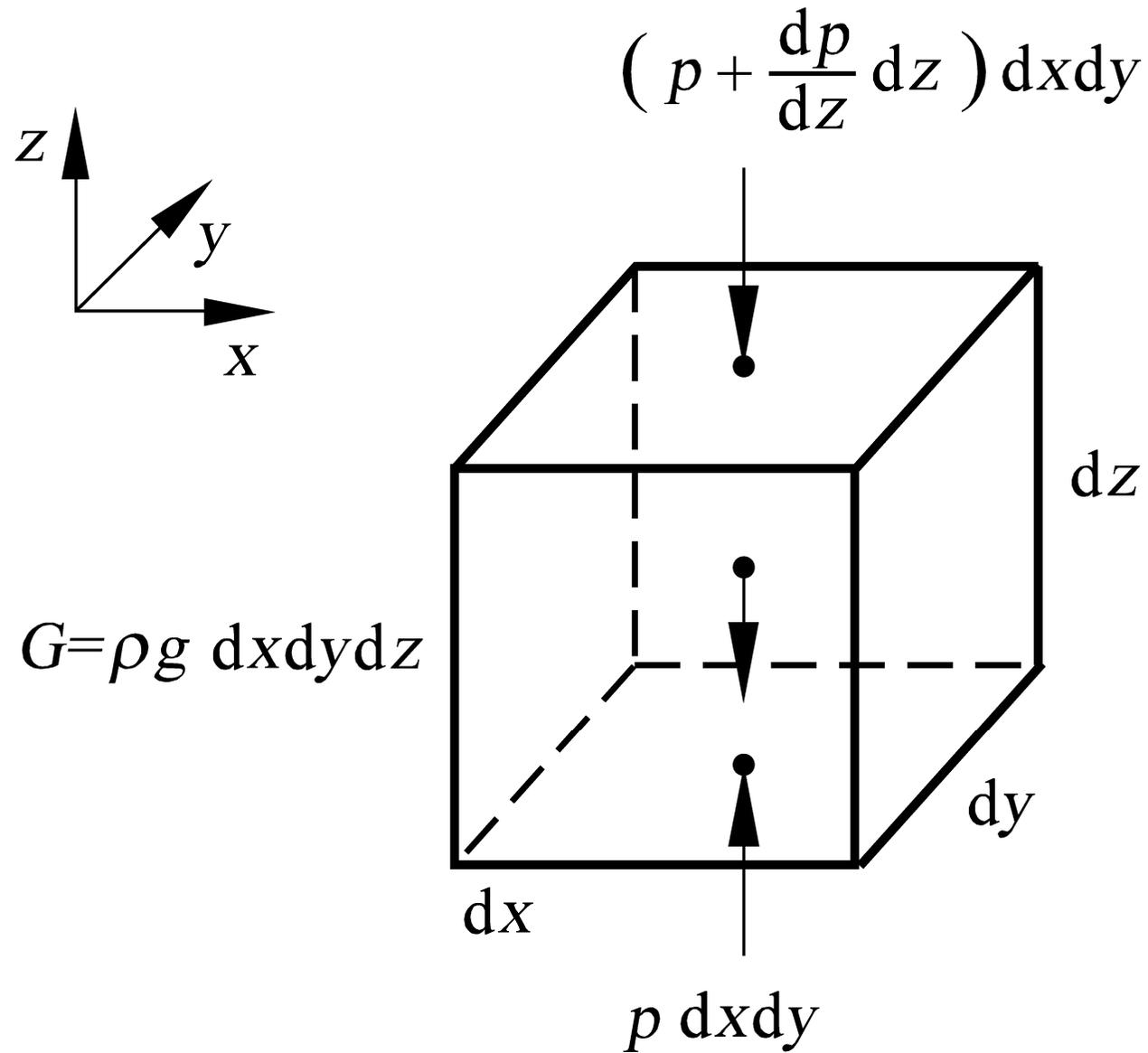
Änderung Lufttemperatur Erdzeitalter

Änderung Lufttemperatur
letztes Jahrhundert

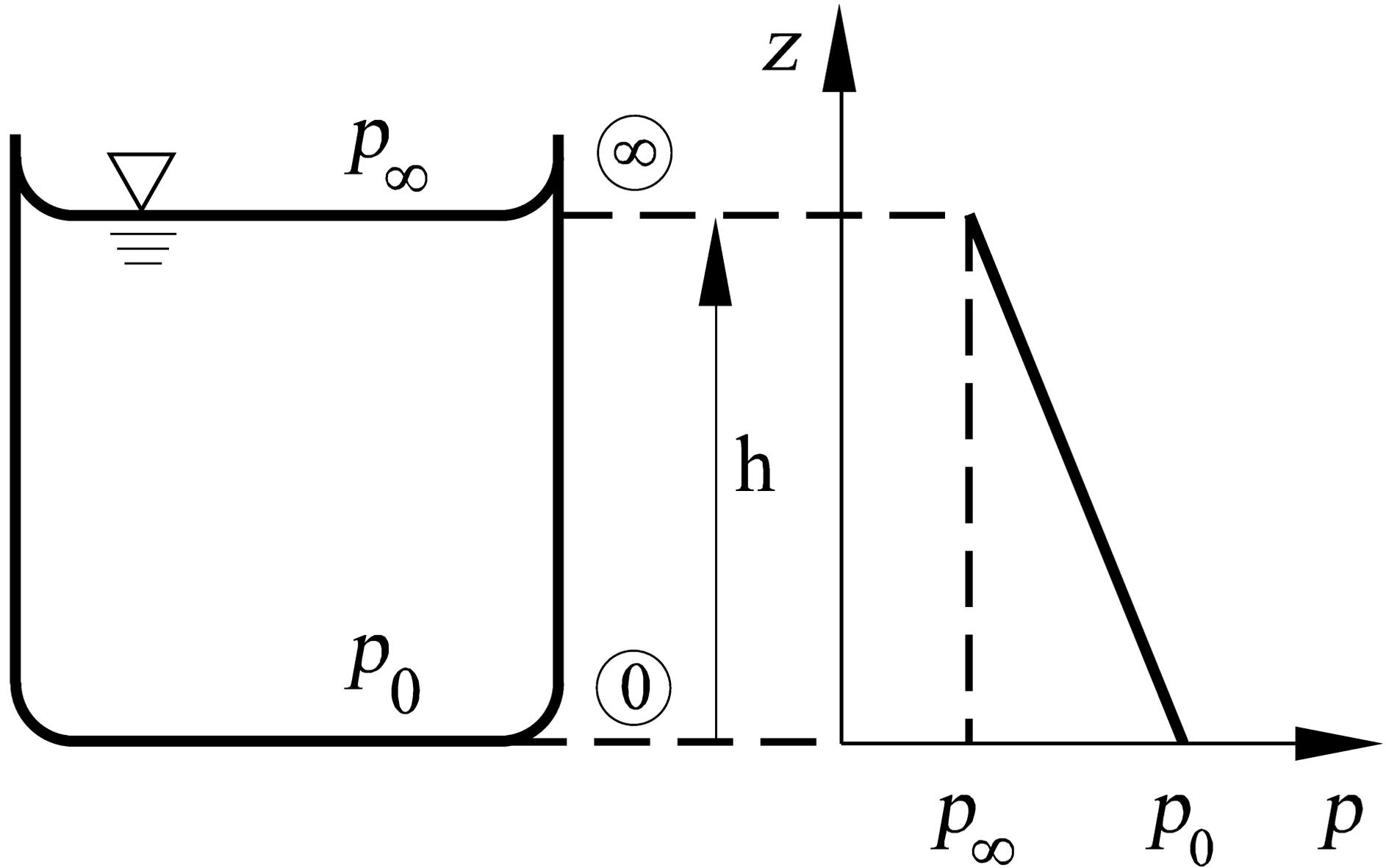
Film: Klimaveränderung



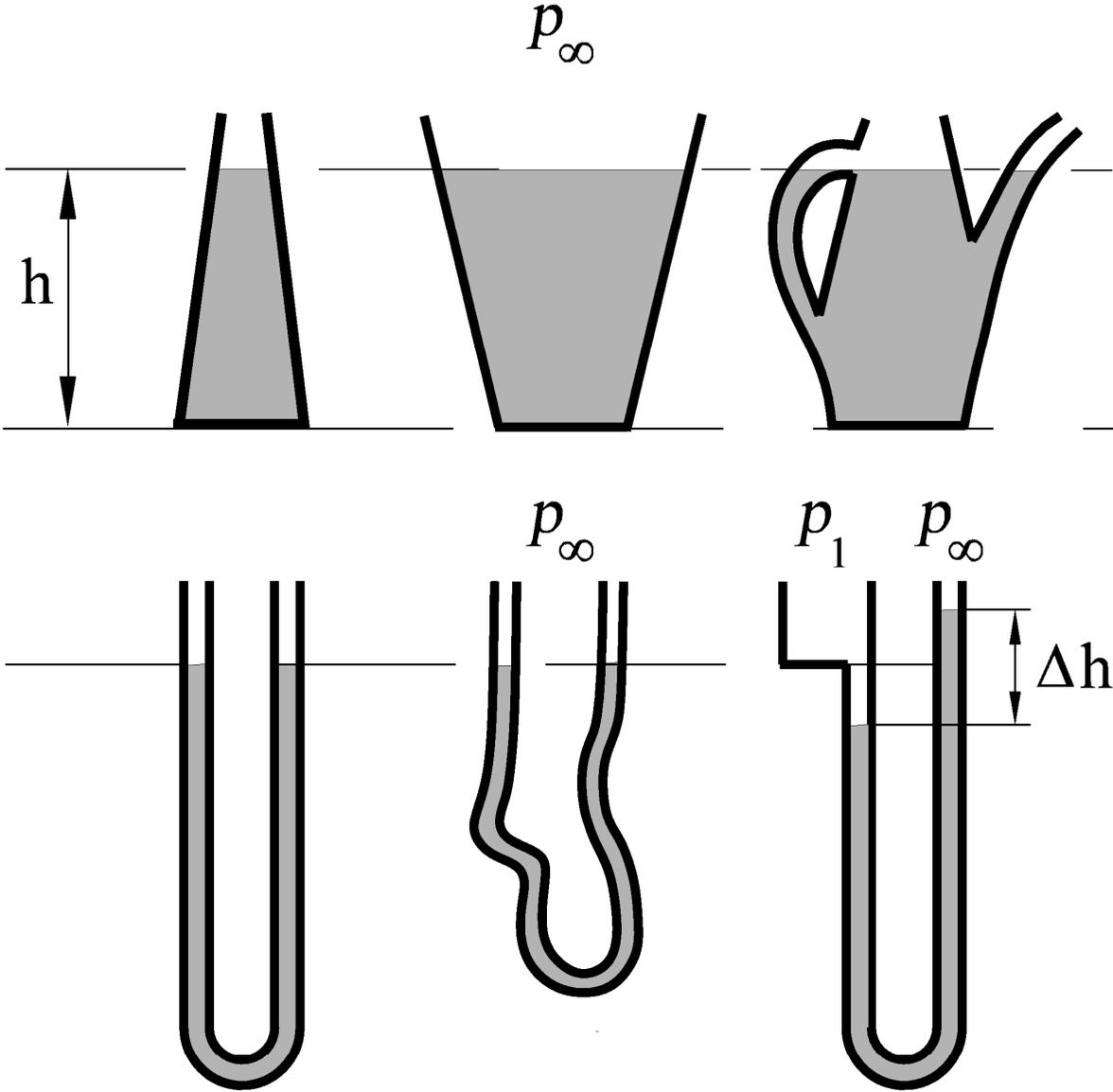
Kräftegleichgewicht am ruhenden Fluidelement



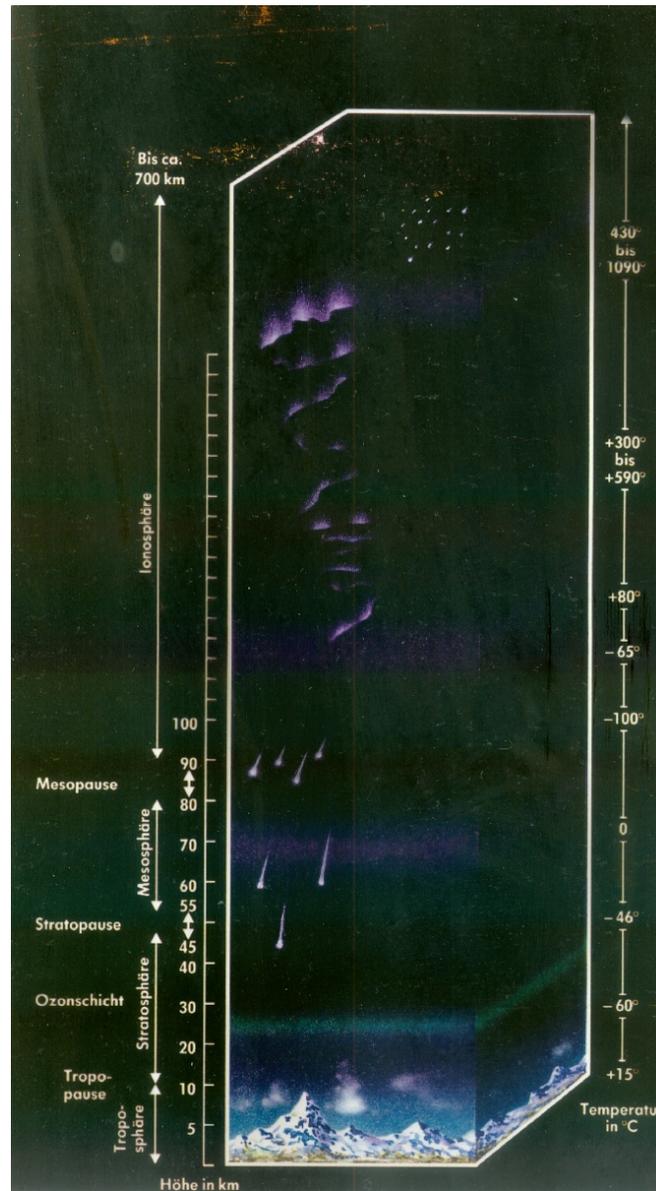
Linearer Druckverlauf im Schwerfeld



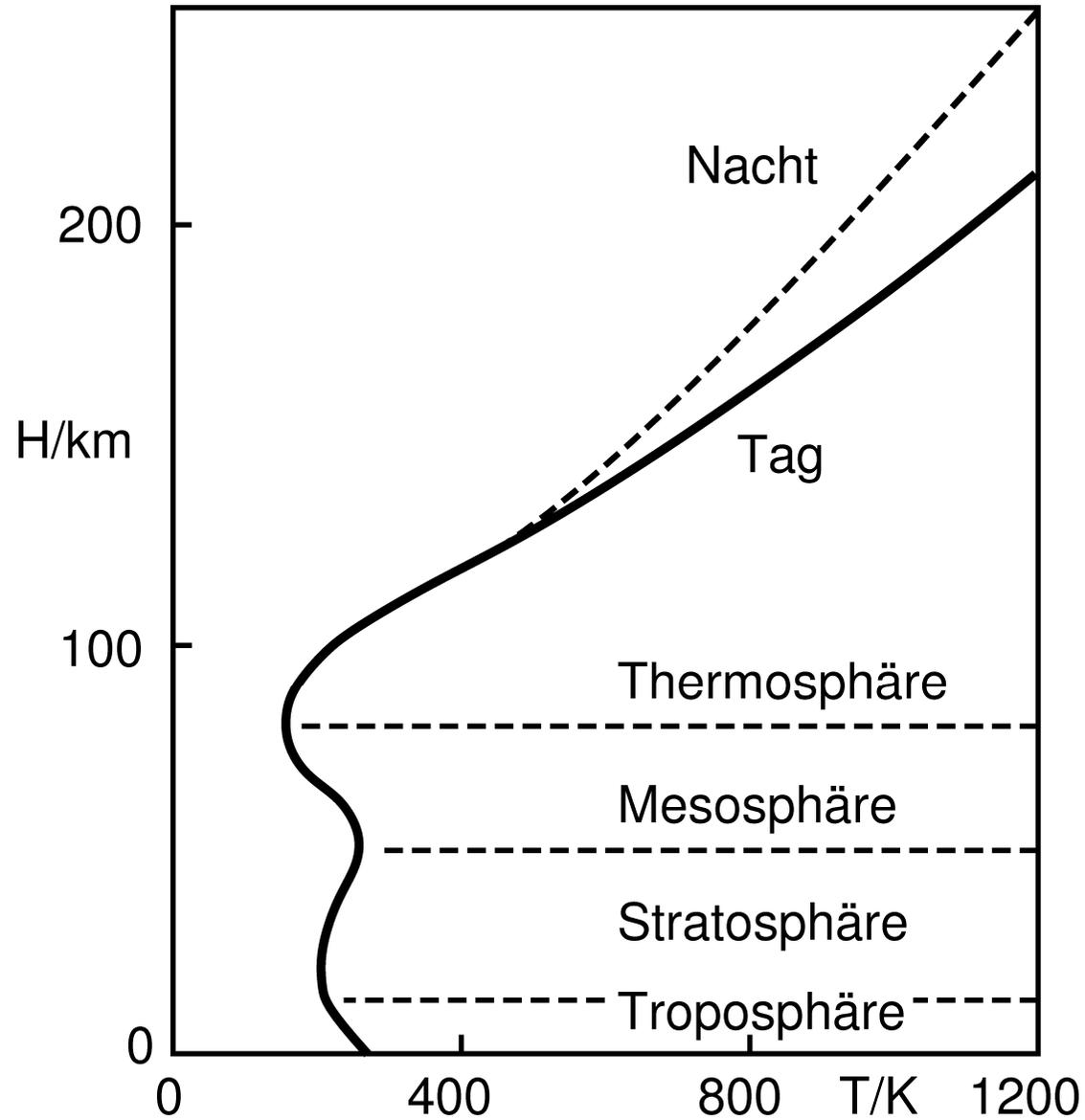
Hydrostatisches Paradoxon, kommunizierende Röhren, U-Rohr Manometer



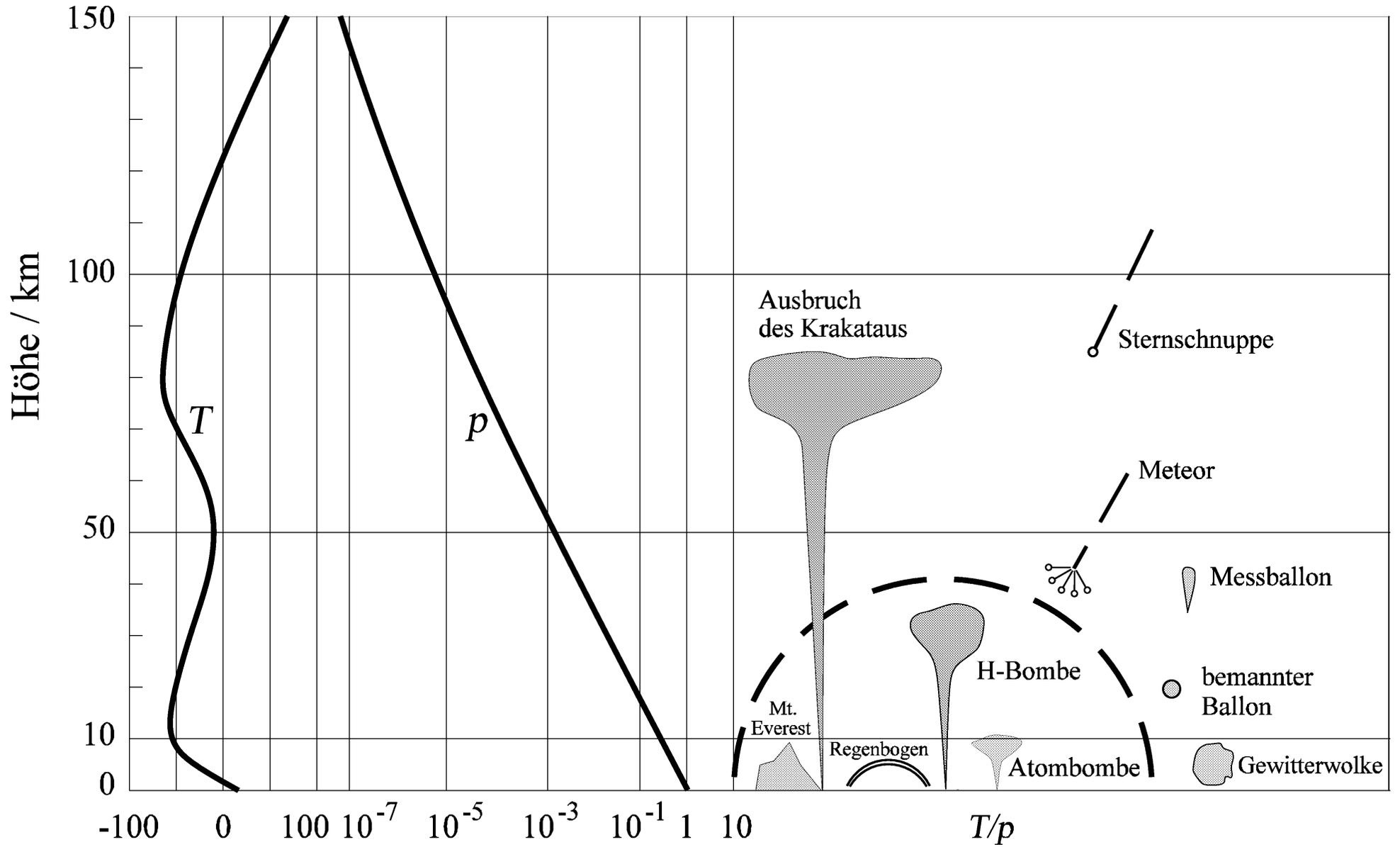
Atmosphäre



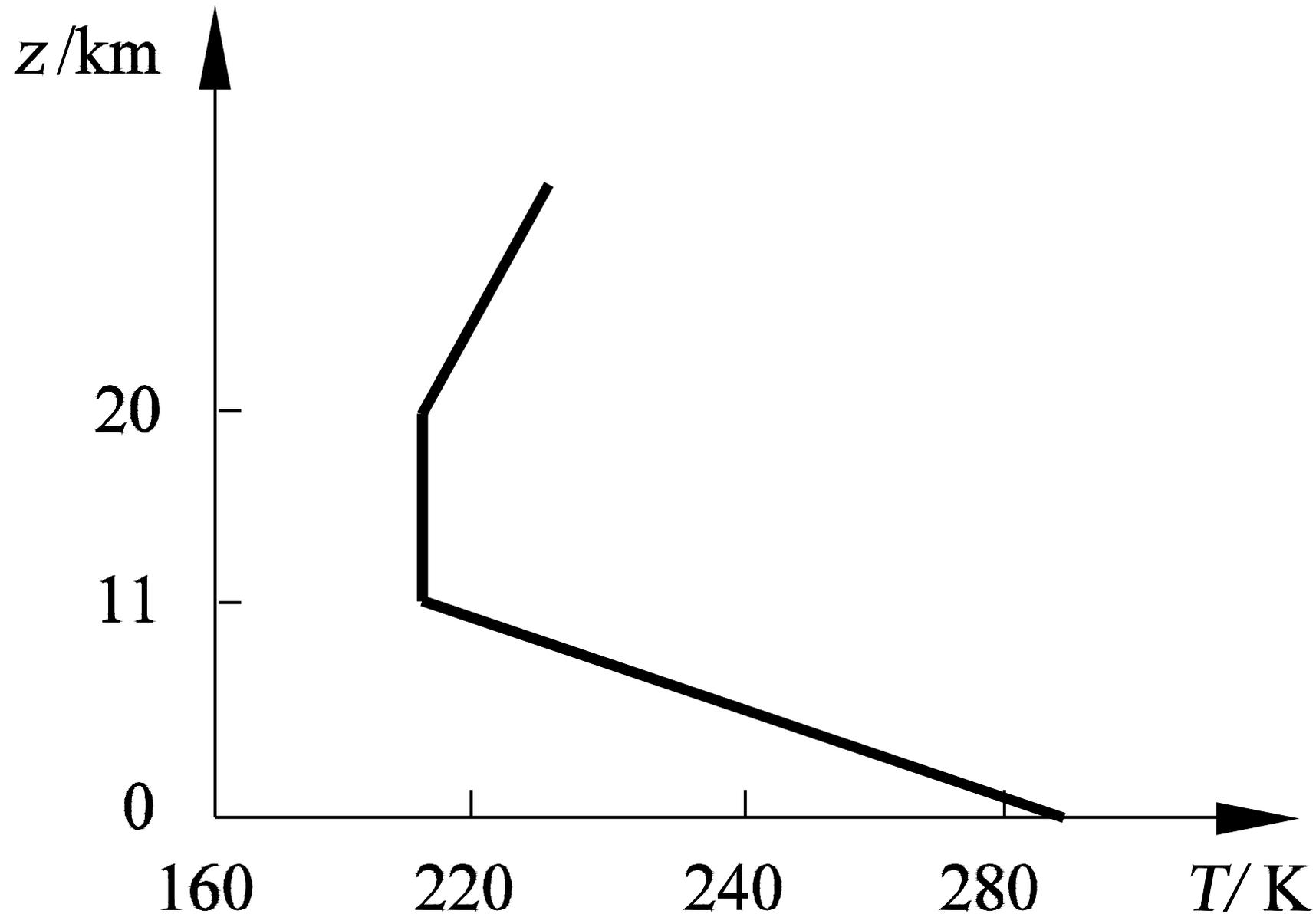
Gliederung der Atmosphäre



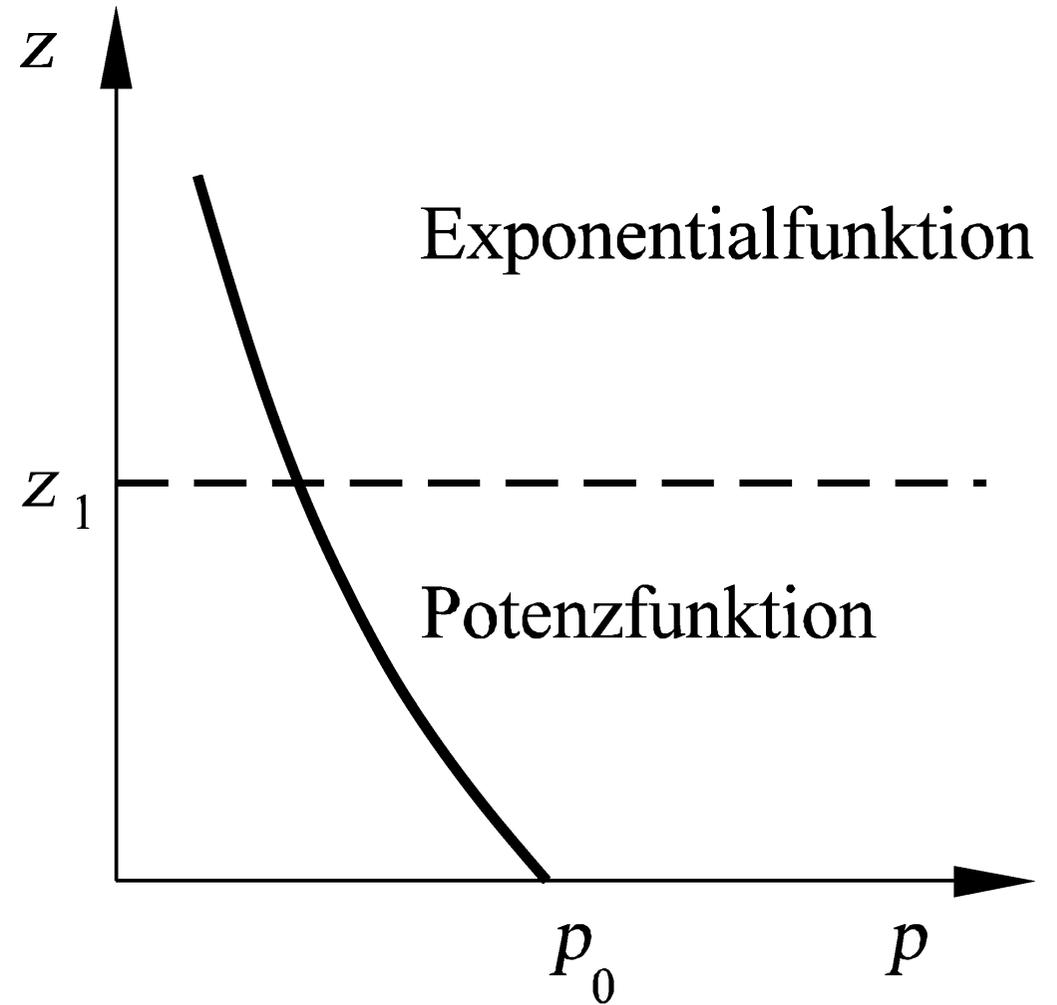
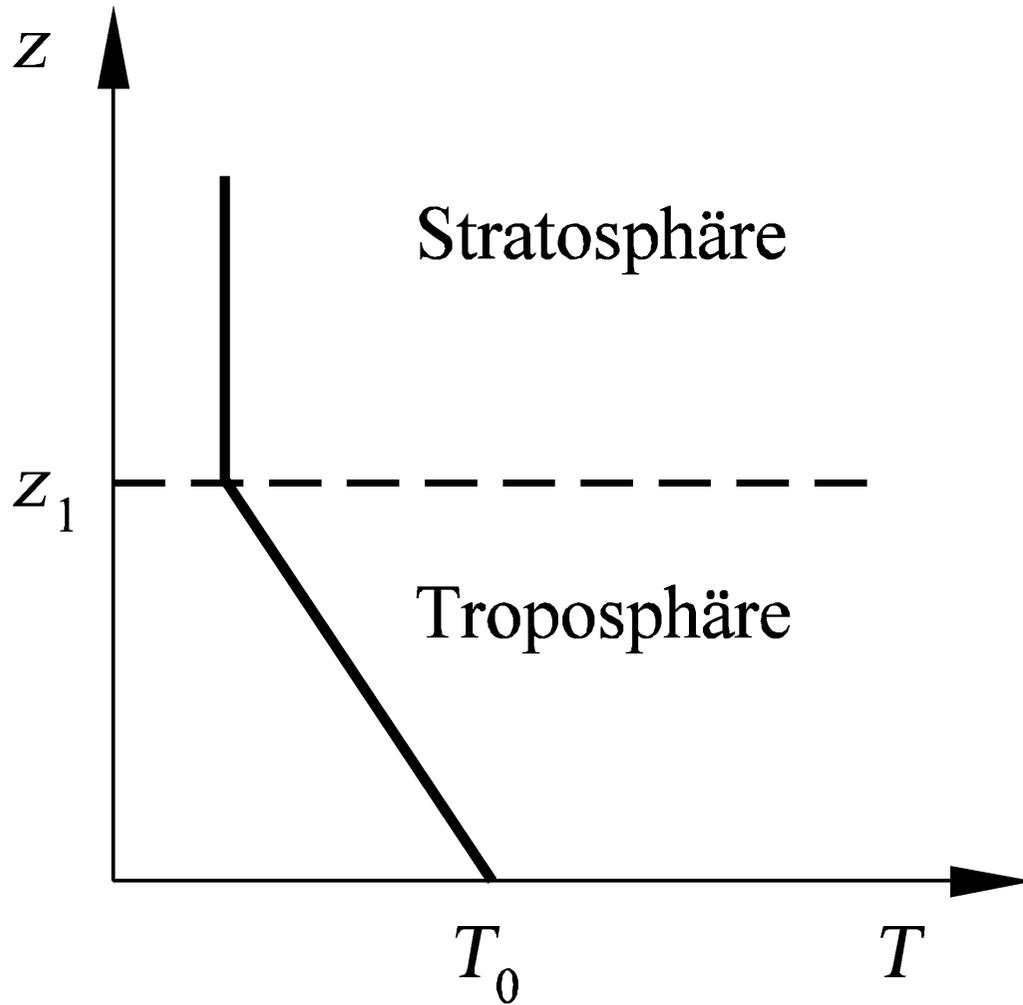
Temperatur- und Druckverteilung in der Atmosphäre



Standardisierter Temperaturverlauf (US-Standardatmosphäre)



Temperatur- und Druckverlauf in der Standardatmosphäre



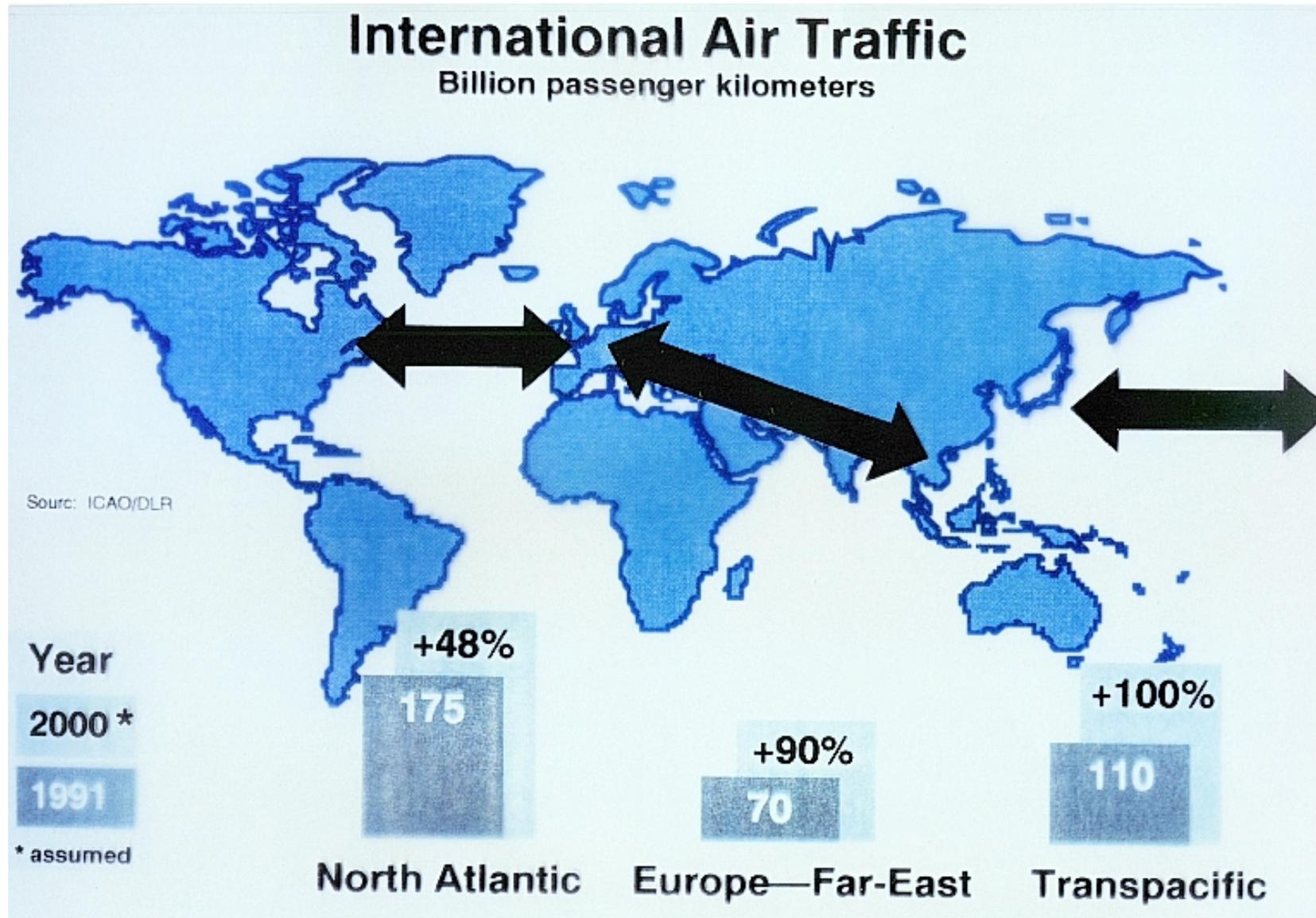
Experiment: Brennender Teebeutel



Kondensstreifen von Flugzeug, Karlsruhe



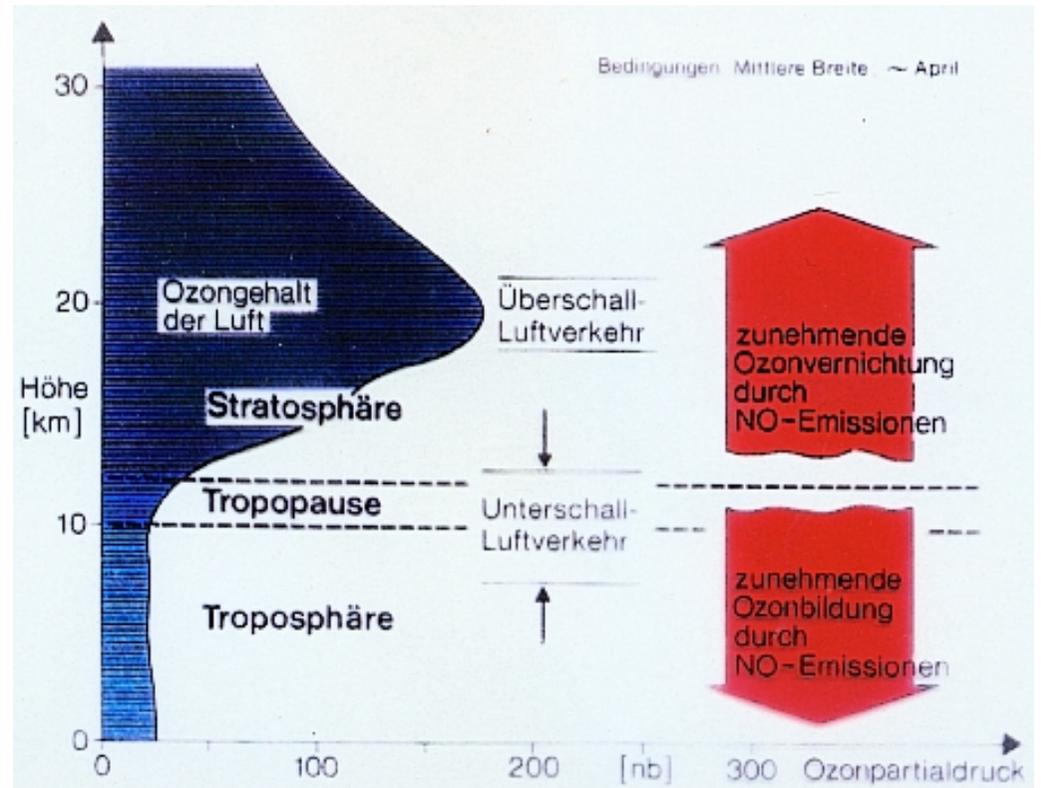
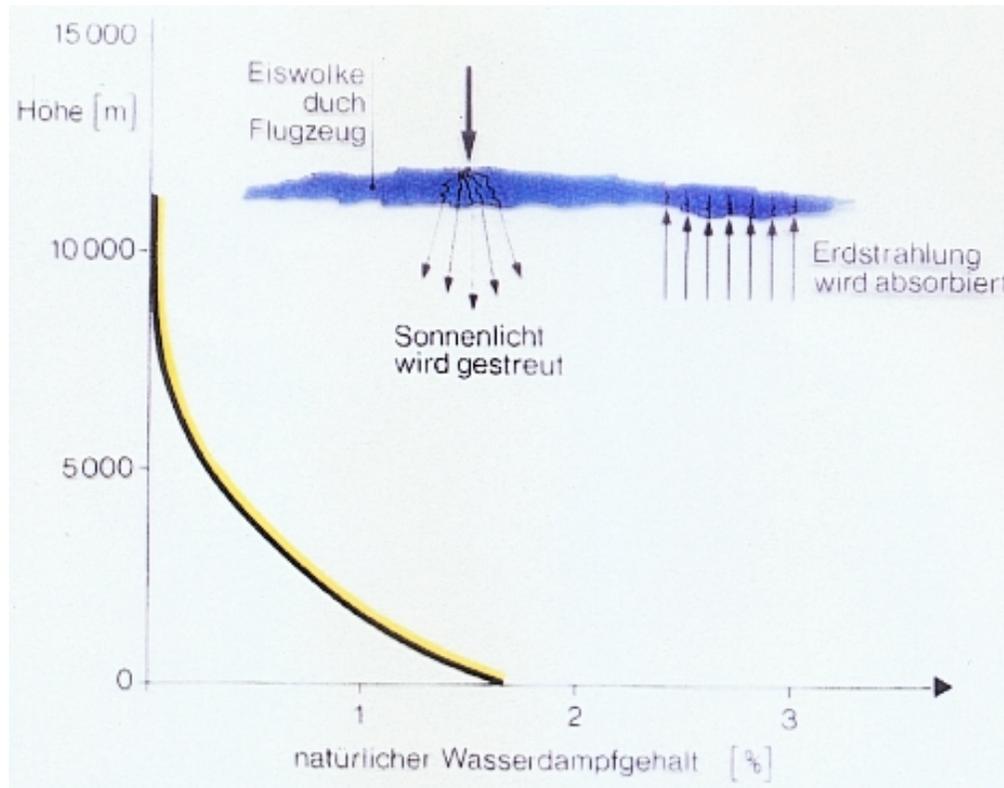
Internationaler Luftverkehr



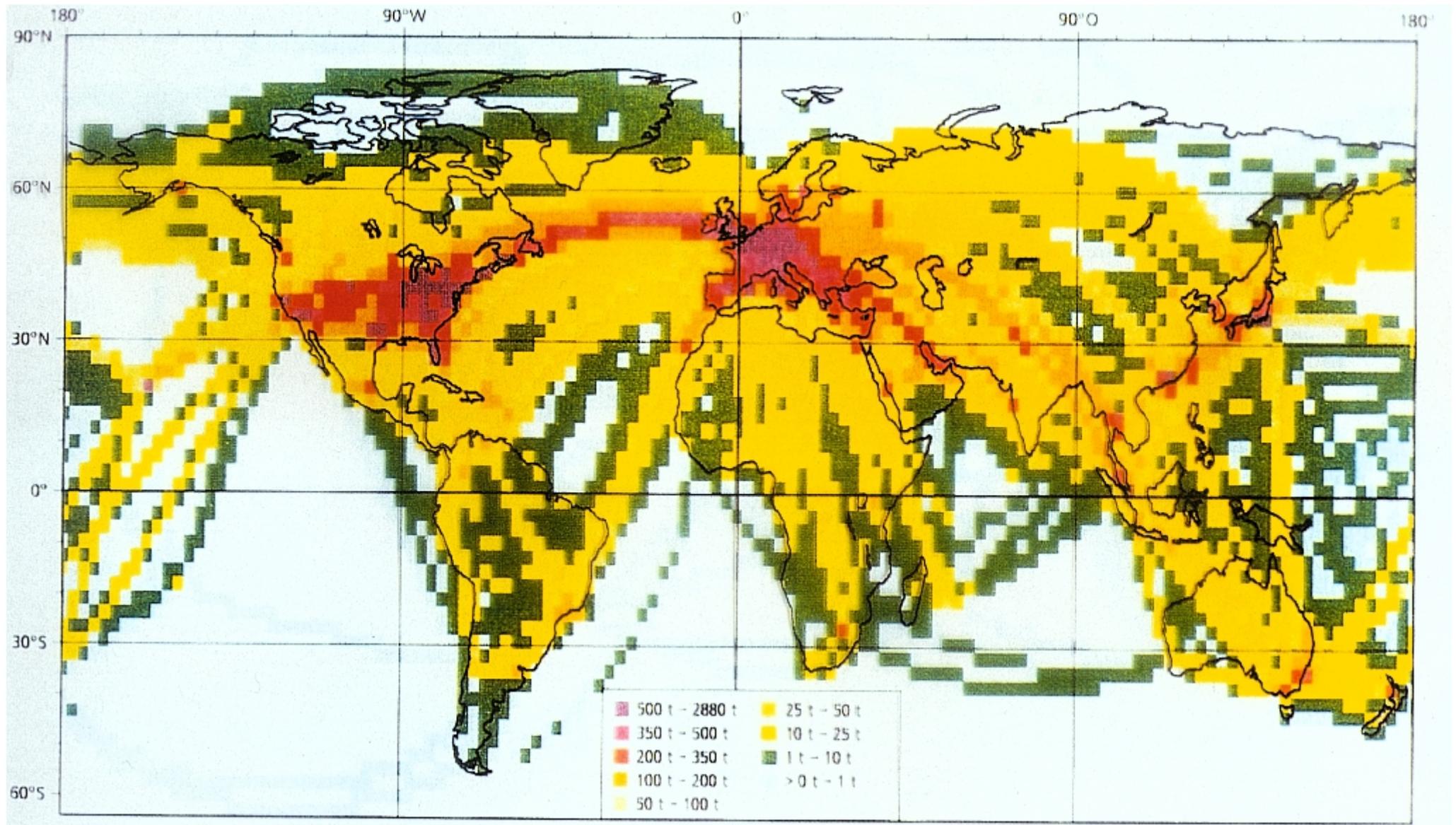
Eiskristalle in Atmosphäre durch Luftverkehr, Kufstein



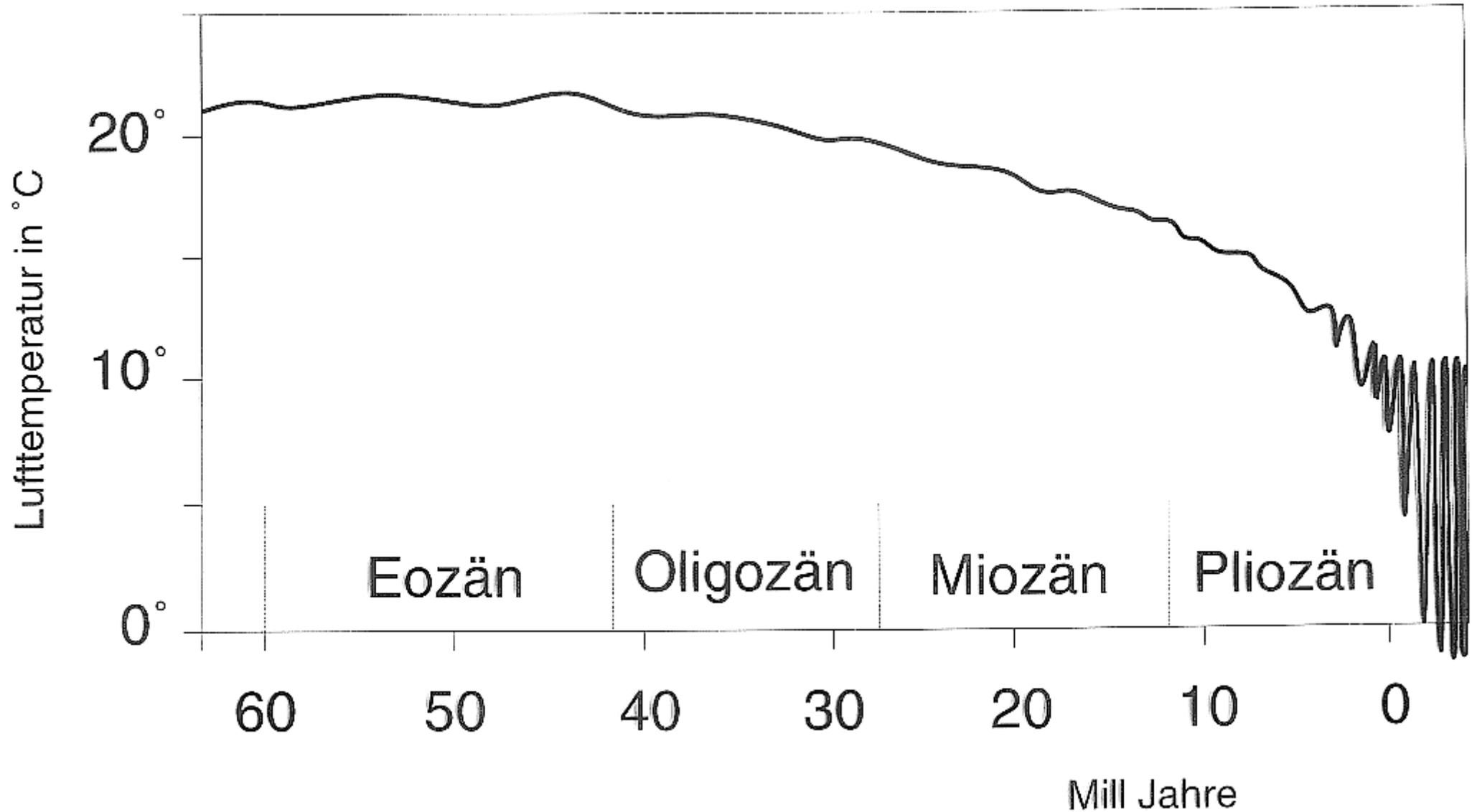
Wasserdampfgehalt und Ozonpartialdruck in der Atmosphäre



Schadstoffverteilung von No_x auf der Erde

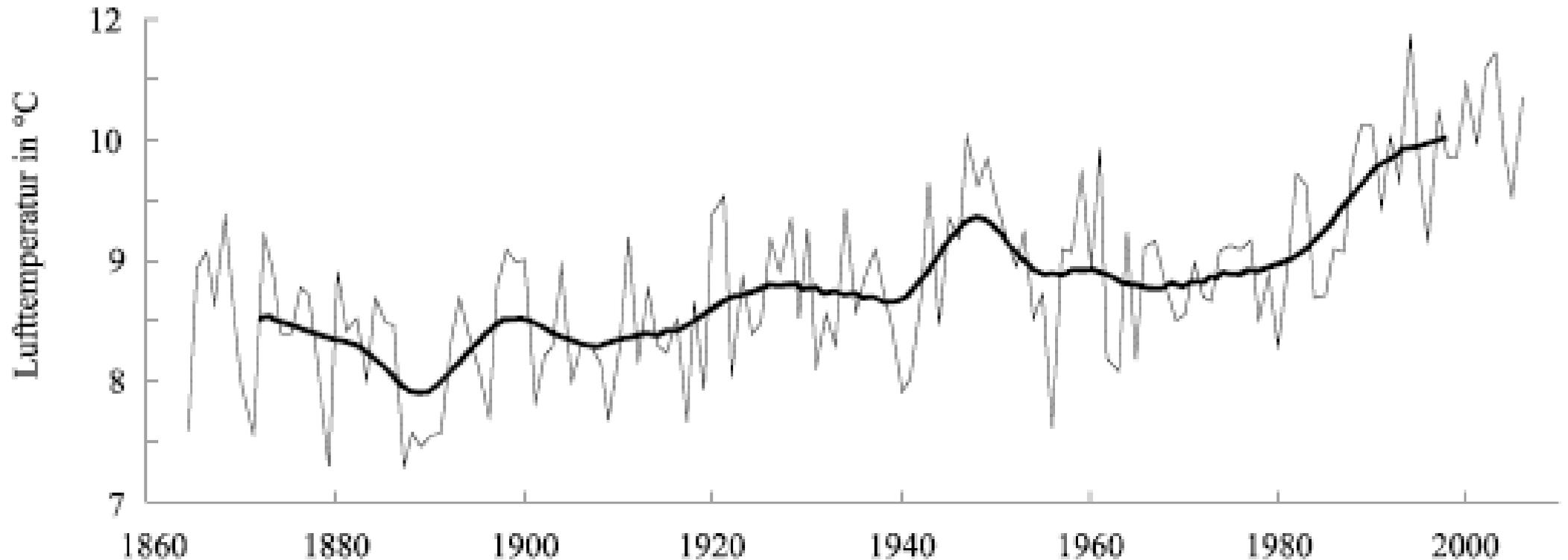


Änderung der Lufttemperatur mit den Erdzeitaltern



Änderung der Lufttemperatur vom letzten Jahrhundert bis heute

20-jährige übergreifende Jahresmittel der Lufttemperatur



Film: Klimaveränderung



Kinematik

Teilchenbahn

Experiment: Farbfaden, freie Anströmung

Stromlinie

Streichlinie

Experiment: Brennende Zigarette

Experiment: Laminarer Farbfaden, Profil

Experiment: Laminarer Farbfaden, angestelltes Profil

Film: Streichlinien, Profil

Film: Streichlinien, angestelltes Profil

Teilchenbahnen, Strom- und Steichlinien, Platte, Tragflügel, Kraftfahrzeug

Kugelumströmung

ruhender, mitbewegter Beobachter

Welle in Grenzschicht

ruhender, mitbewegter Beobachter

Experiment: Kármánsche Wirbelstraße

Experiment: Teilchenbahn, bewegter Zyl.

Kármánsche Wirbelstraße

ruhender, mitbewegter Beobachter

Film: Kármánsche Wirbelstraße

Kármánsche Wirbelstraße

Streichlinie, Teilchenbahn, Stromlinie

Kármánsche Wirbelstraße Jan Mayen

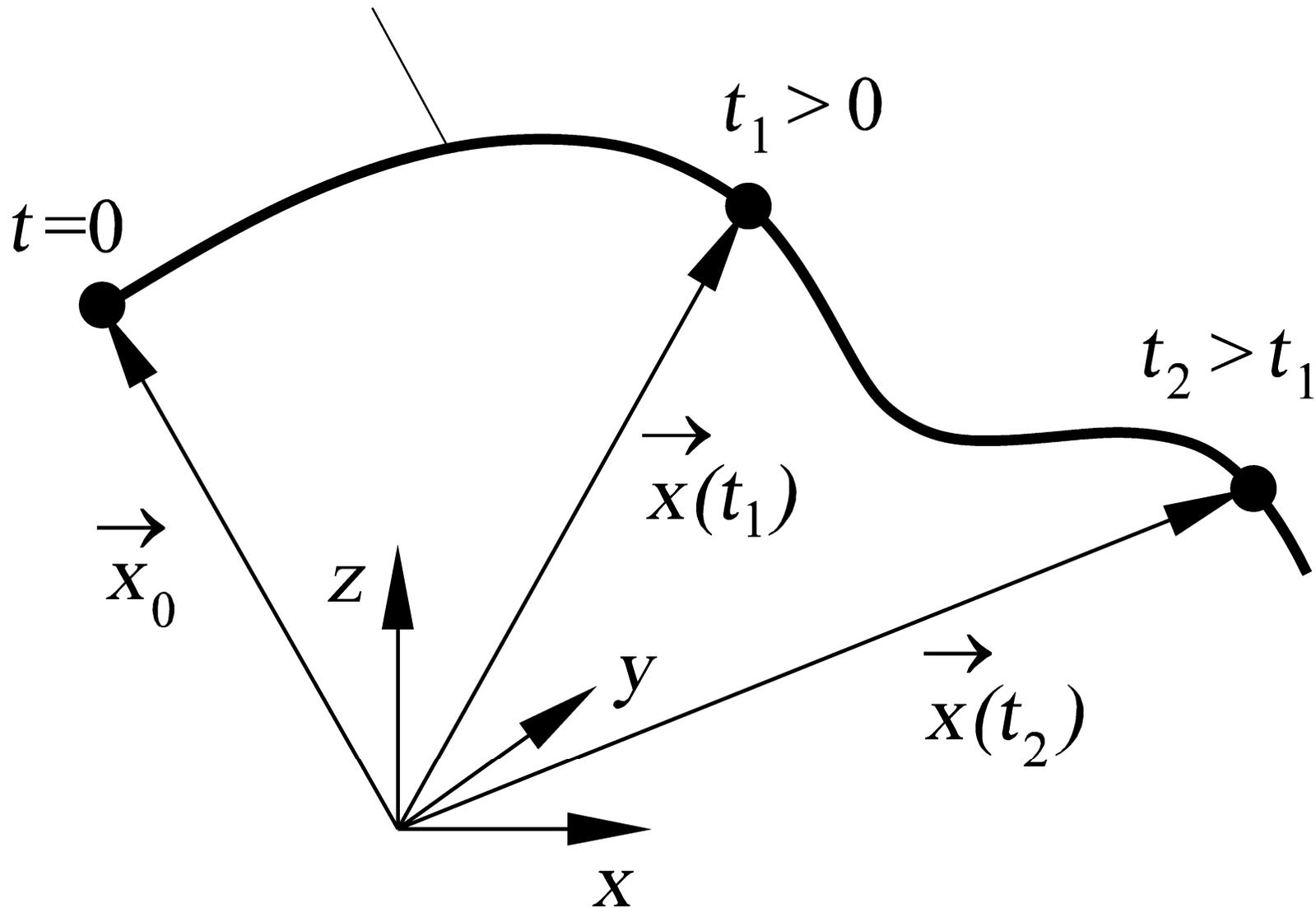
Euler-Lagrange

Totales Differential



Teilchenbahn

Teilchenbahn



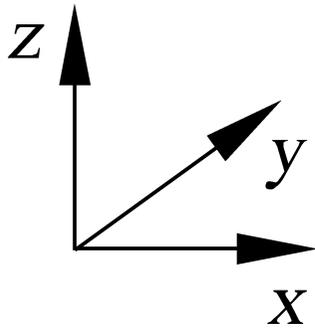
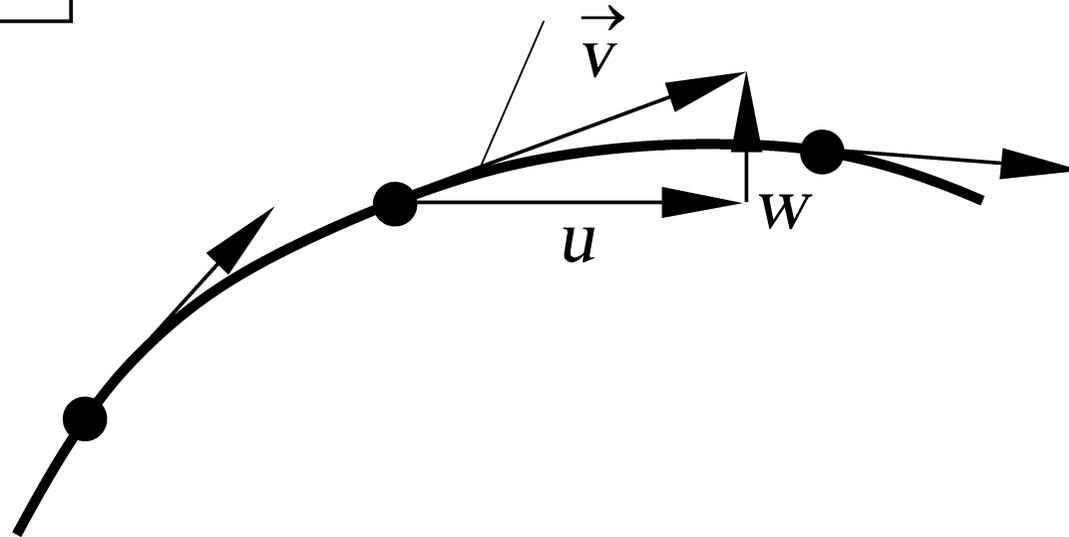
Experiment: Laminarer Farbfaden in freier Strömung



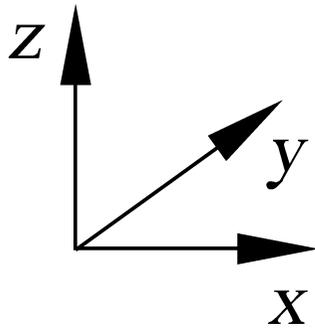
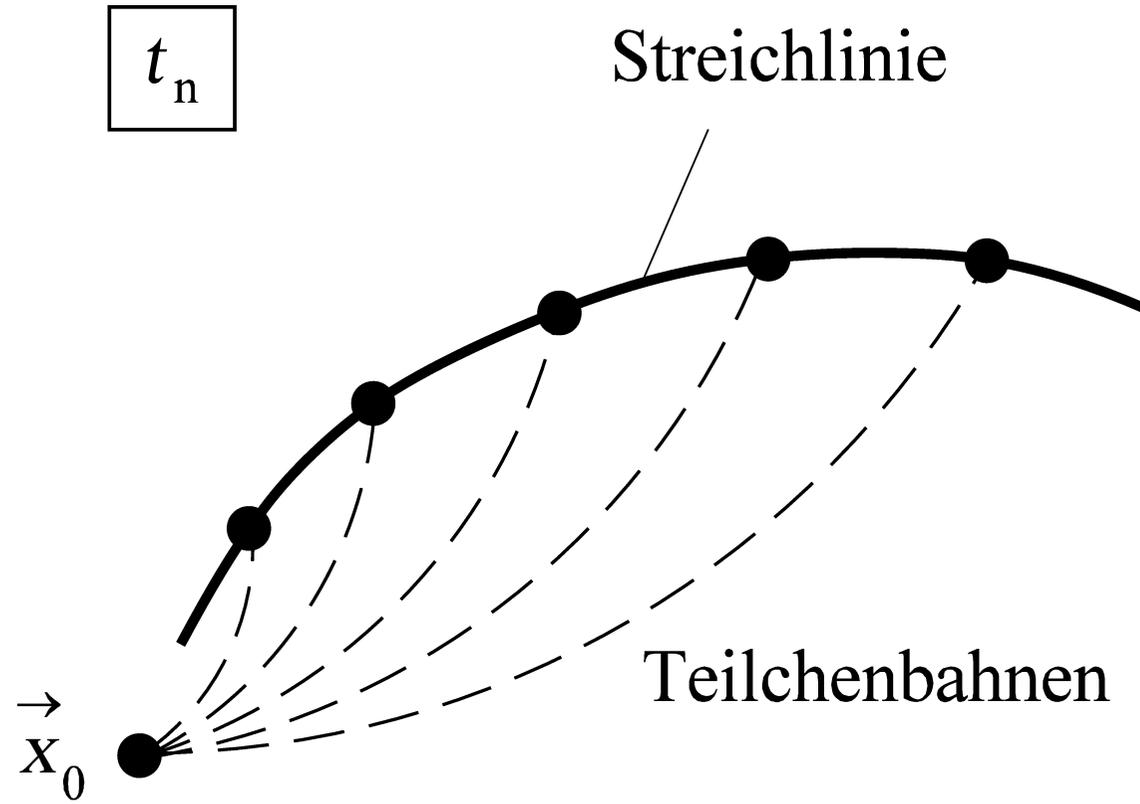
Stromlinie

t_n

Stromlinie



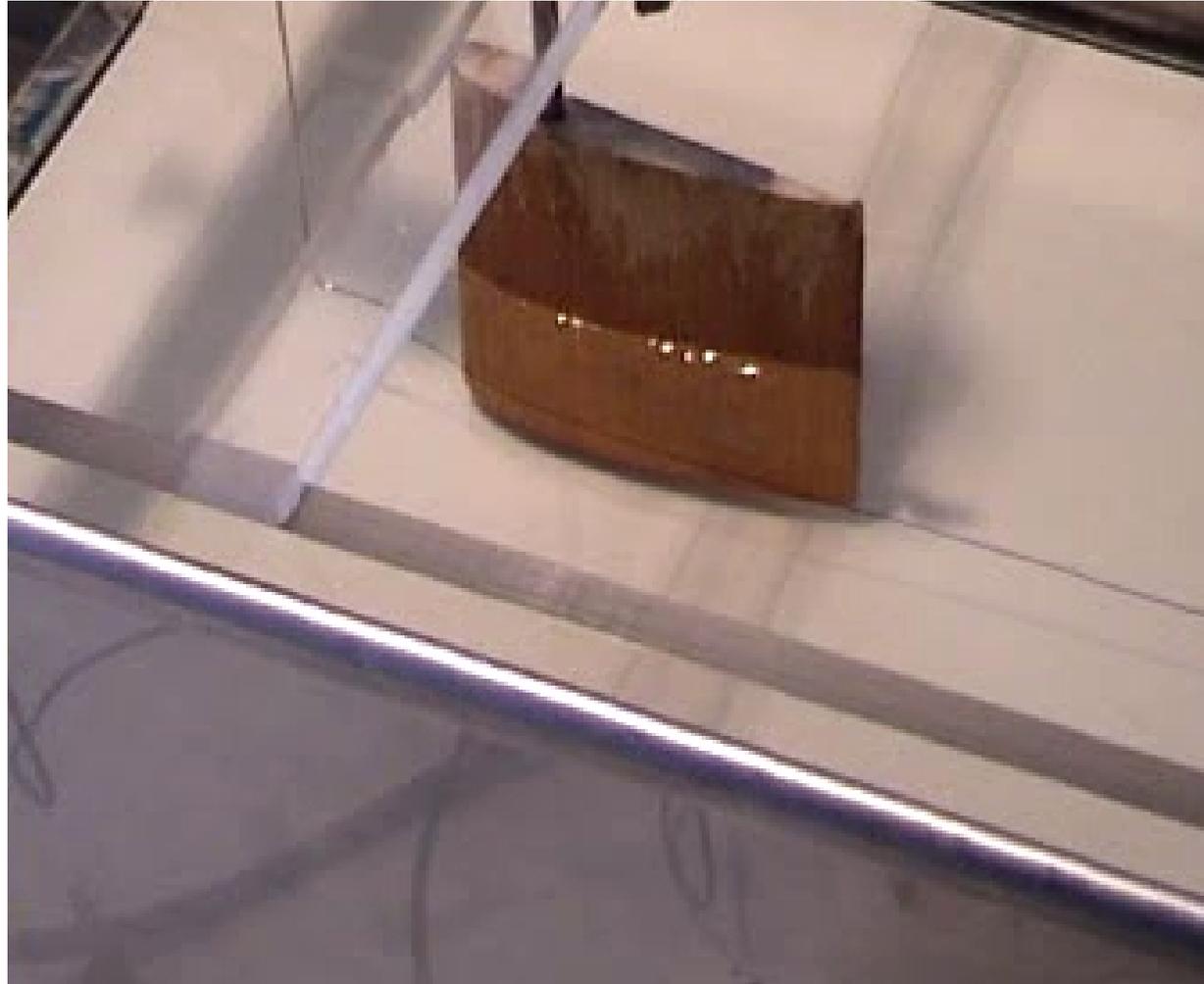
Streichlinie



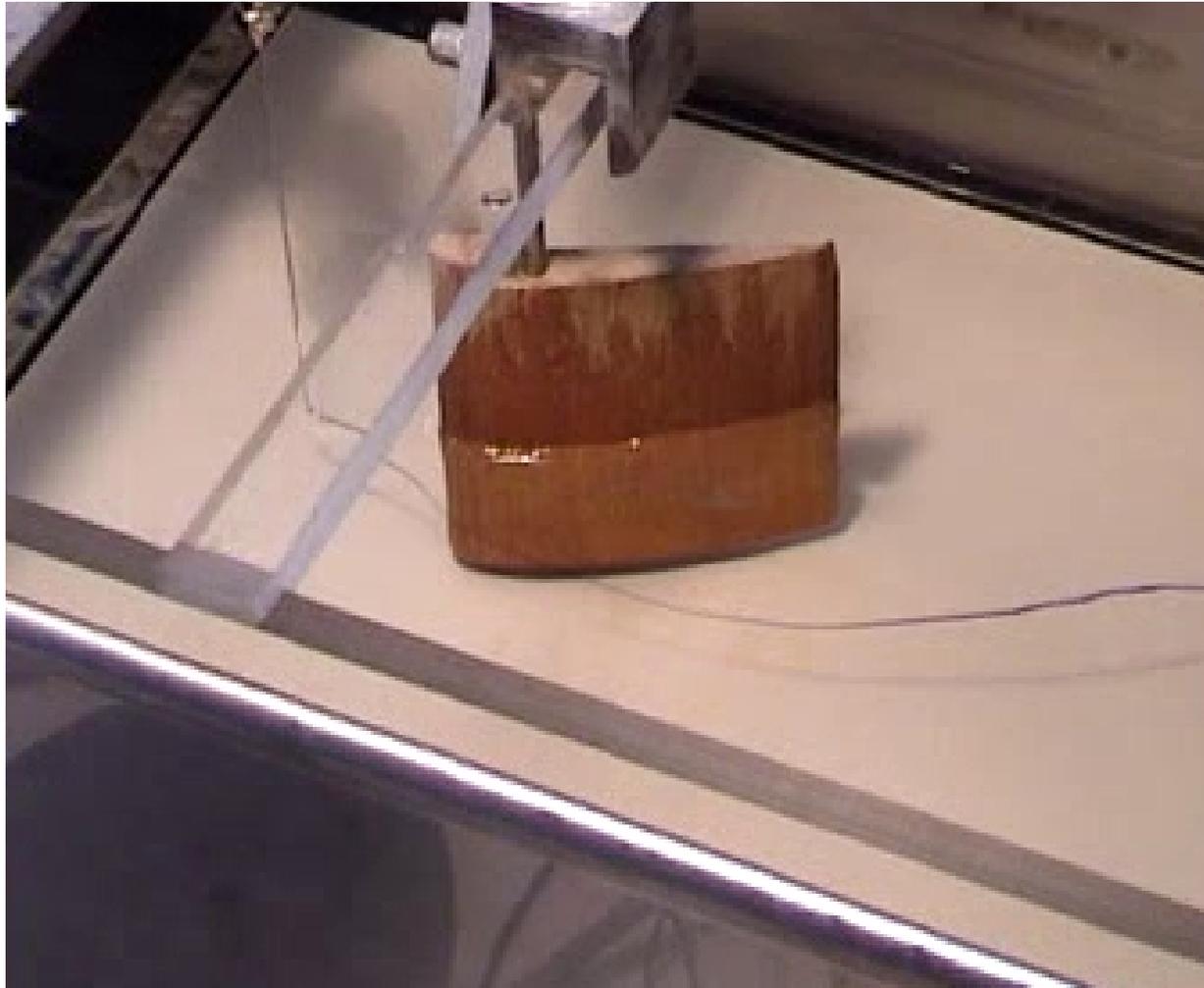
Experiment: Brennende Zigarette



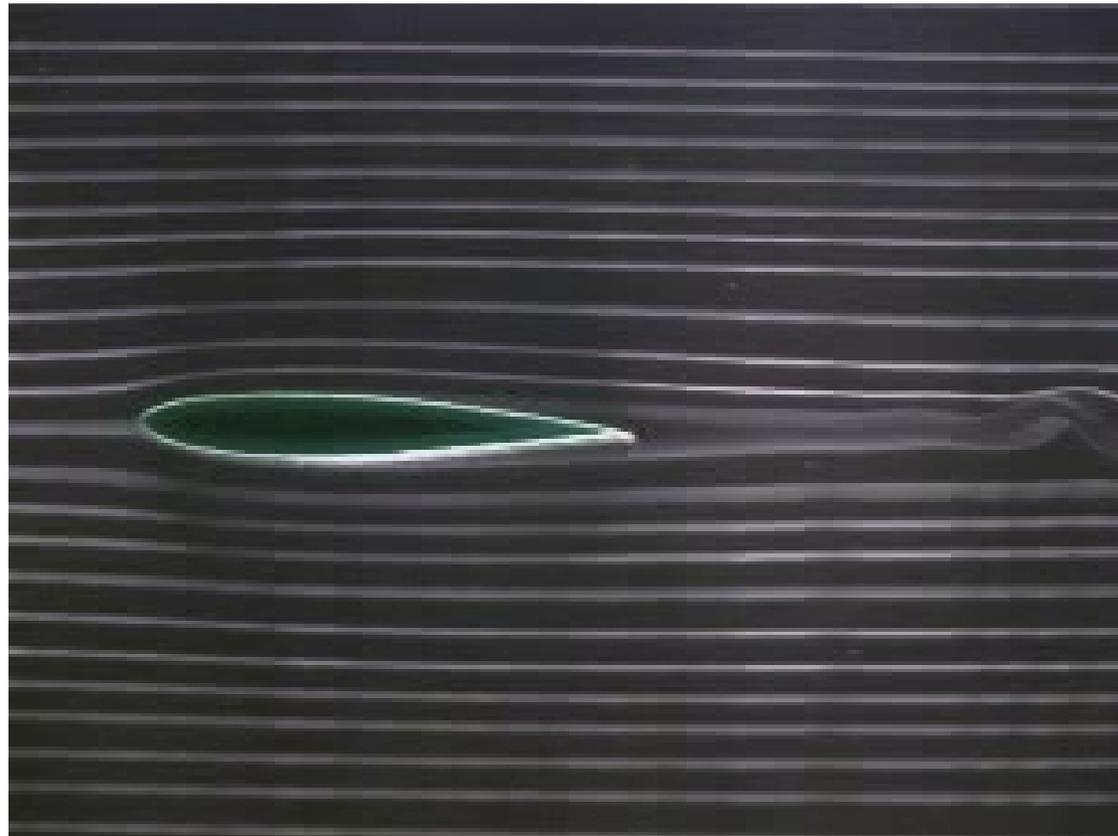
Experiment: Laminarer Farbfaden bei einem nicht angestellten Profil



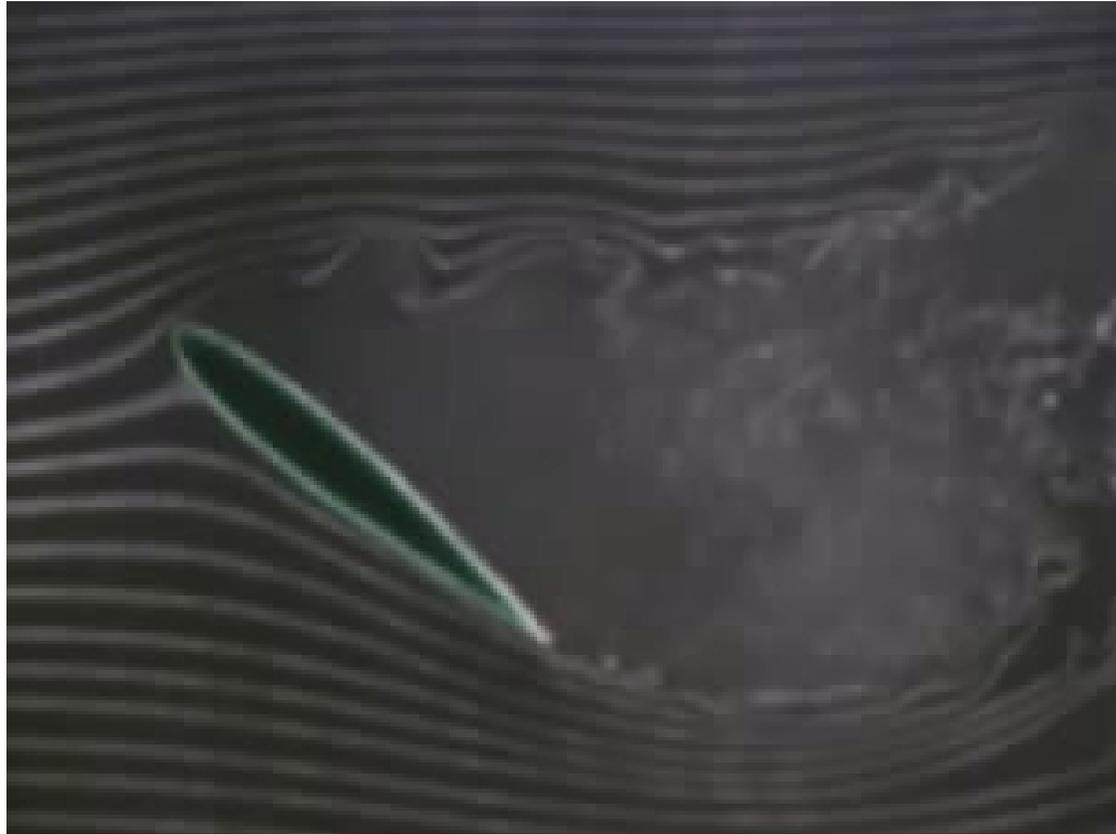
Experiment: Laminarer Farbfaden bei einem angestellten Profil



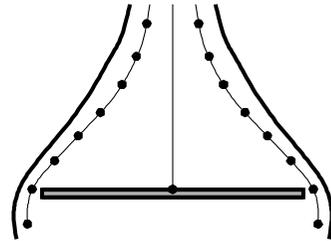
Film: Streichlinien beim nicht angestellten Profil



Film: Streichlinien beim angestellten Profil

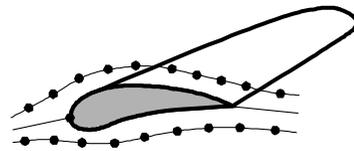
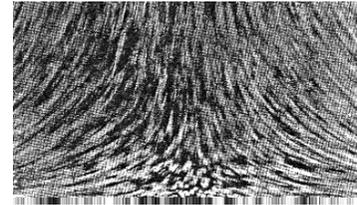


Teilchenbahnen, Stromlinien, Streichlinien, stationäre Umströmung

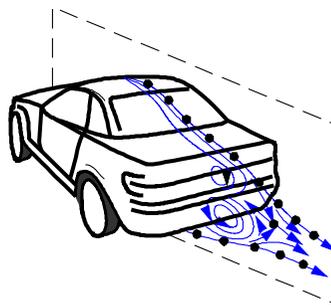
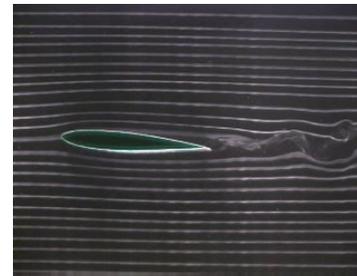


Teilchenbahn, Stromlinie, Streichlinie

Plattenumströmung



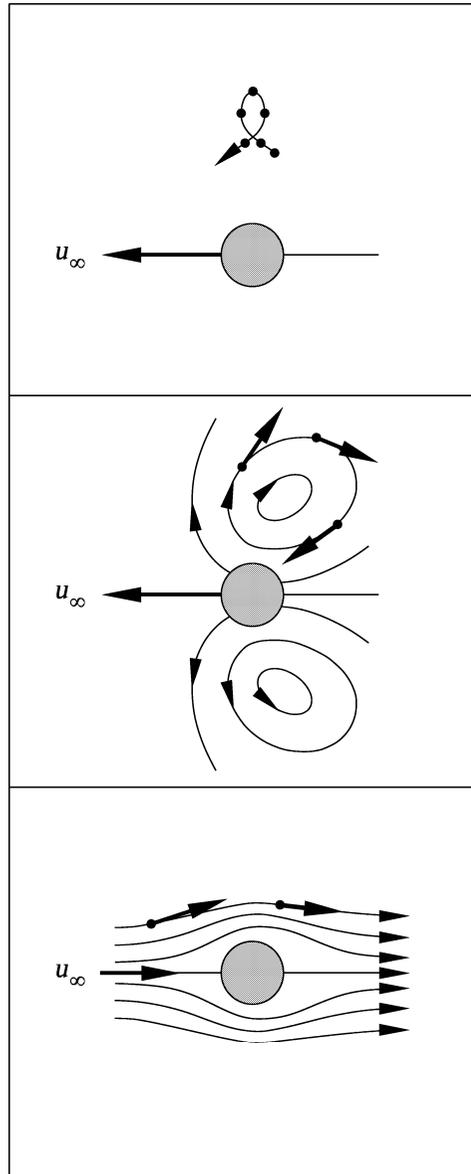
Tragflügelumströmung



Kraftfahrzeugumströmung



Kugelumströmung, ruhender und mitbewegter Beobachter



Teilchenbahn

ruhender Beobachter

Stromlinien

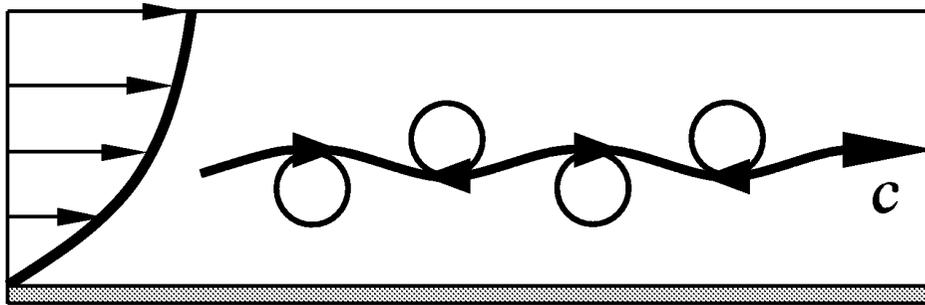
ruhender Beobachter

Stromlinien

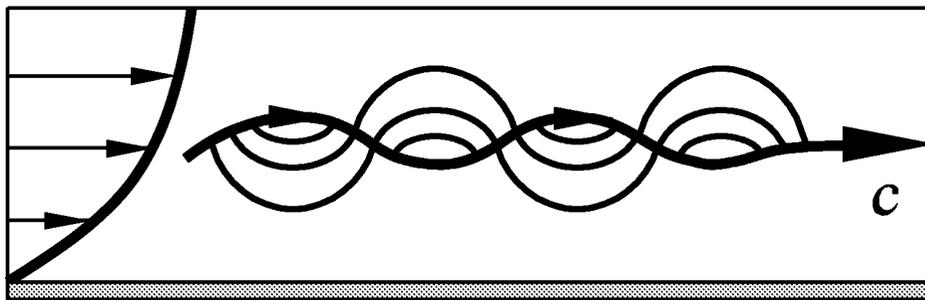
mitbewegter Beobachter



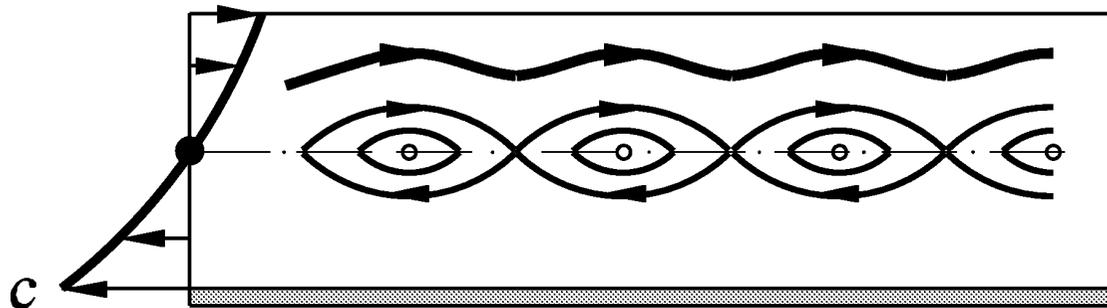
Welle in einer Grenzschicht, ruhender und mitbewegter Beobachter



Teilchenbahnen
ruhender Beobachter



Stromlinie
ruhender Beobachter



Stromlinie
mit der Welle
mitbewegter Beobachter



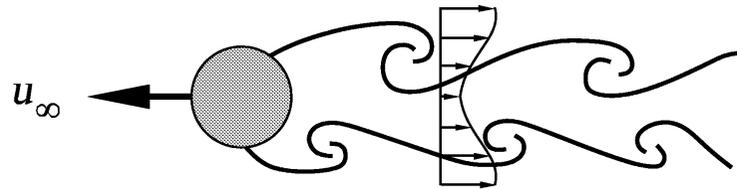
Experiment: Kármánsche Wirbelstraße



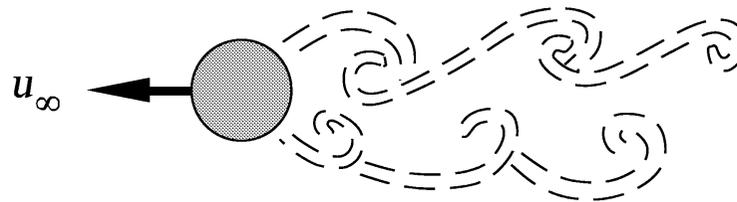
Experiment: Teilchenbahn beim bewegten Zylinder



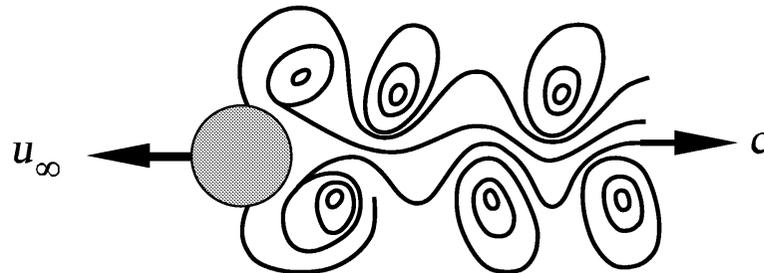
Kármánsche Wirbelstraße, ruhender und mitbewegter Beobachter



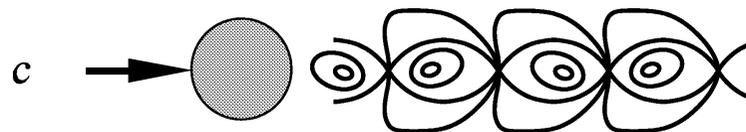
Streichlinien



Teilchenbahnen



Stromlinien
ruhender Beobachter



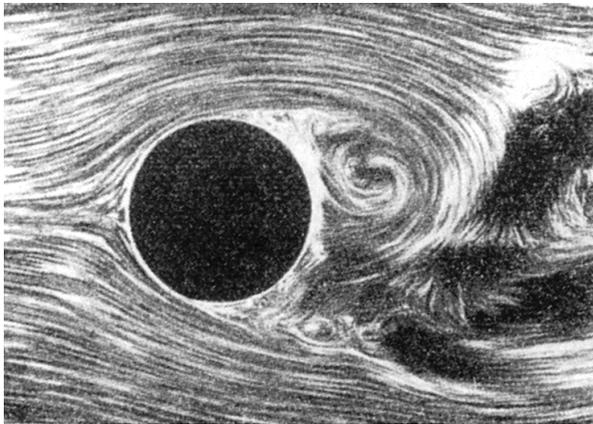
Stromlinien
mitbewegter Beobachter



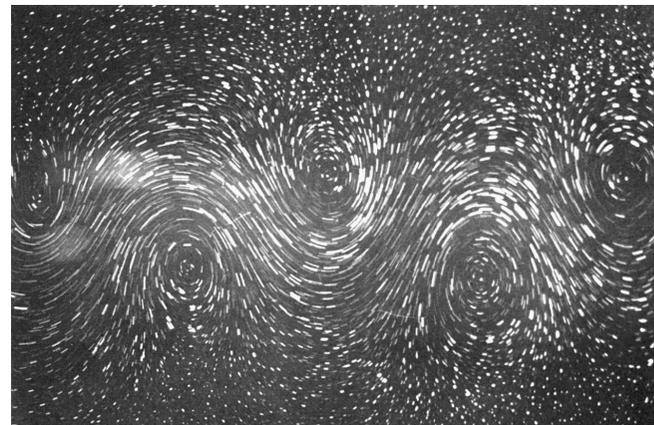
Film: Kármánsche Wirbelstraße



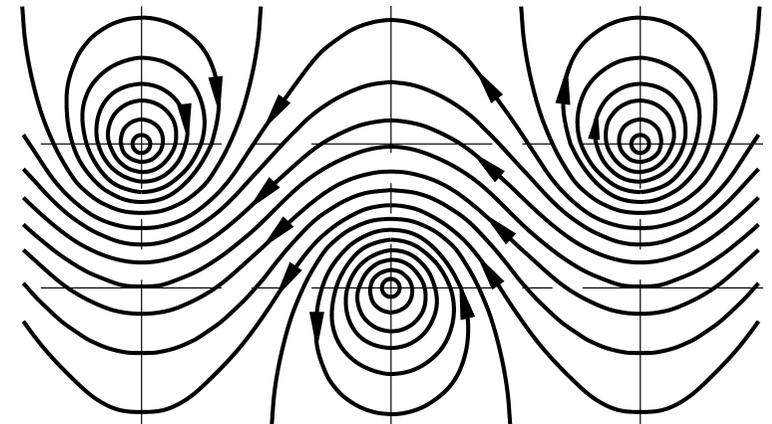
Streichlinie, Teilchenbahn, Stromlinien der Kármánschen Wirbelstraße



Streichlinien
Prandtl 1929



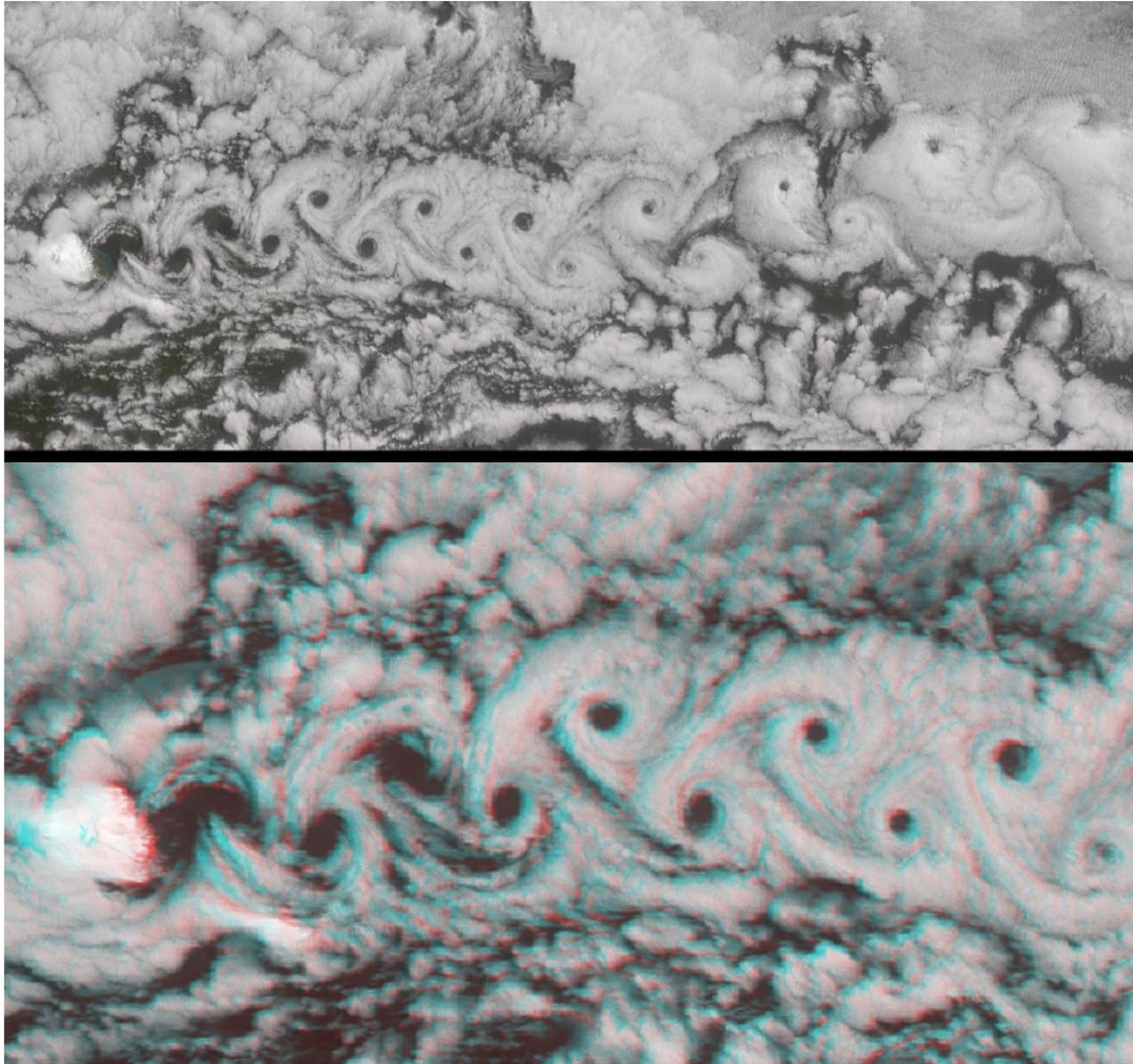
Teilchenbahnen
Timme 1957



berechnete **Stromlinien**
von Kármán 1912



Kármánsche Wirbelstraße Jan Mayen



Totales Differential der u -Komponente des Geschwindigkeitsvektors

$$\underbrace{\frac{du}{dt}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\mathbf{L}} + u \cdot \underbrace{\frac{\partial u}{\partial x}}_{\mathbf{K}} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$$



Hydrodynamik

Kraftfahrzeugumströmung
mit Druckverteilung

Stromfläche und Stromfaden

Stromröhre und Stromfaden

Stromröhren

Kräftebilanz am Stromfadenelement

Bernoulli-Gleichung

Experiment: Venturi-Düse

Venturi-Rohr

Kavitation in einer Düsenströmung

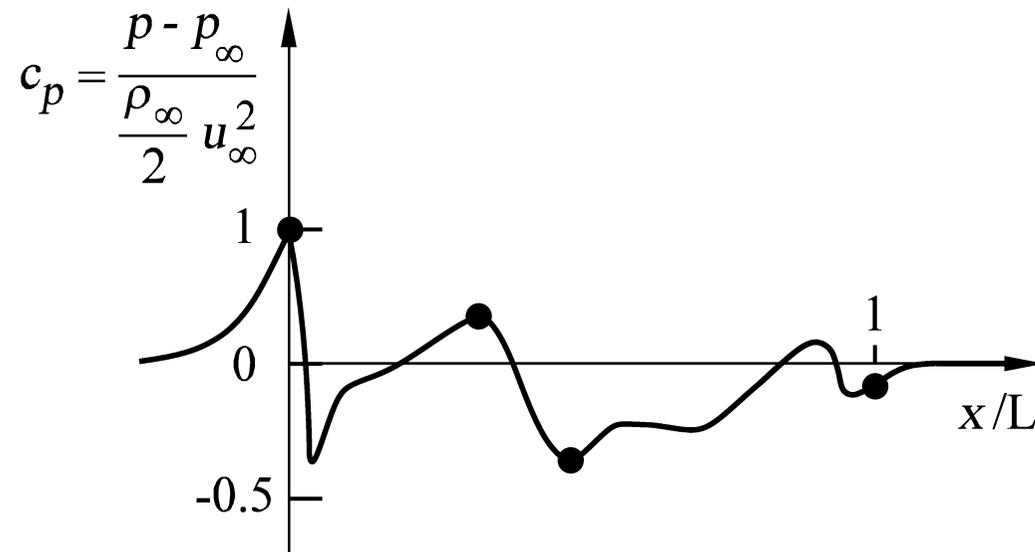
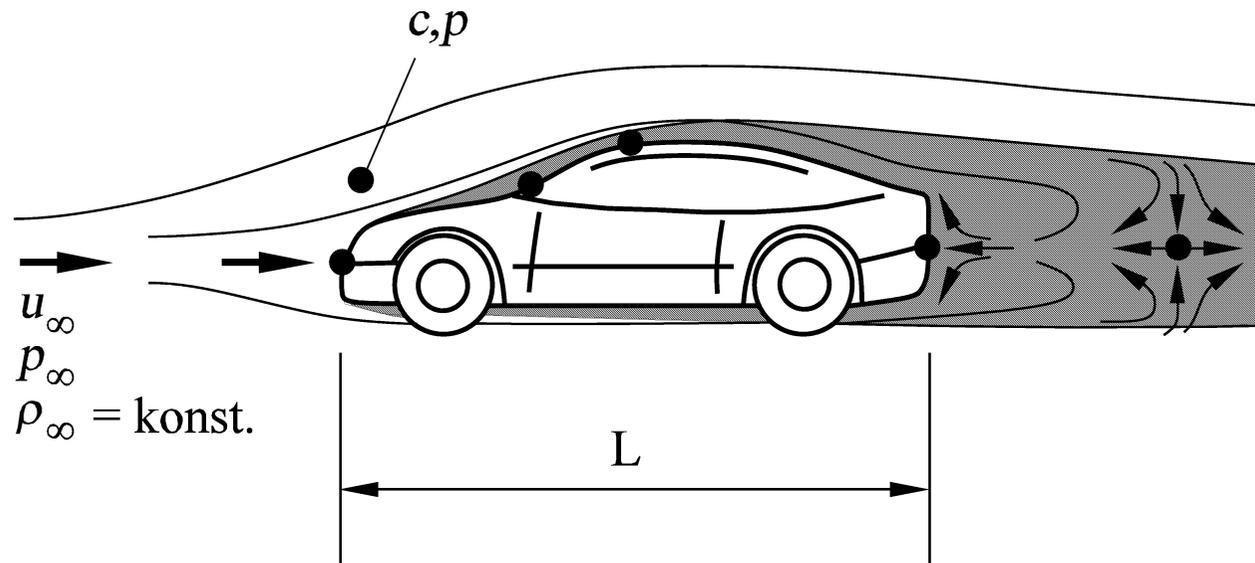
Kavitation an einem Unterwasserprofil

Film: Kavitation am Profil

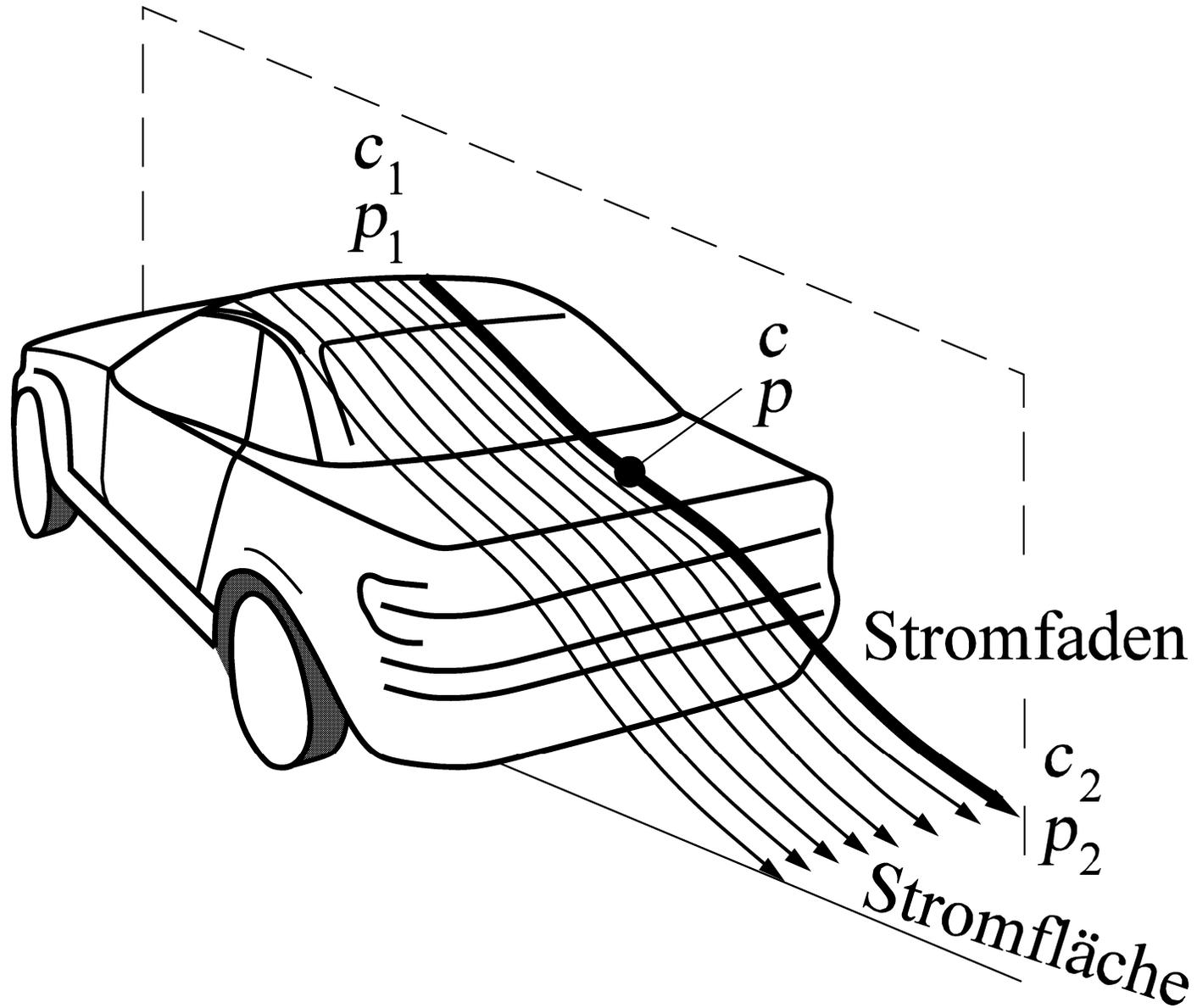
Film: Kavitation am Propeller



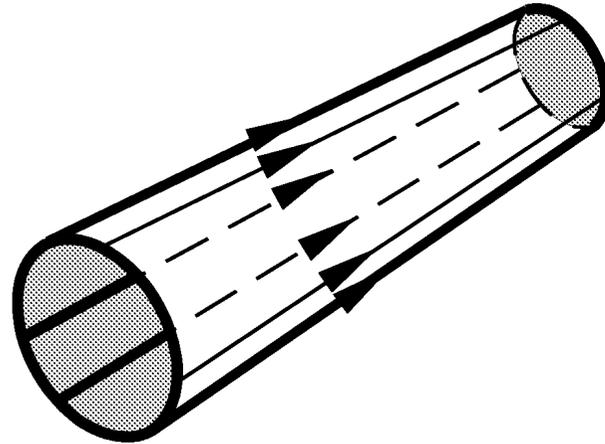
Kraftfahrzeugumströmung und Druckverteilung auf Oberseite



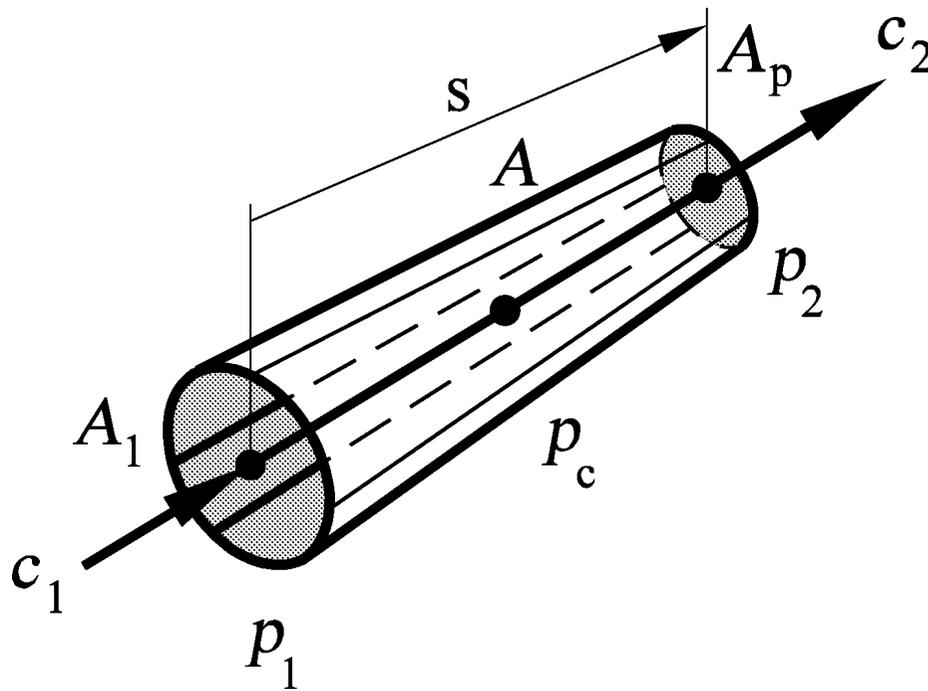
Stromfläche und Stromfaden



Stromröhre und Stromfaden



Stromröhre

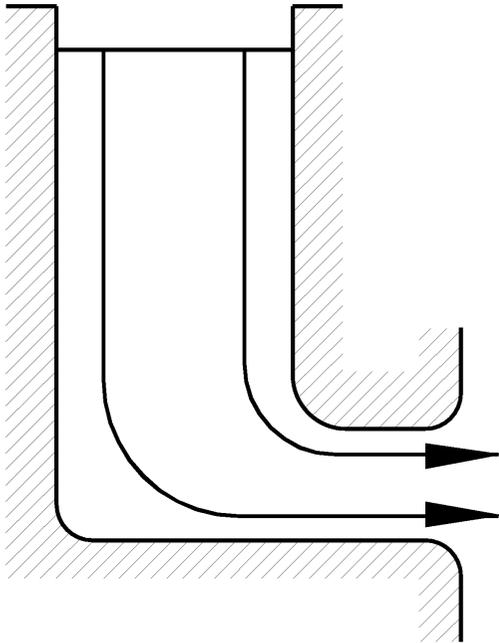


Stromfaden

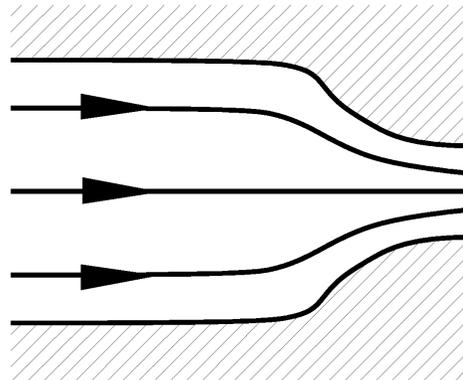


Stromröhren

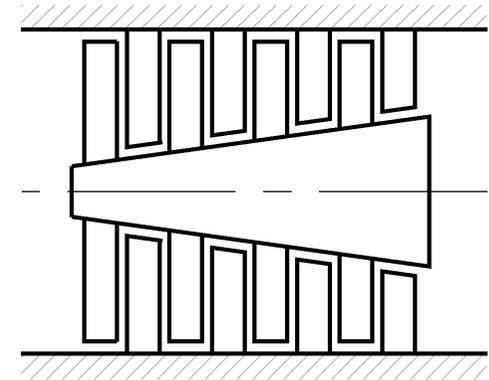
Ausfluß



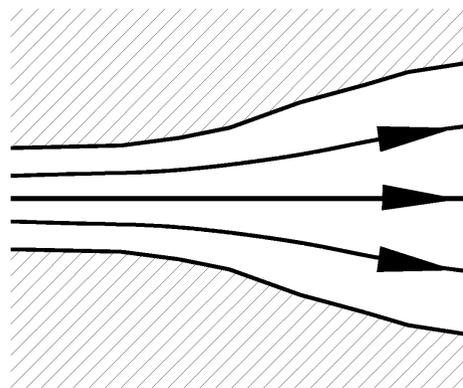
Düse



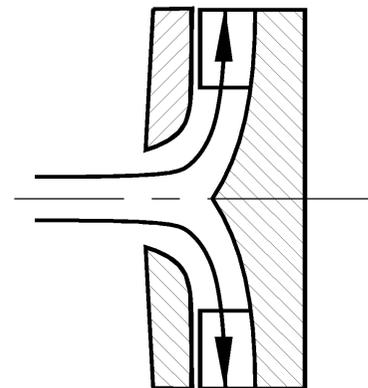
Axialmaschine



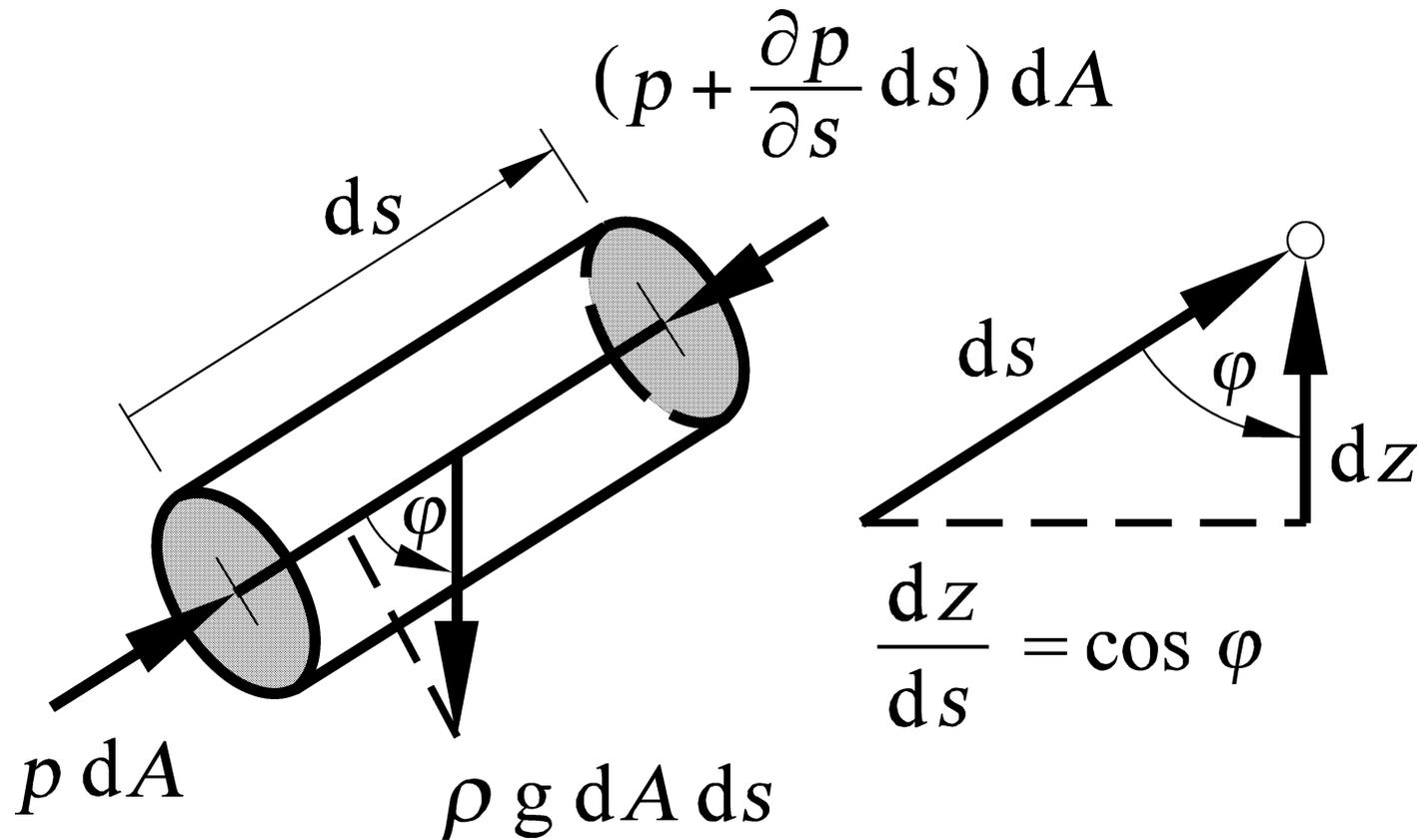
Diffusor



Radialmaschine



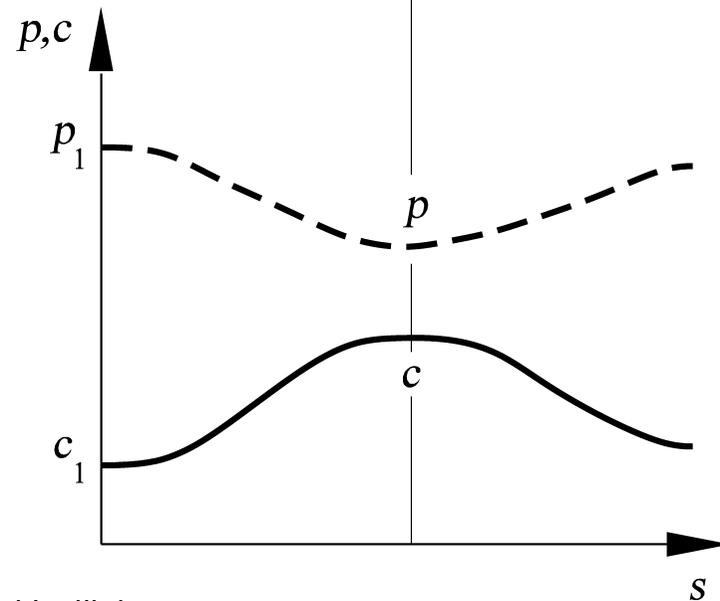
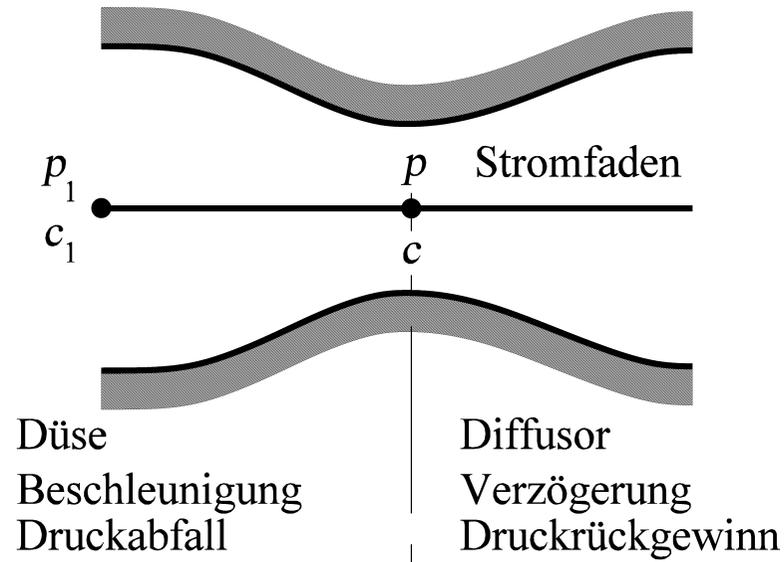
Kräftebilanz am Stromfadenelement dV



Experiment: Venturi-Rohr



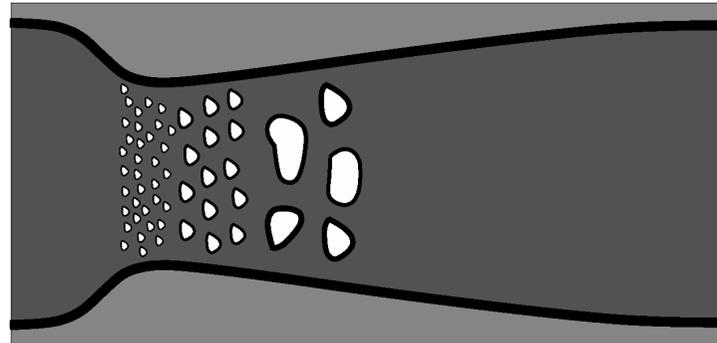
Venturi-Rohr



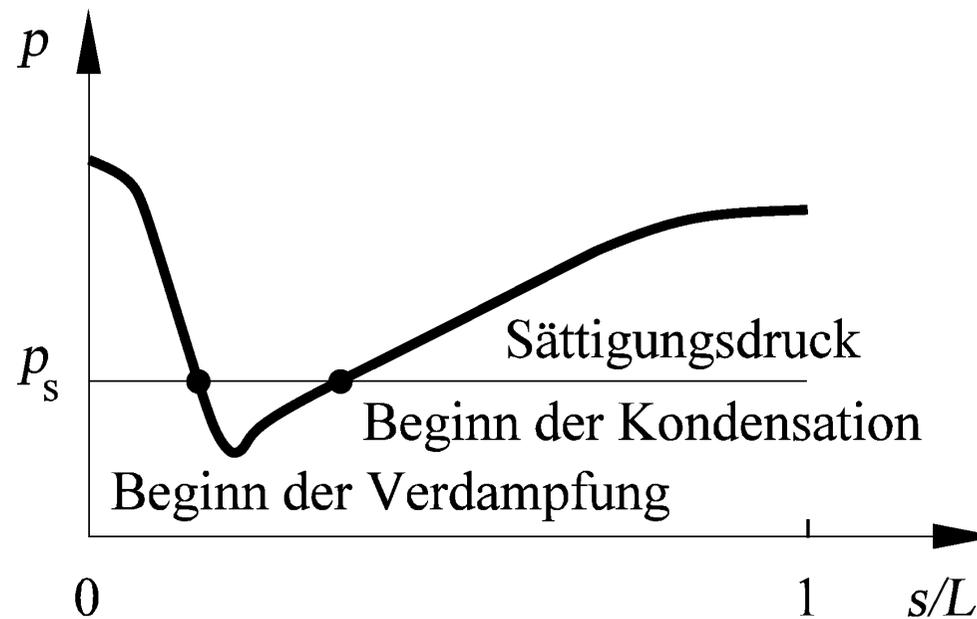
Kavitation in einer Düsenströmung

Beginn der Verdampfung

Kondensation der Blasen



Bildung größerer Blasen



Kavitation an einem Unterwasserprofil



Film: Kavitation an einem Profil



Film: Kavitation an einem Propeller



Bernoulli-Gleichung

Experiment: Papierdüse

Experiment: Kugel im Luftstrahl

Experiment: Tischtennisball im Weinglas

Energiegleichung

Stromröhre, Stromfaden mit Wärmestrom

Speicherkraftwerk

Kfz-Umströmung

CLK Umströmung
mit Druckverteilung 2-dim.

ASMO reibungsfreie Umströmung
mit Druckverteilung 1-dim.

Software: KAPPA Stromfaden
Kraftfahrzeugumströmung reibungsfrei



Experiment: Papierdüse



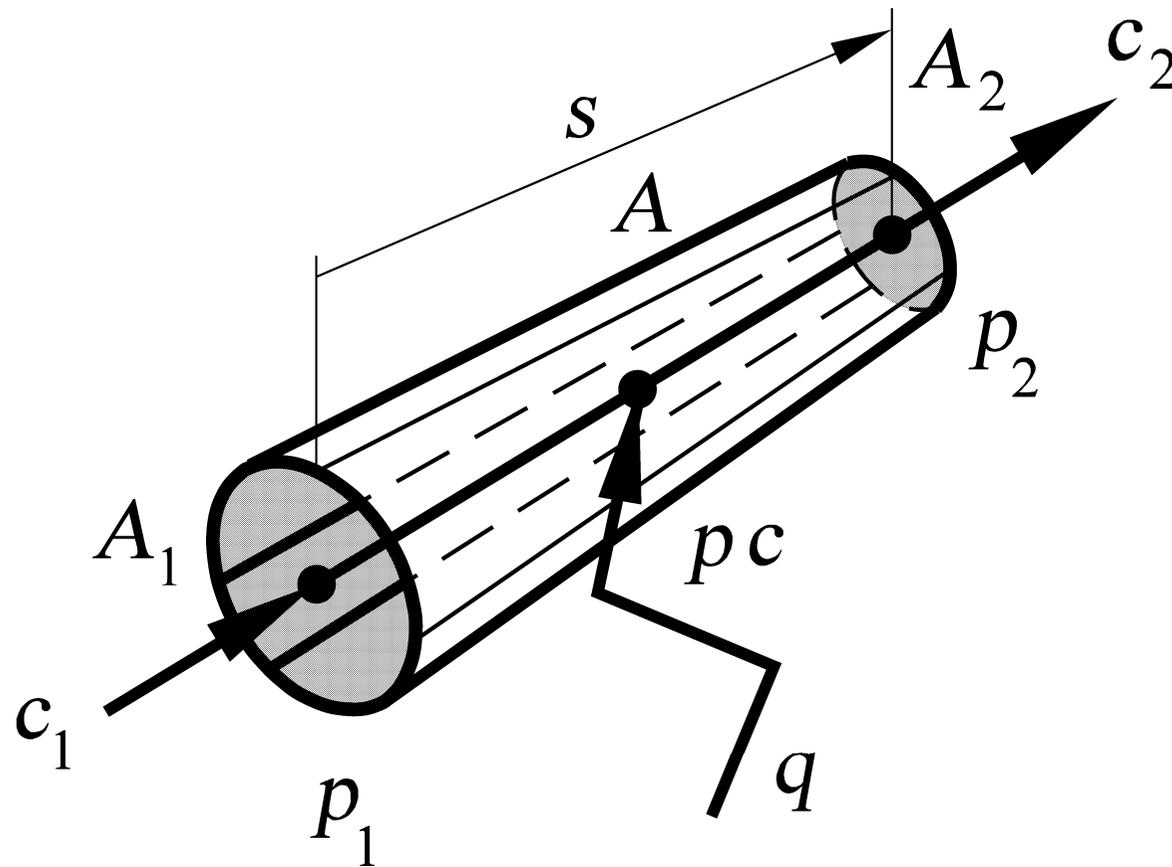
Experiment: Styroporkugel im Luftstrahl



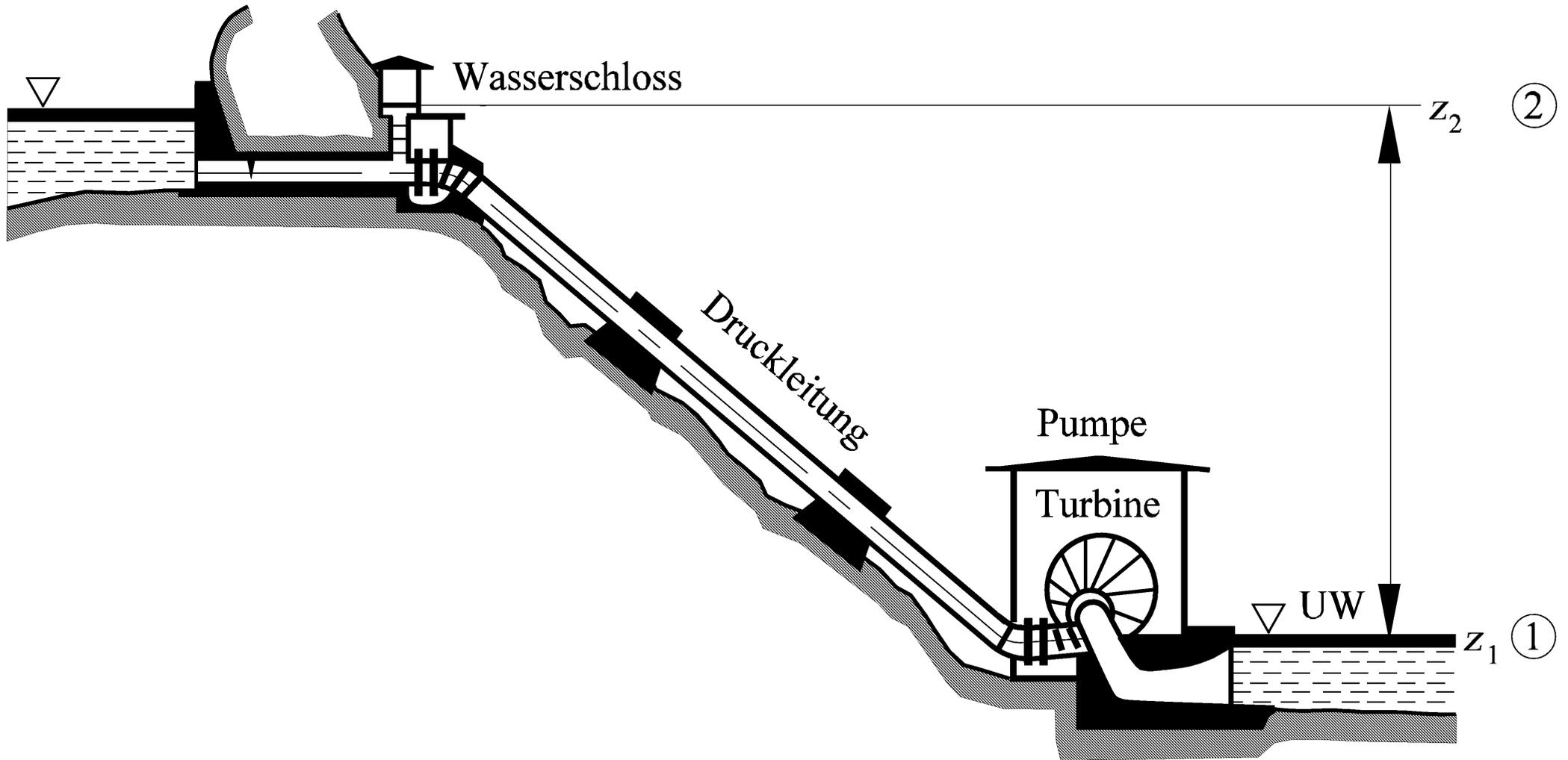
Experiment: Tischtennisball im Weinglas



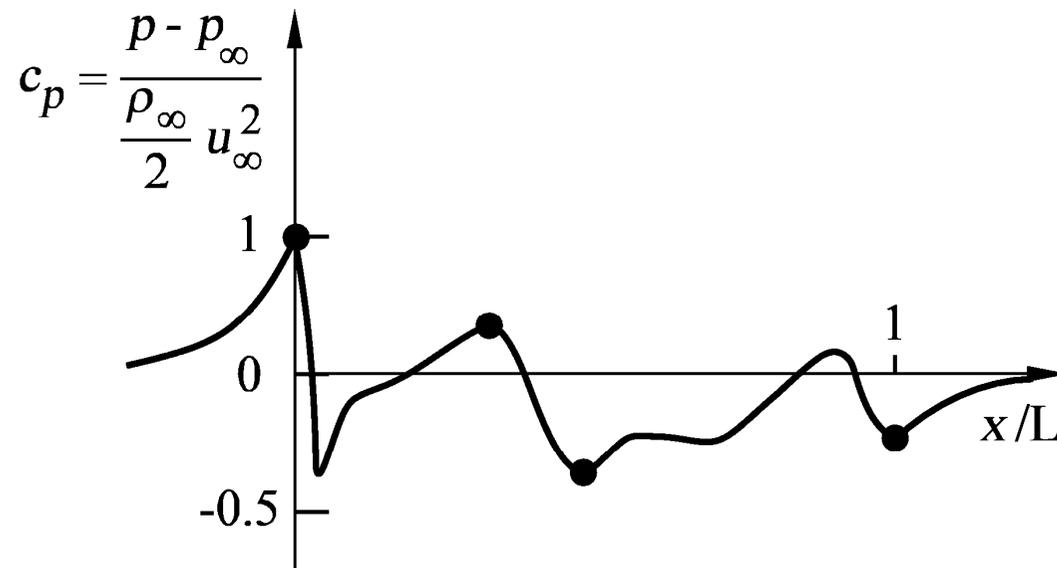
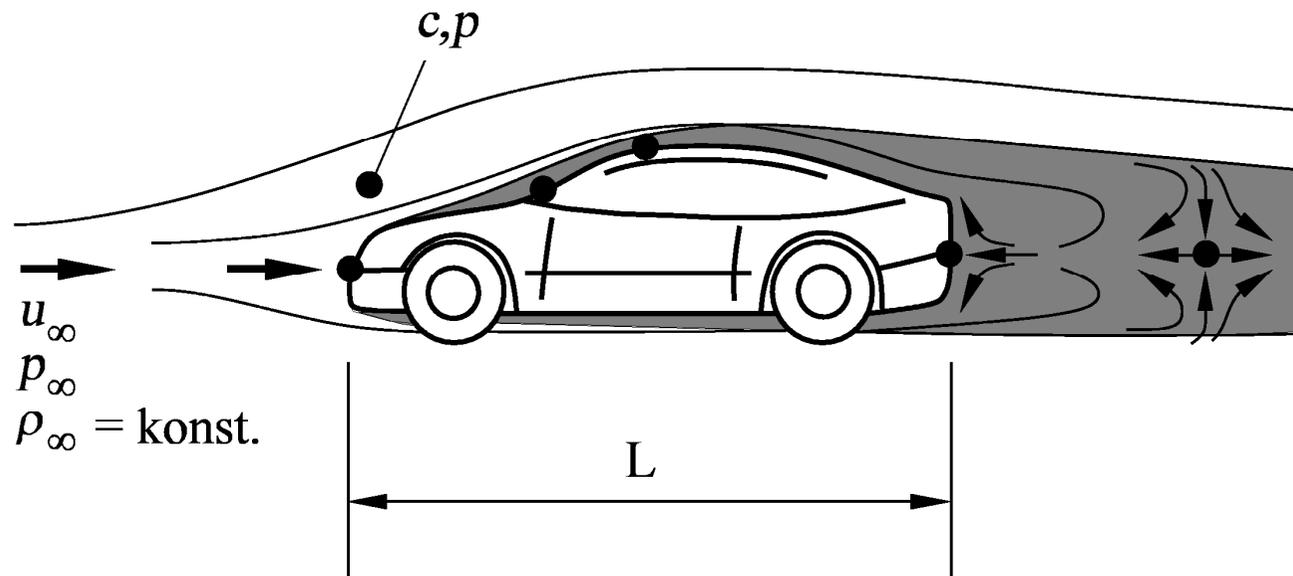
Stromröhre und Stromfaden mit Wärmestrom q



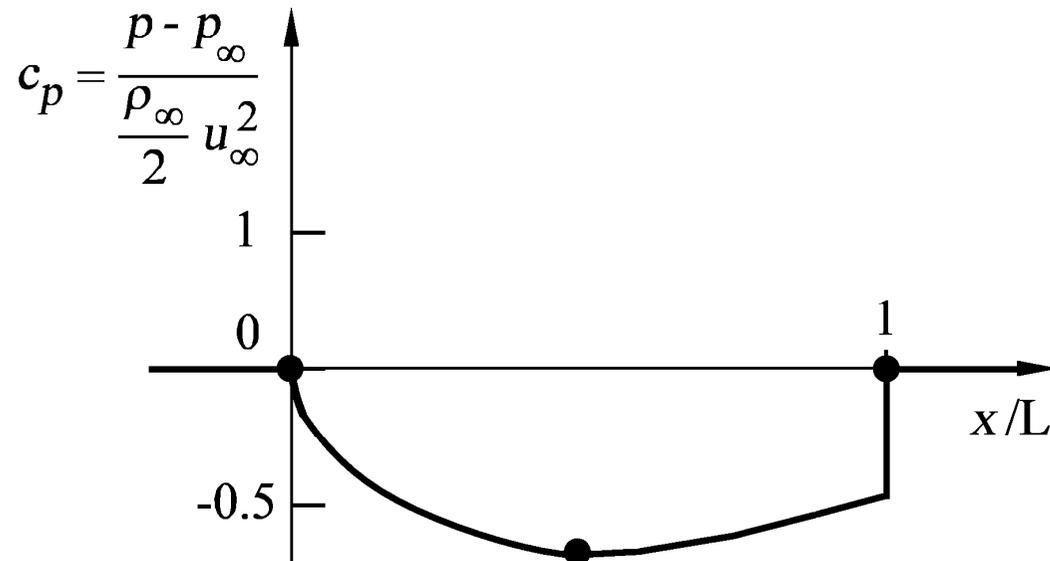
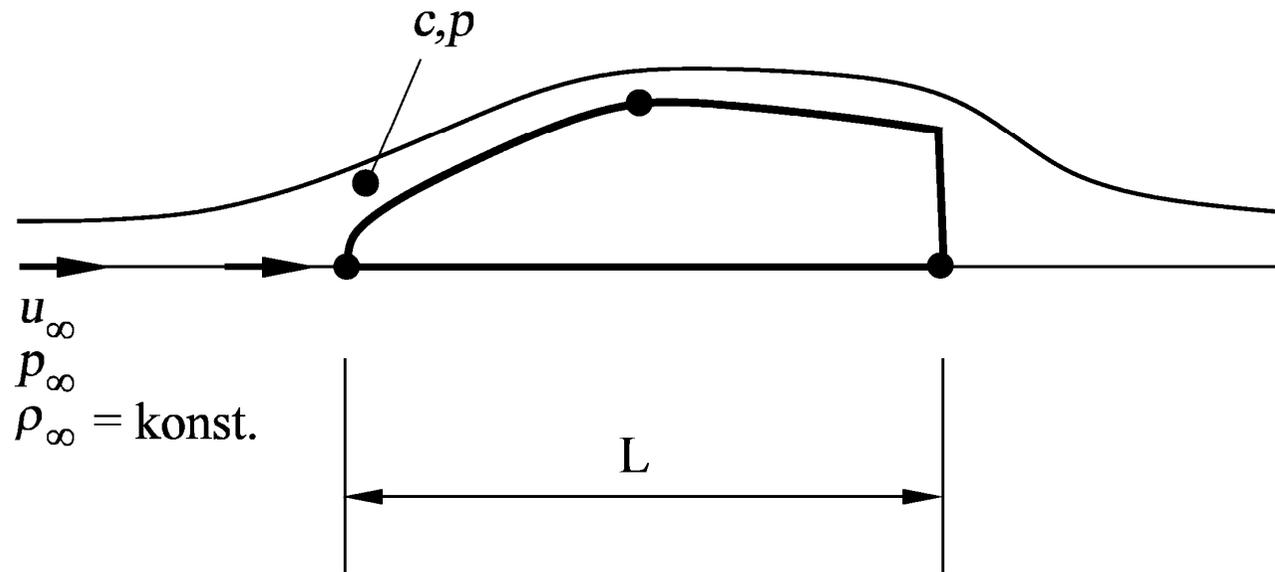
Speicherkraftwerk



CLK Umströmung mit Druckverteilung 2-dimensional



ASMO reibungsfreie Umströmung mit Druckverteilung 1-dimensional



Software: Homepage Lehrstuhl und Institut für Strömungslehre



Software: Lehre



Software: Software-Lehre

Netscape: Lehrstuhl und Institut f

File Edit View Go Communicator Help

Back Forward Reload Home Search Netscape Print Security Shop

Bookmarks Location: <http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/> What's Related

Software - Lehre

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

LEHRE

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

Strömungslehre

- [KAPPA - Stromfaden](#) (Online)

Mathematische Methoden der Strömungslehre

Linearisierung	Theorie	Download (mit Anleitung)
Stabilitätsanalyse	Theorie	Programmbeschreibung und Download (3Kb)
Strukturanalyse		Download
Galerkin-Methode		Download
Finite-Differenzen-Methode		Download
Finite-Volumen-Methode		Download

Grenzschichtströmungen

Blasius-Grenzschicht		Download (4.3Kb)
Laminare Plattengrenzschicht		Download (6.4Mb)
Turbulente Plattengrenzschicht		Download (6.6Mb)
Orr-Sommerfeld-Gleichung - Eigenwertlöser	Theorie	Programmbeschreibung und Download (3Kb)
Profilumströmung		Download (1.5Mb)
Tragflügelumströmung		Download (1.5Mb)

100%



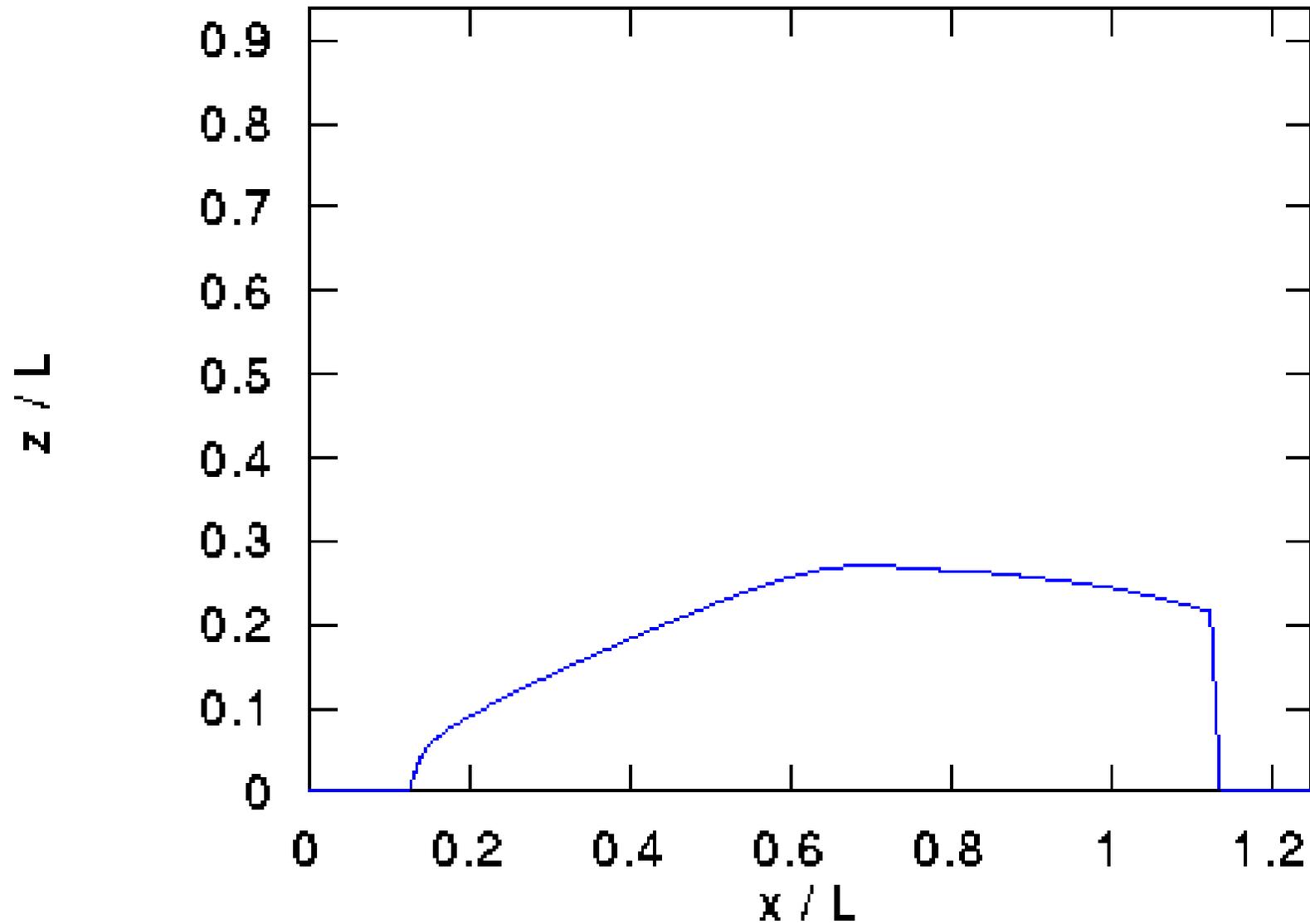
Software: KAPPA Stromfaden

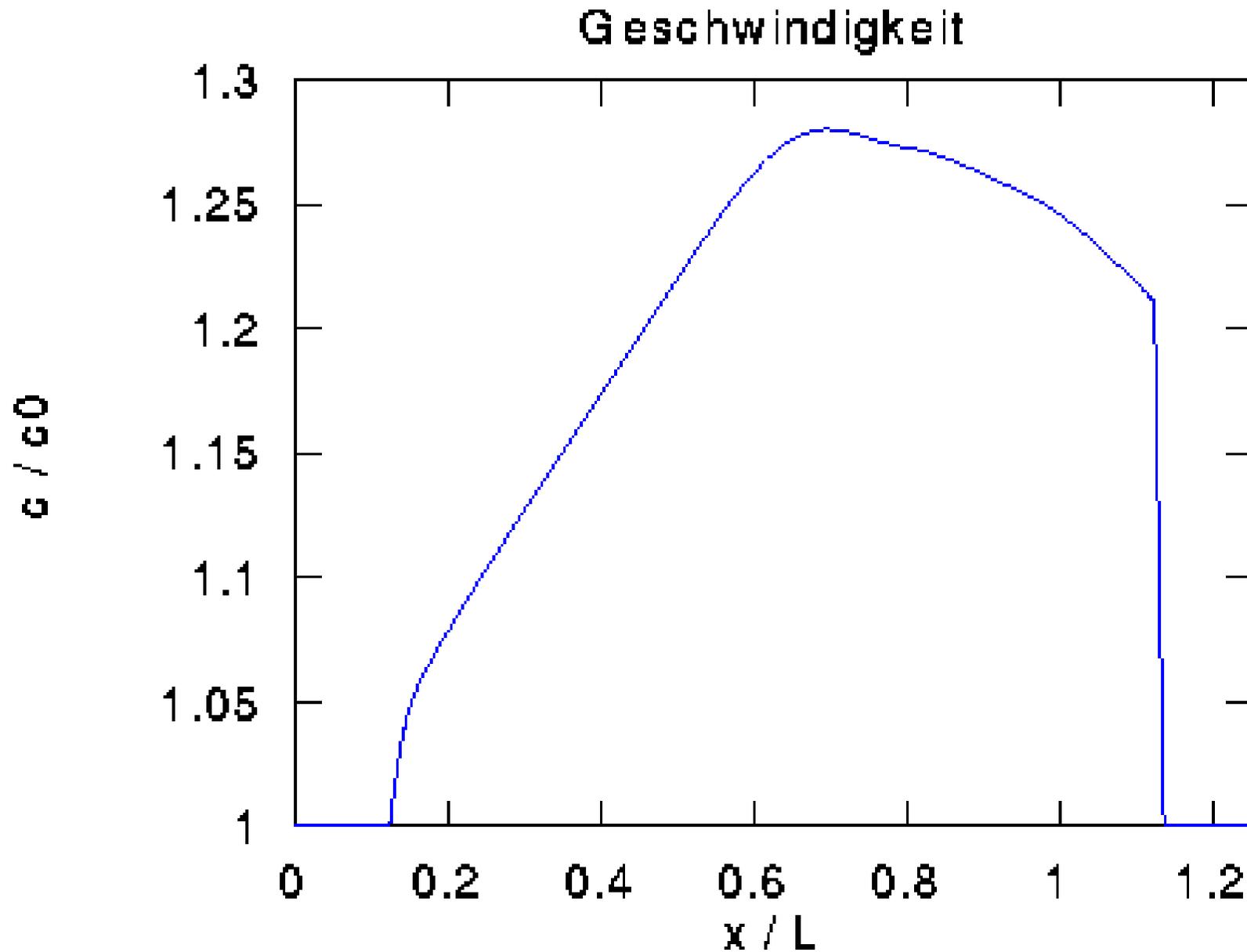


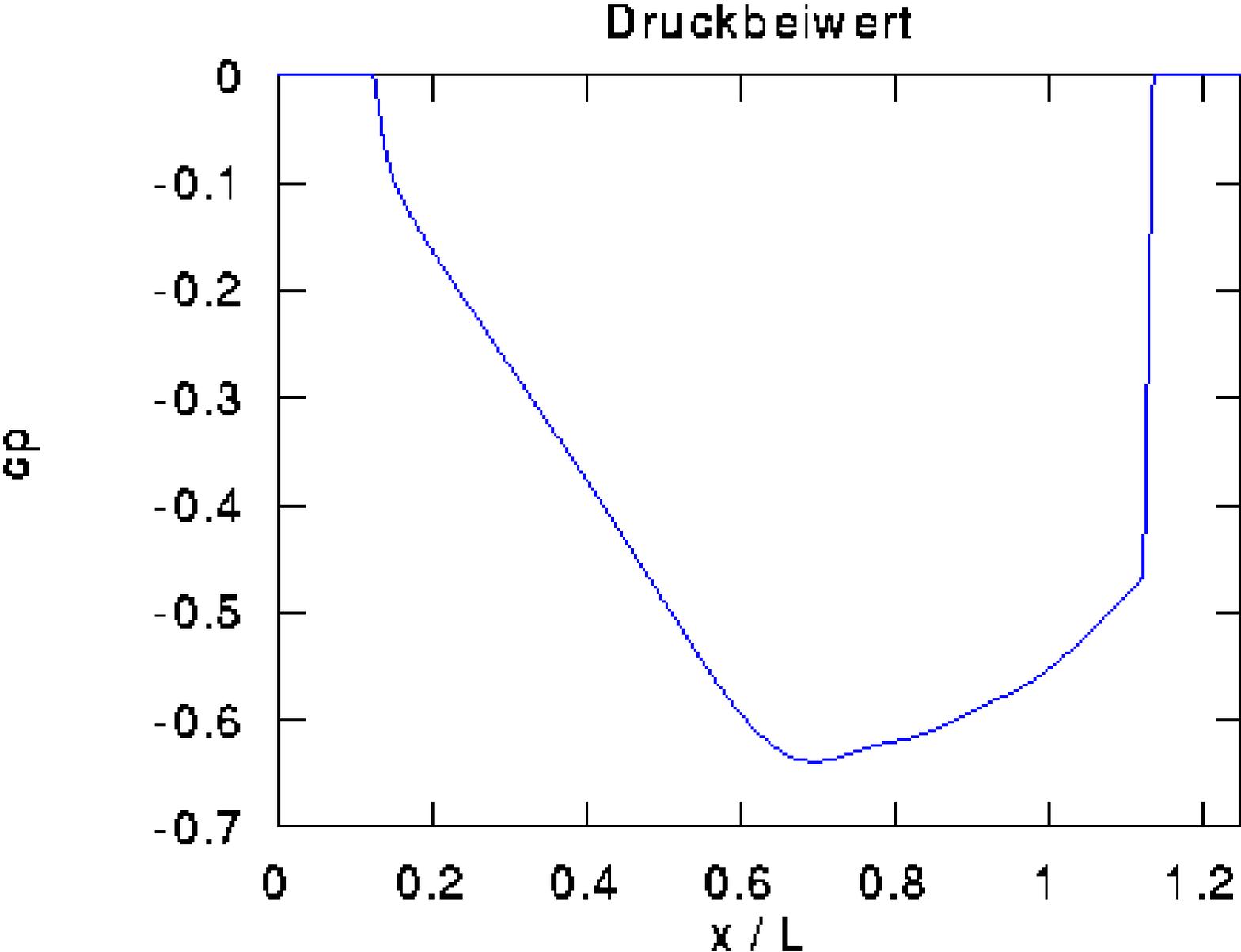
Software: KAPPA Stromfaden reibungsfreie Kraftfahrzeugumströmung

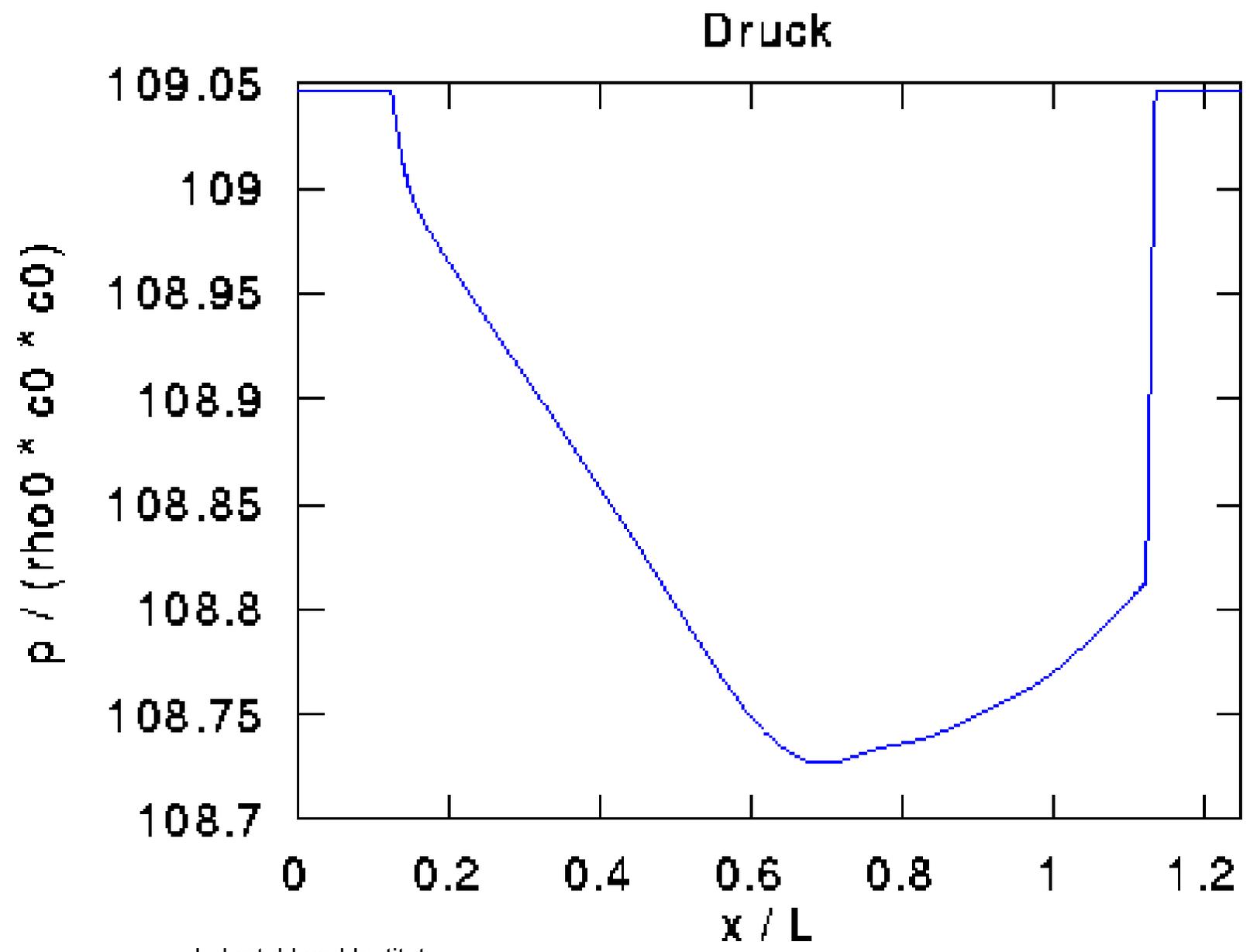


Kfz-Geometrie









Reibungsbehaftete Strömung

Kräftebilanz am Stromfadenelement,
reibungsbefahete Strömung

Hagen-Poiseuille-Strömung

Plattengrenzschichtströmung,
schleichende Strömung

ASMO reibungsbehaftete Umströmung
mit Druckverteilung 2-dim.

ASMO reibungsbehaftete Umströmung
mit Druckverteilung 1-dim.

Software: KAPPA Stromfaden
Kraftfahrzeugumströmung
reibungsbefahete

Widerstand

Profilumströmung,
Druck- und Widerstandsbeiwert

Experiment: Druckverteilung am Profil
im Windkanal

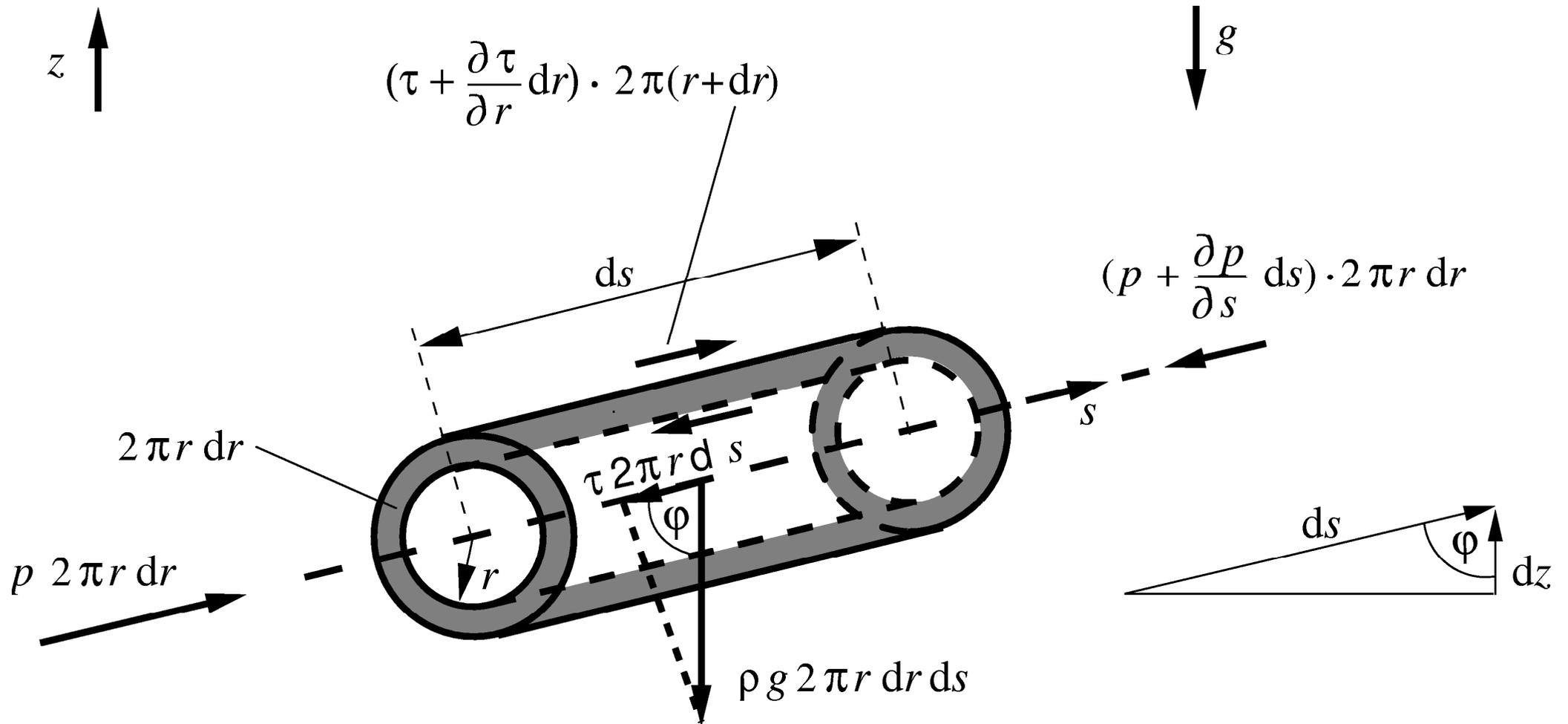
Umströmte Körper,
Druck- und Reibungswiderstand

Reibungsbeiwert der Plattengrenzschicht

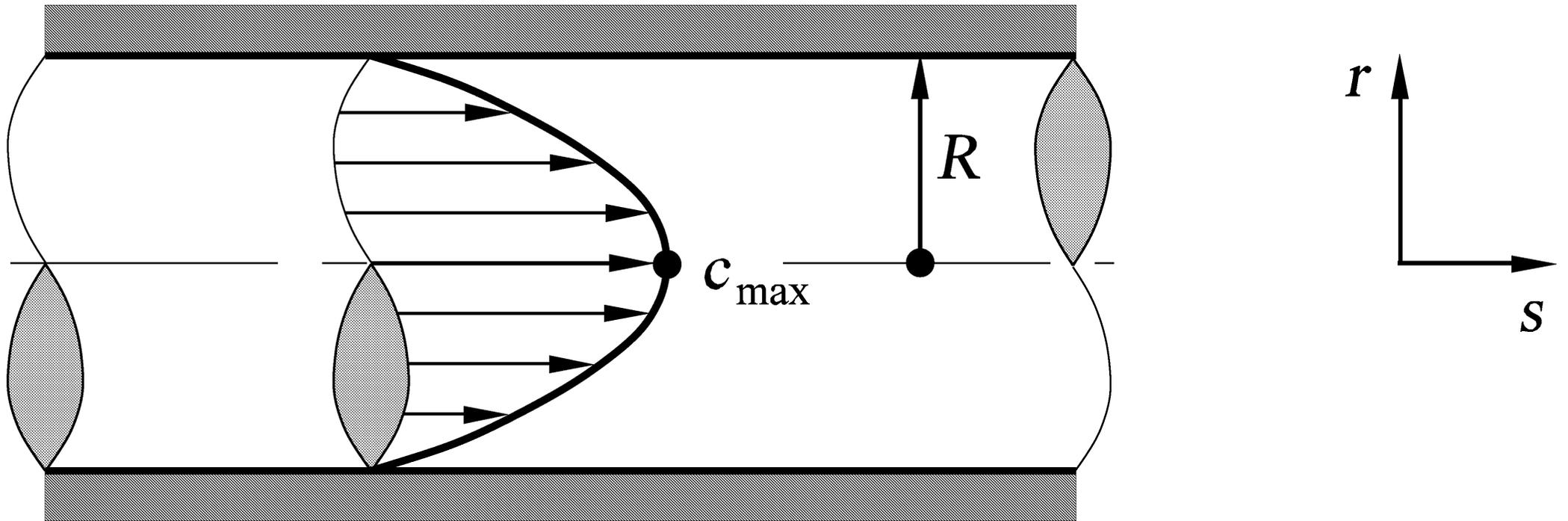
Stromlinienkörper



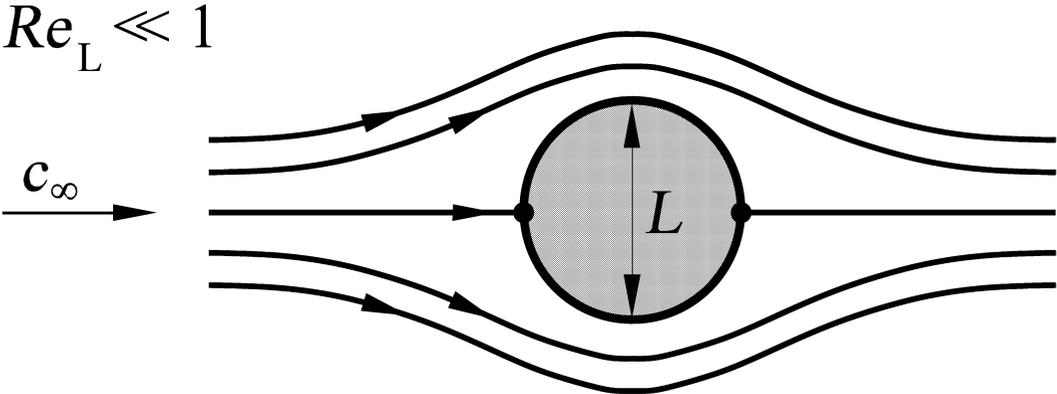
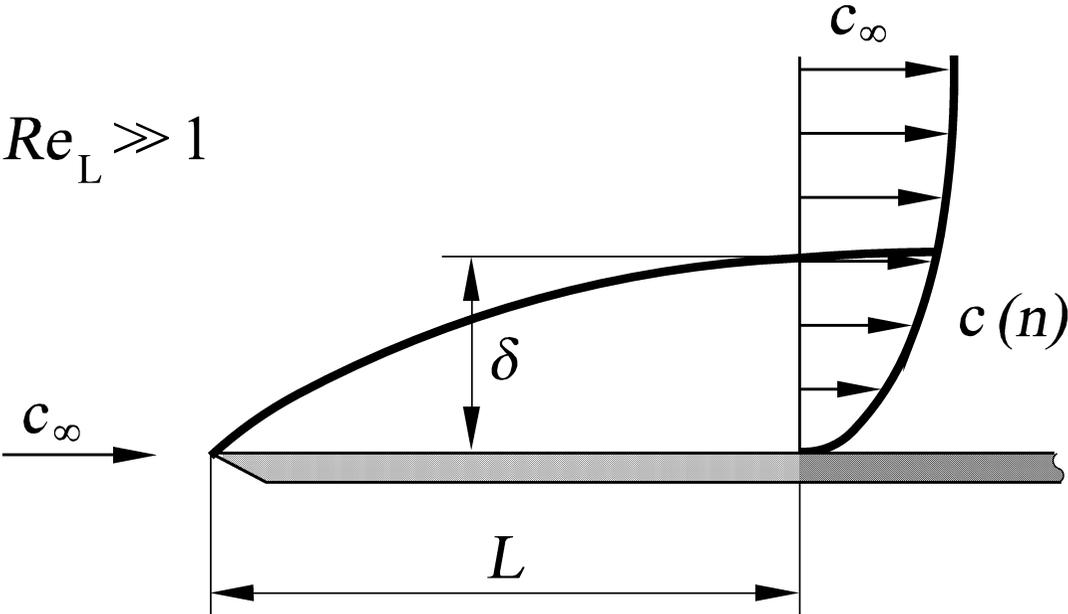
Kräftebilanz am Stromfadenelement dV für die reibungsbehaftete Strömung



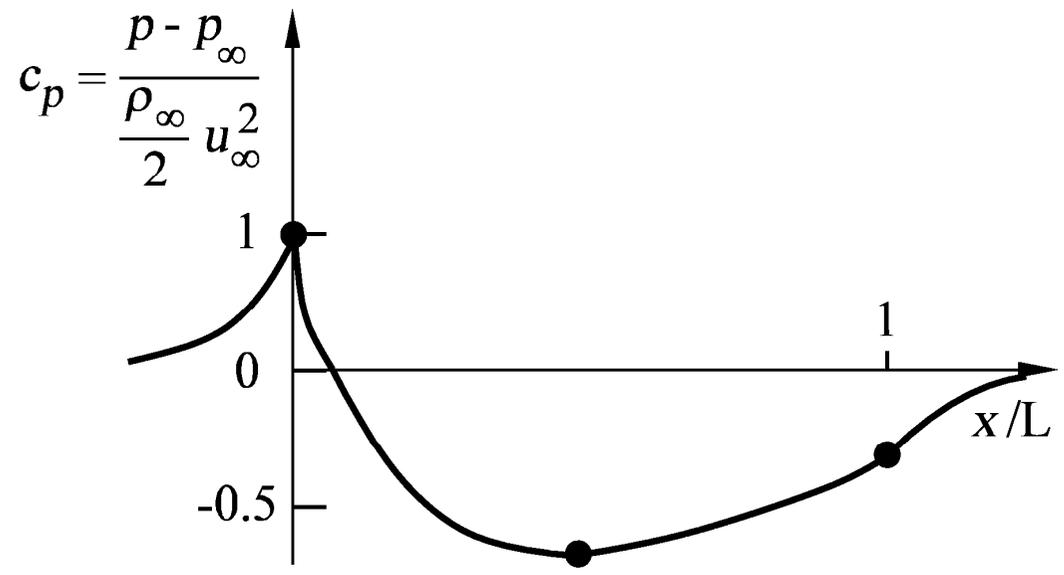
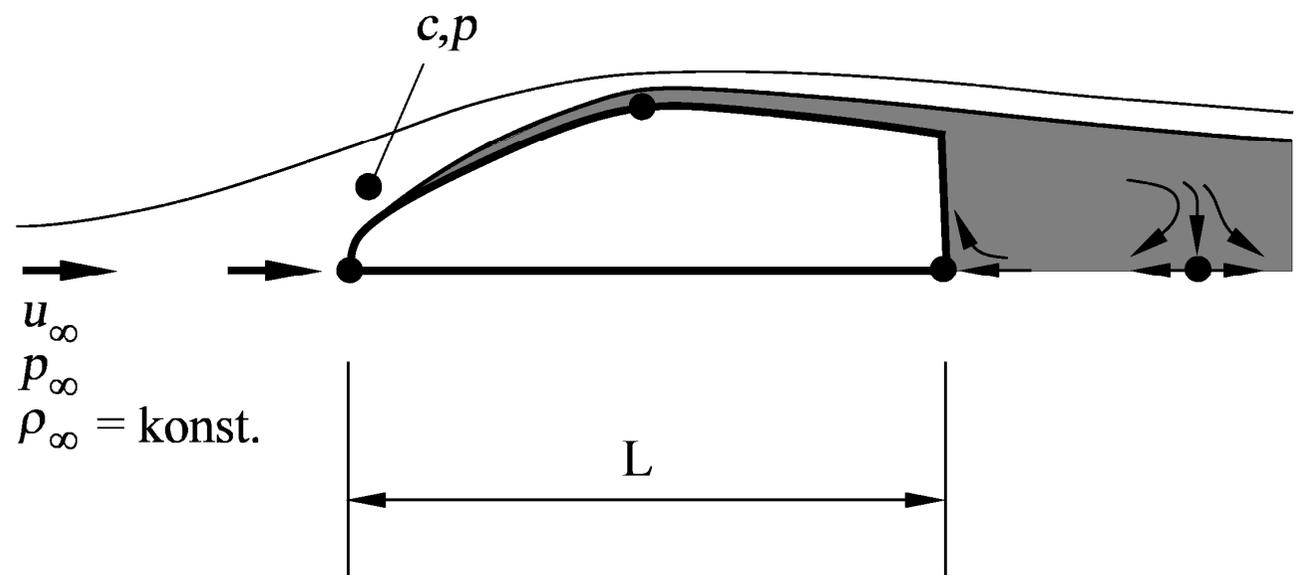
Hagen-Poiseuille-Rohrströmung



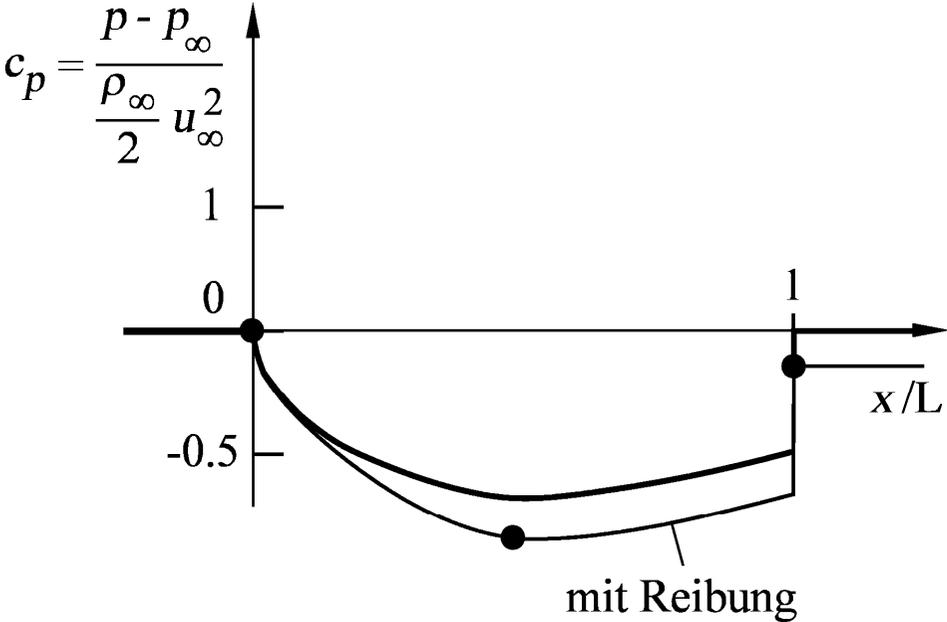
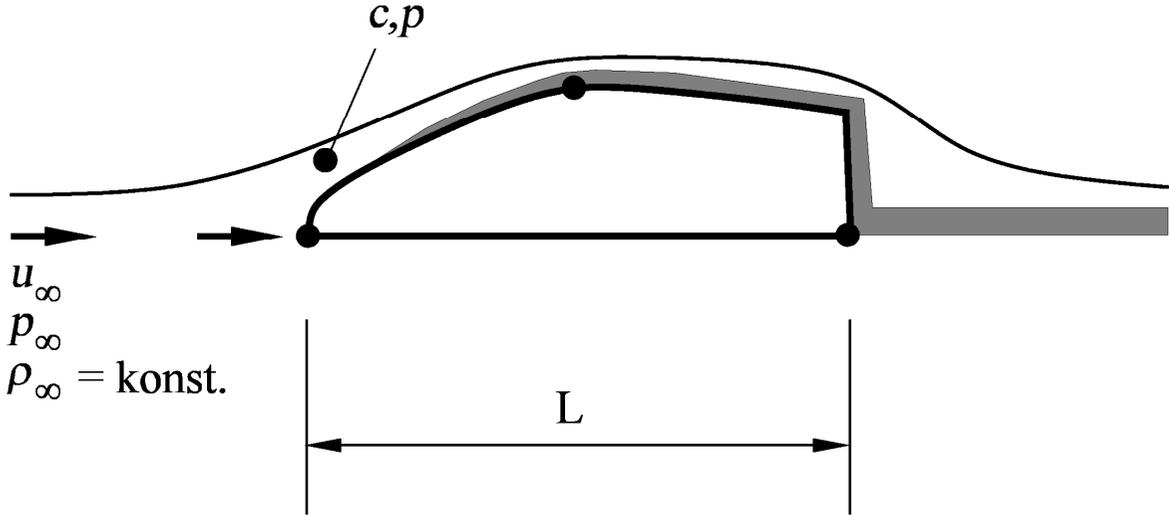
Plattengrenzschichtströmung und schleichende Strömung um einen Zylinder



ASMO reibungsbehaftete Umströmung mit Druckverteilung 2-dimensional



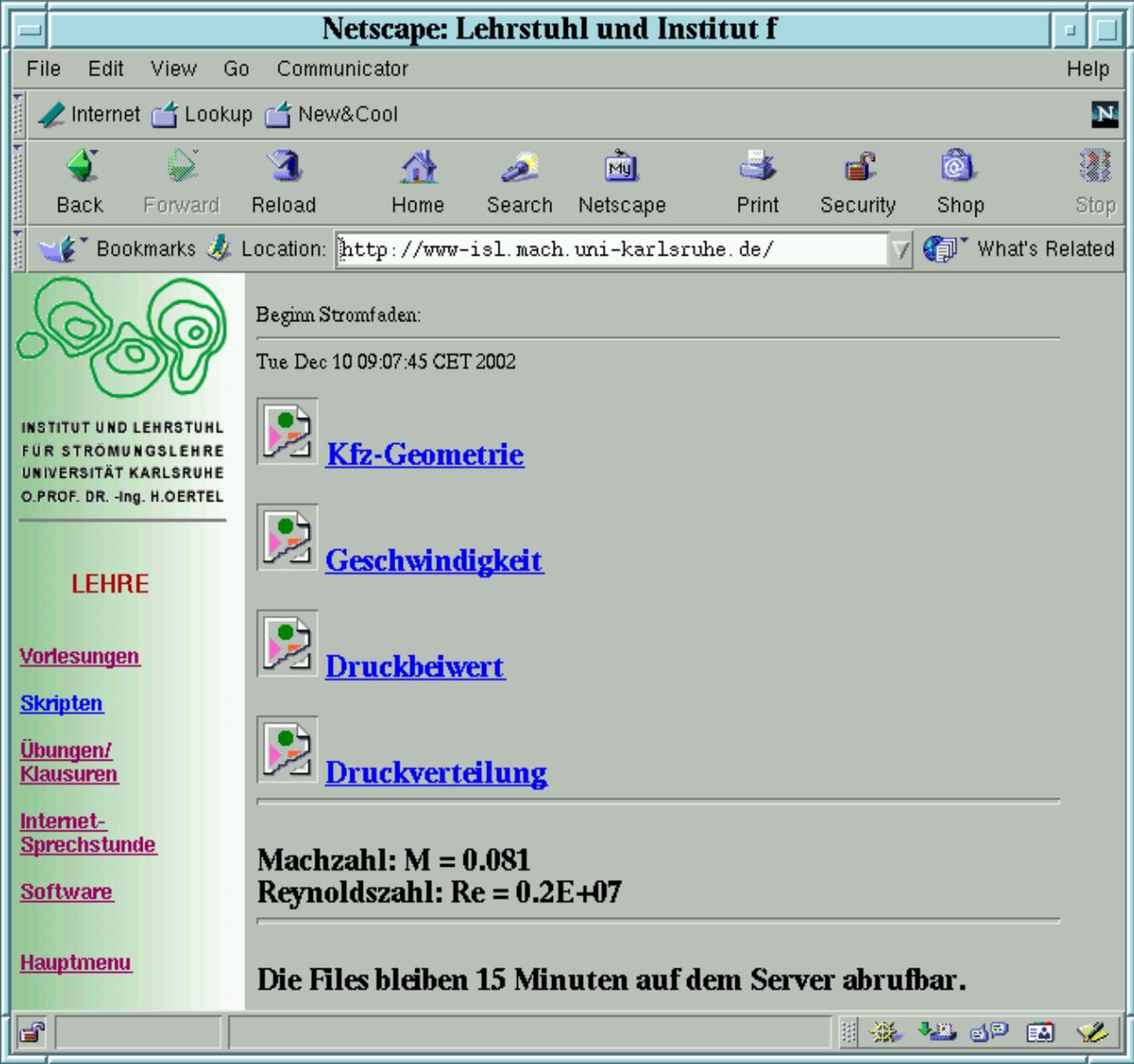
ASMO reibungsbehaftete Umströmung mit Druckverteilung 1-dimensional



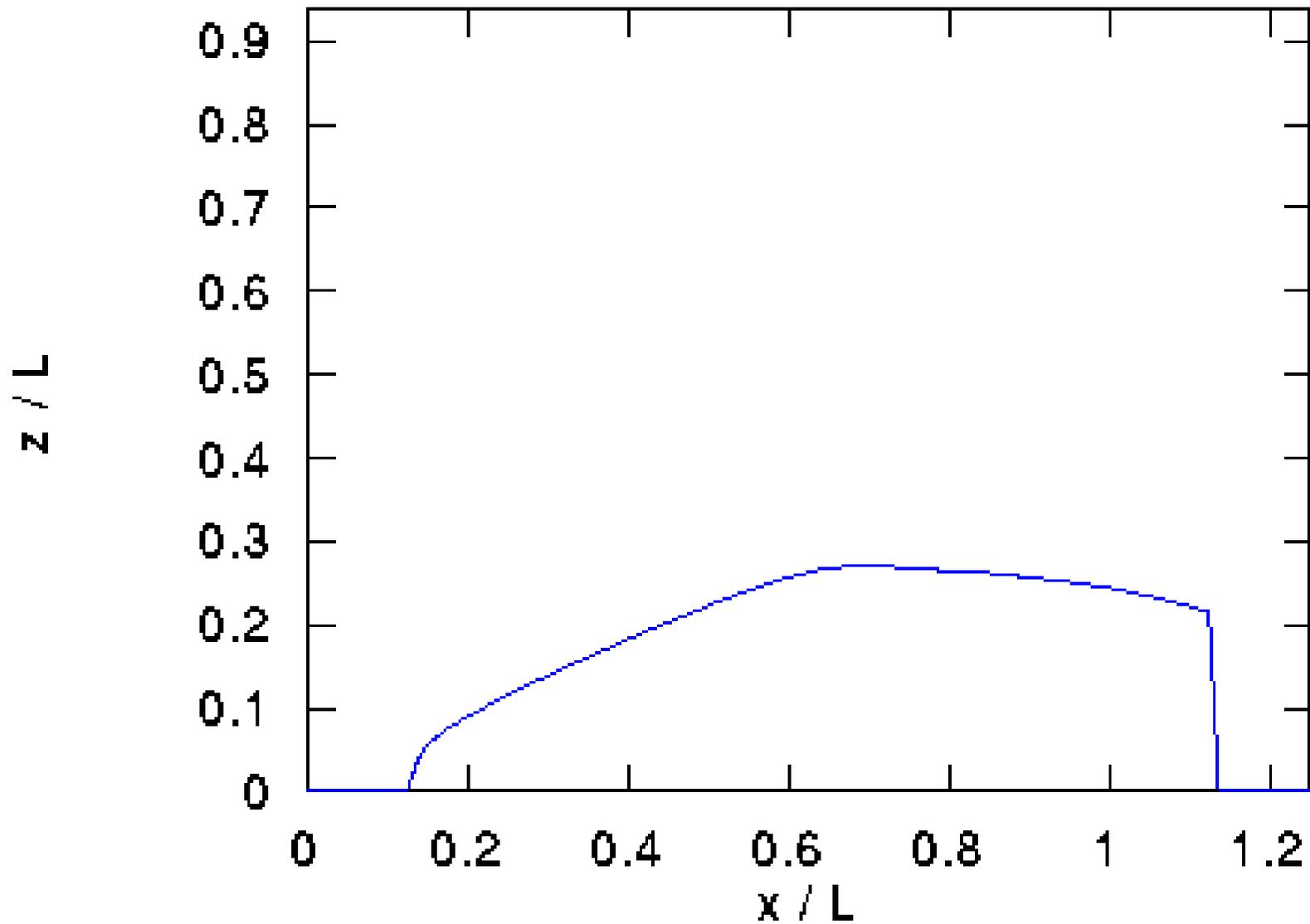
Software: KAPPA Stromfaden reibungsbehaftete Kraftfahrzeugumströmung 1

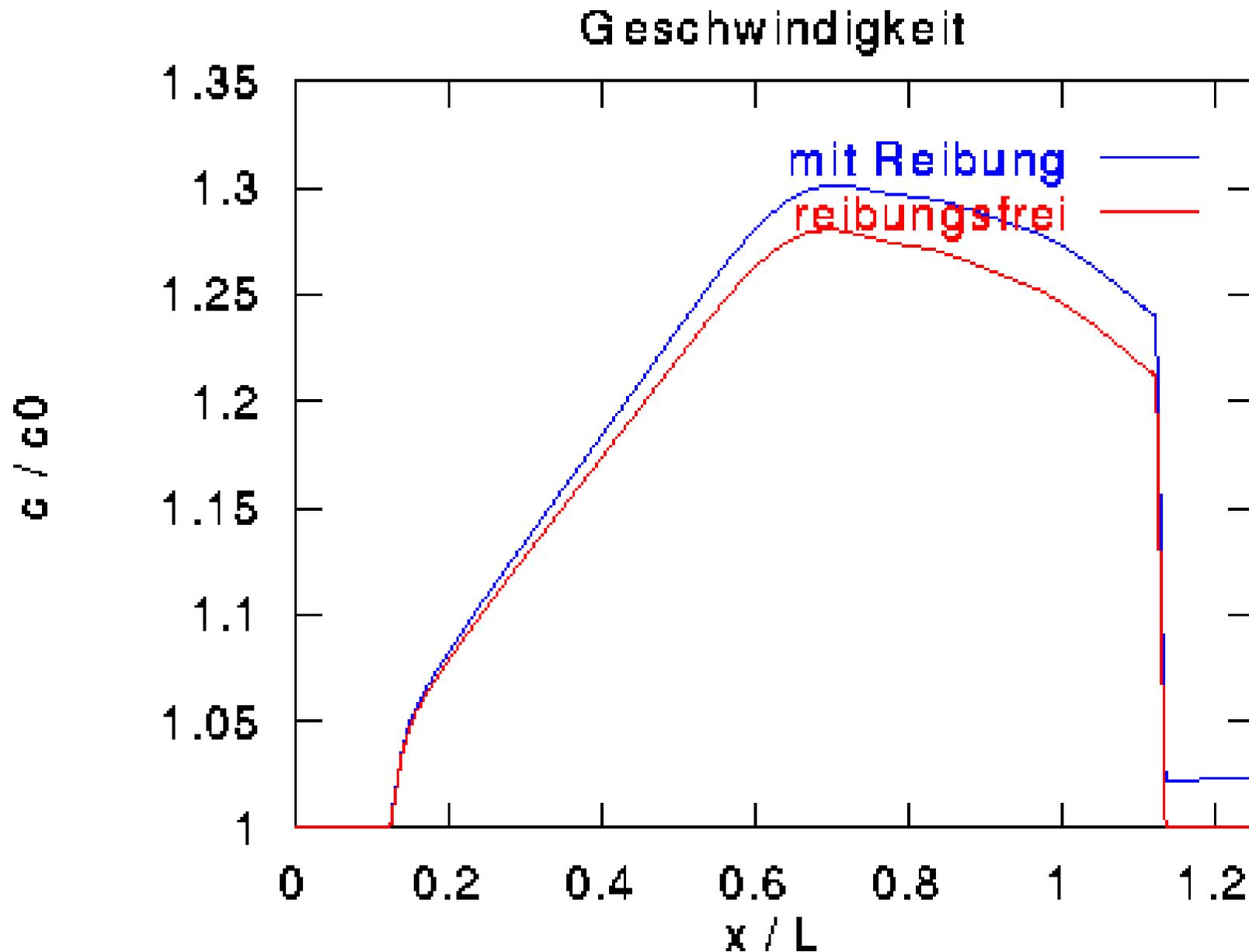


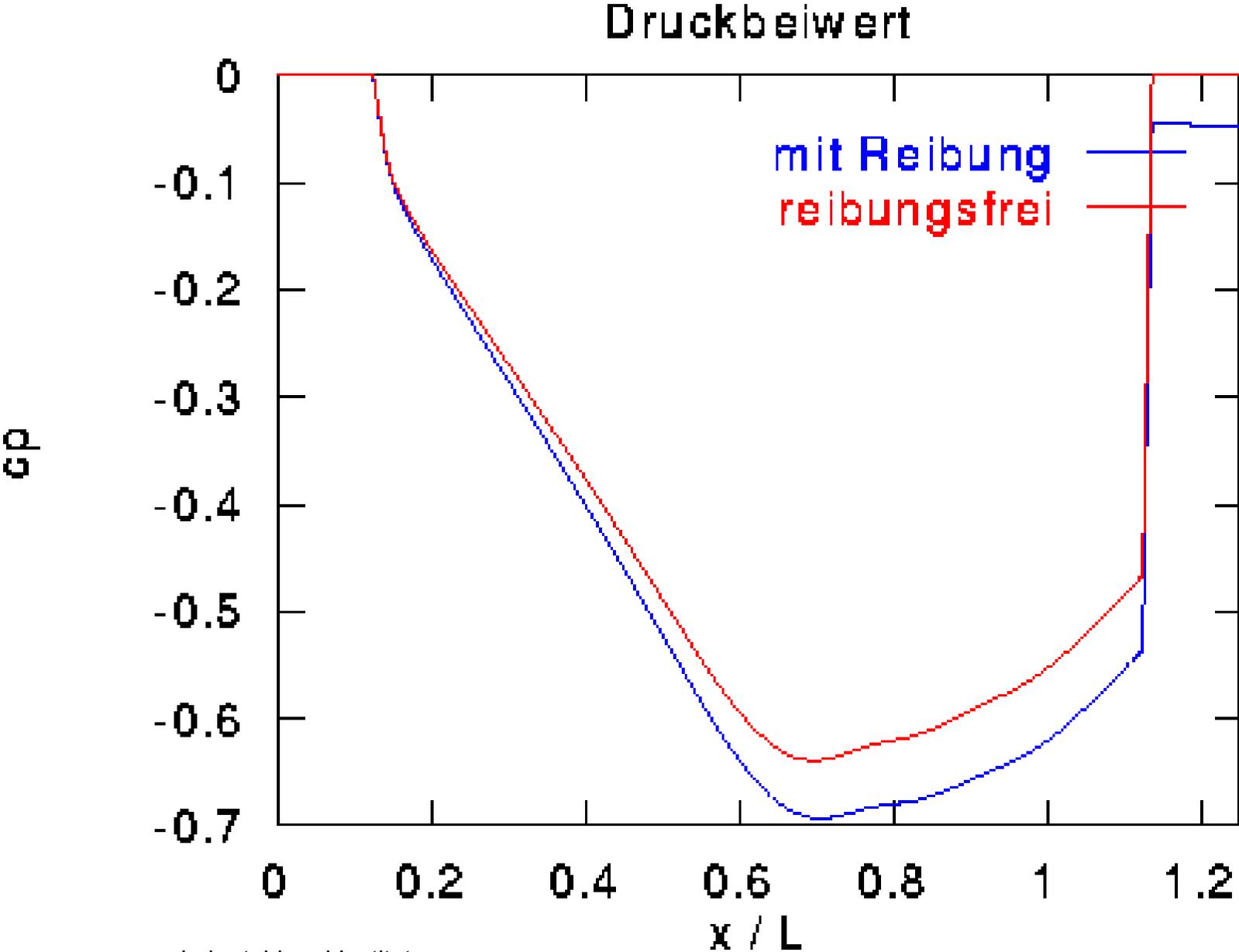
Software: KAPPA Stromfaden reibungsbehaftete Kraftfahrzeugumströmung 2

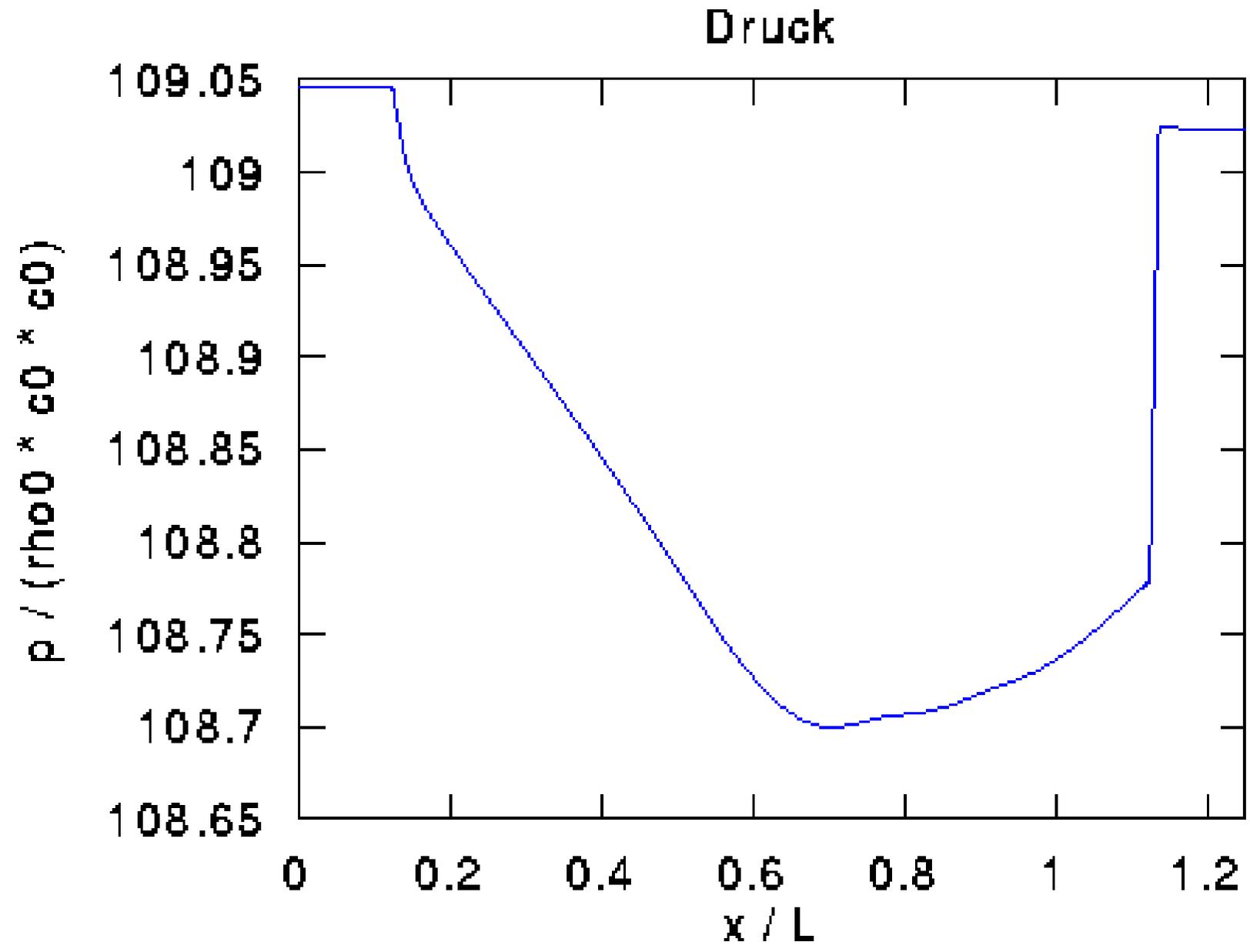


Kfz-Geometrie

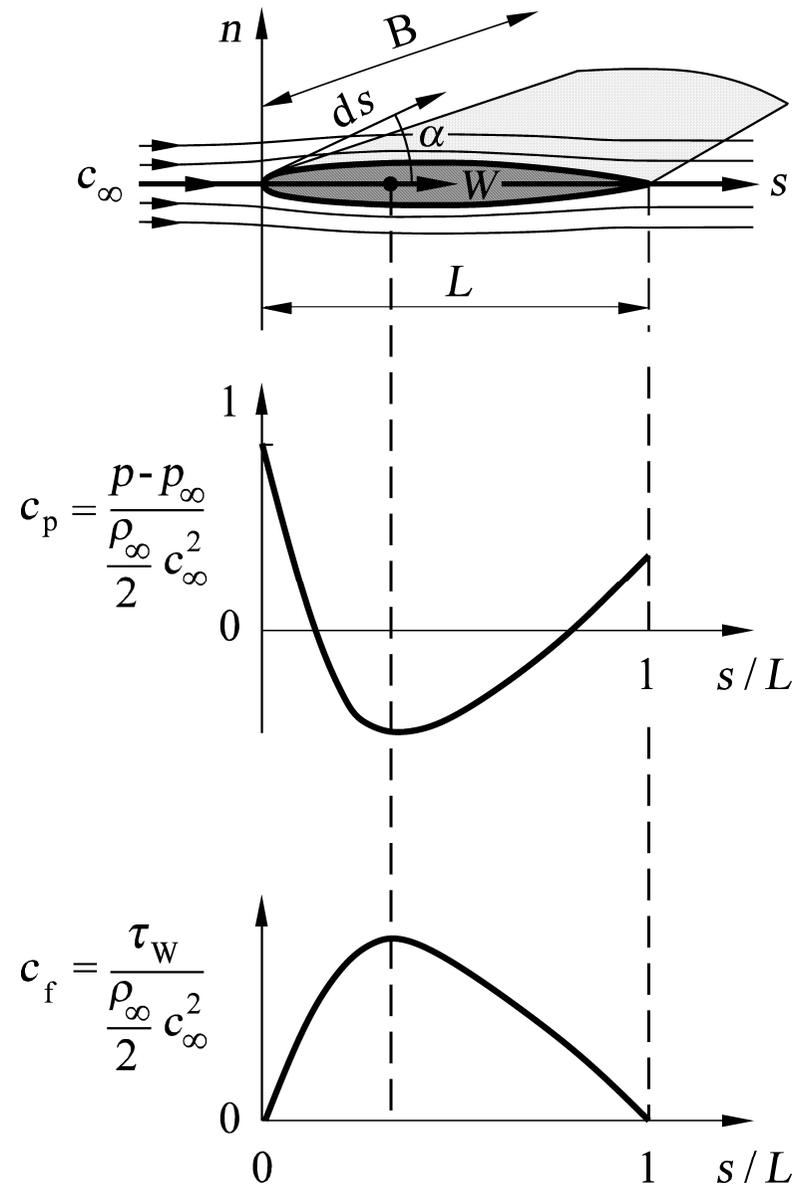




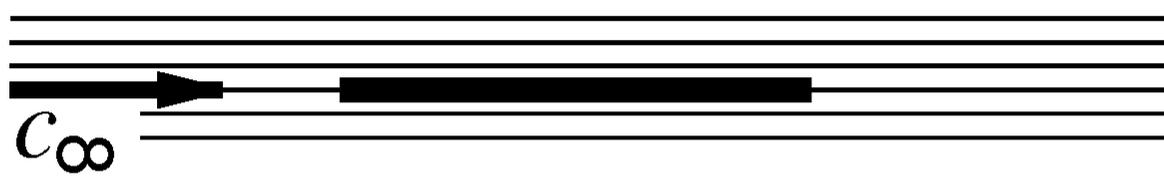
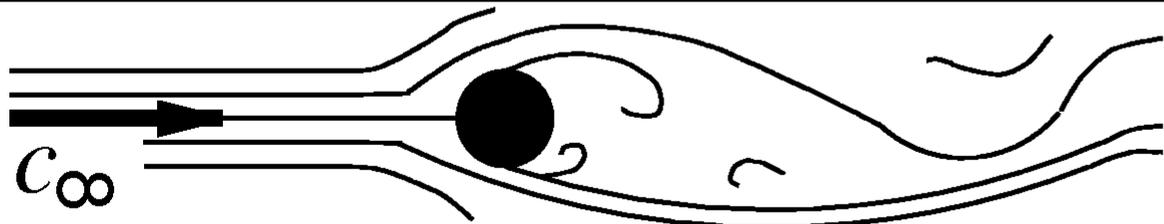
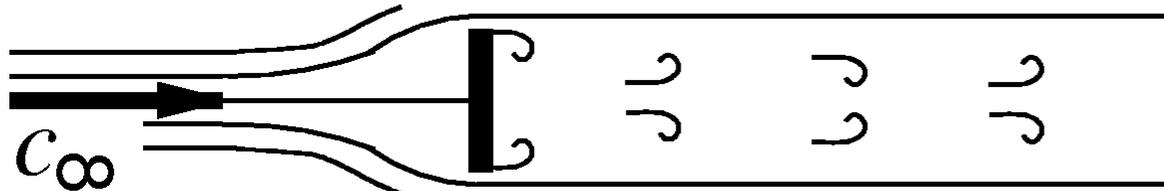




Druckbeiwert c_p und Widerstandsbeiwert c_f der sym. Profilumströmung

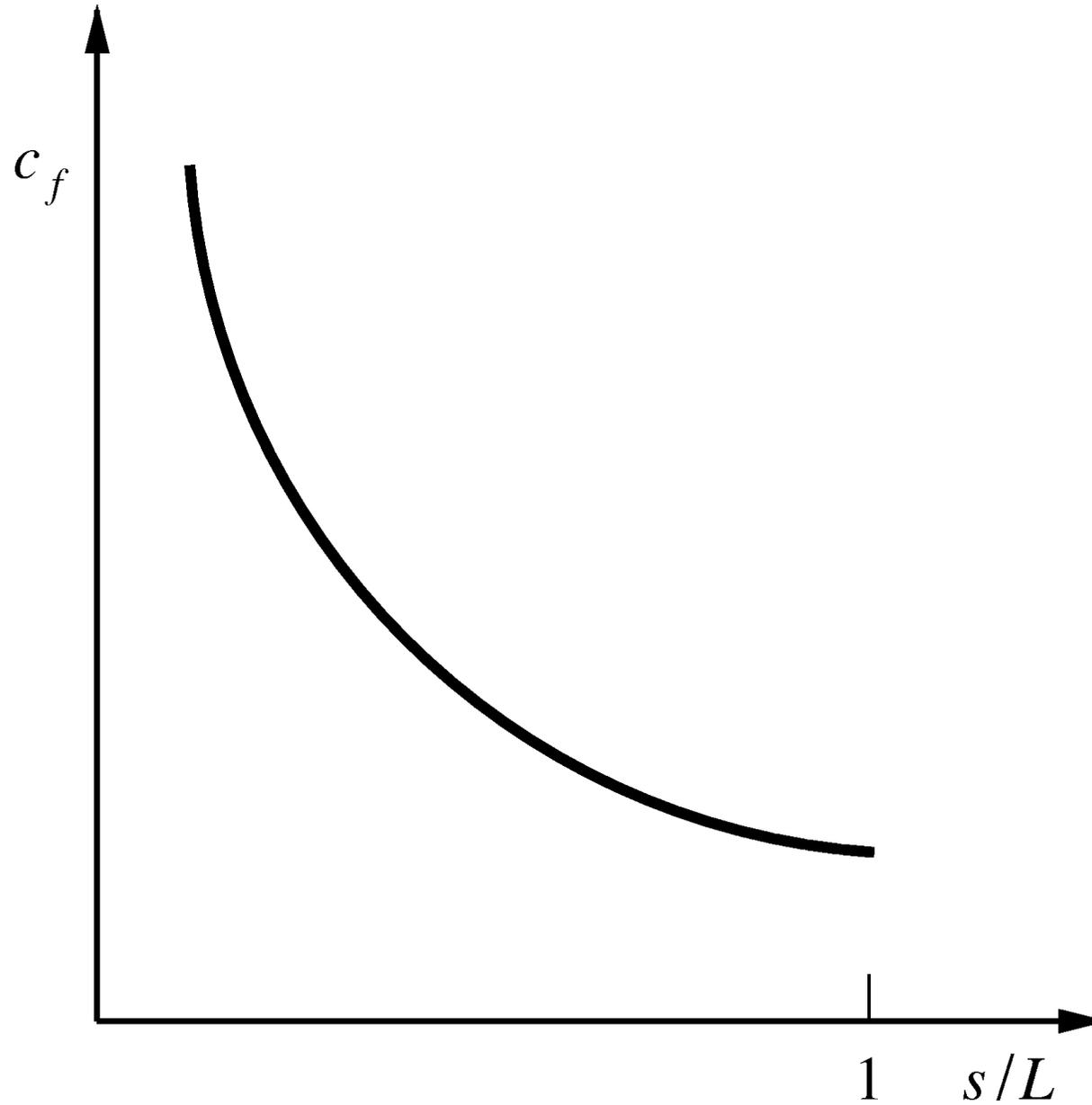


Druckwiderstand c_d und Reibungswiderstand c_f umströmter Körper

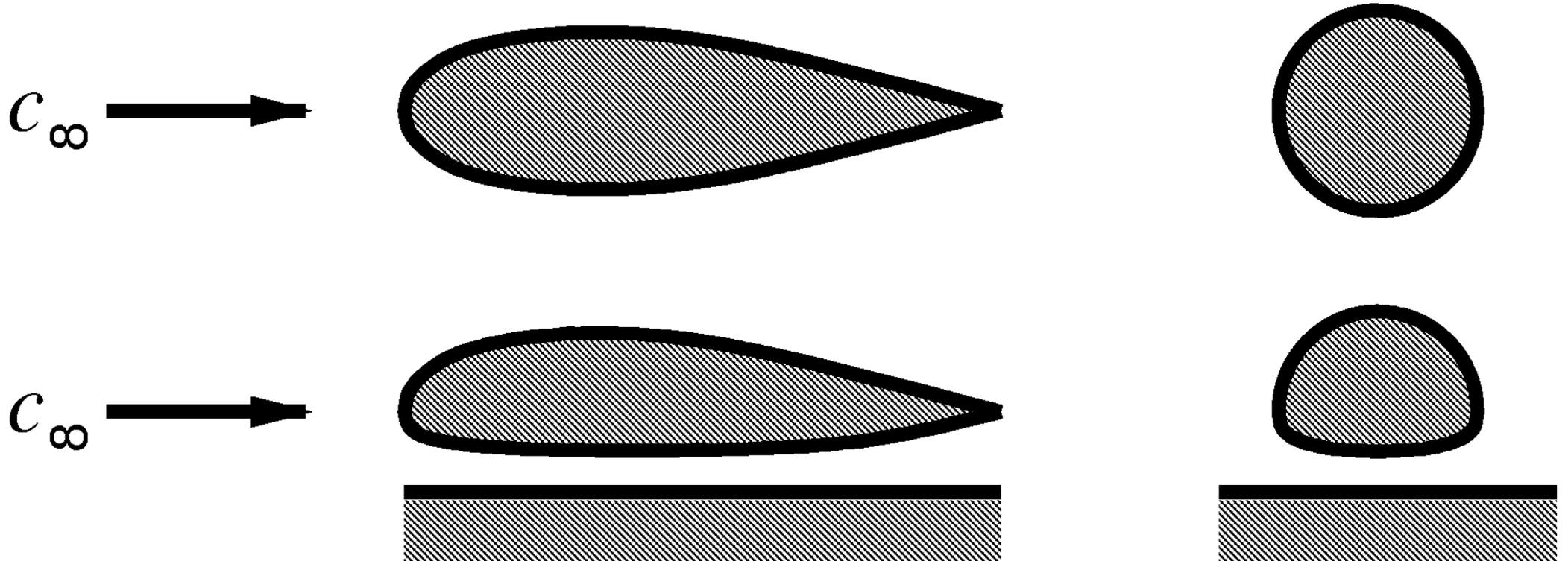
Körper	c_d	c_f
	0 %	100 %
	10 %	90 %
	90 %	10 %
	100 %	0 %



Reibungsbeiwert c_f der Plattengrenzschicht



Stromlinienkörper: freie Anströmung (Zeppelin), in Bodennähe (Kfz)



Natur

Storchenflügel und Hanggleiter

Vogelflug

Druckverteilung

Film: Vogelflug

Technische Umsetzung

Film: Hanggleiter, Ju 52, Boeing 707, Airbus

Pfeilflügel

Superkritischer Flügel

Airbus A380

Bauaufteilung A380

Standort Hamburg A380

Sektion 13 A380

Sektionen 18/19 A380

Flügel A380

Forschung

Film: Forschung – Aerodynamik

Laminarflügel

Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkung

Turbulenzbeeinflussung

Film: Struktur der viskosen Unterschicht

Überschallflug

Deltaflügel

Druckverteilung

Film: Concorde

Film: Space Shuttle

Hyperschallflug

Film: Scramjet X-43A

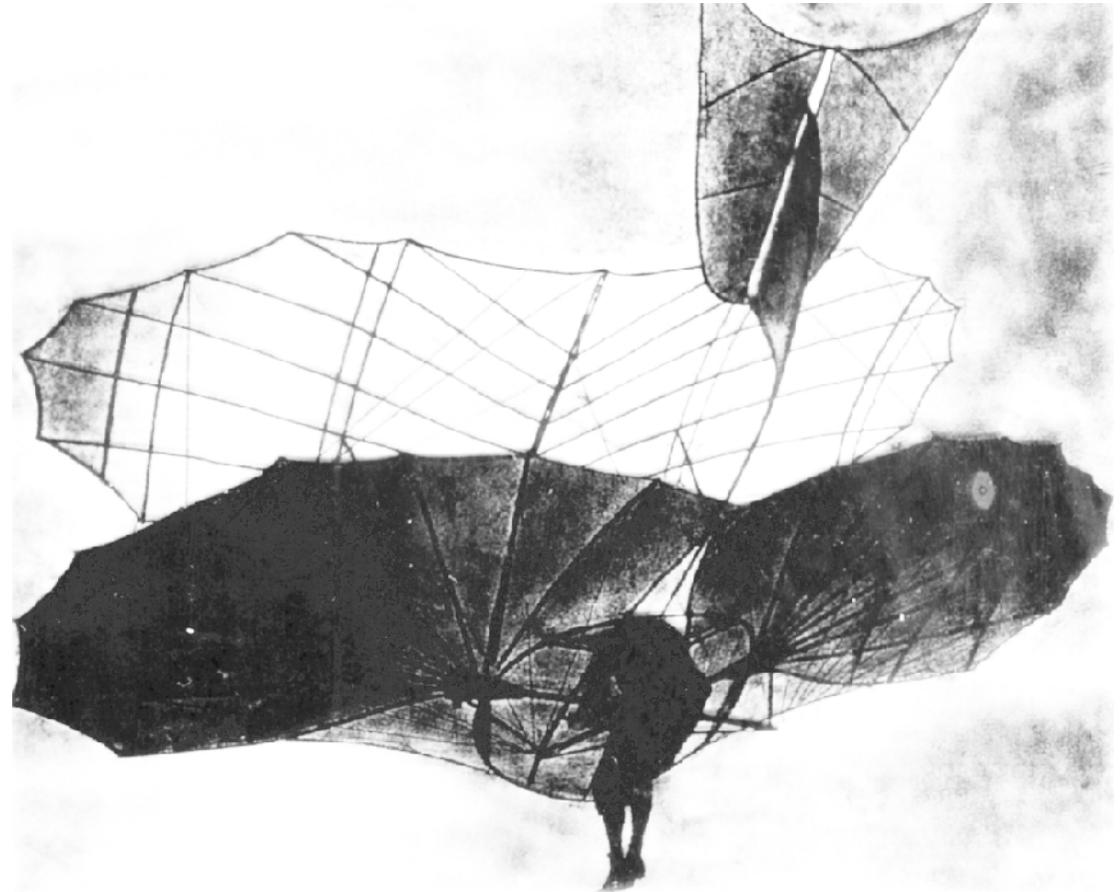
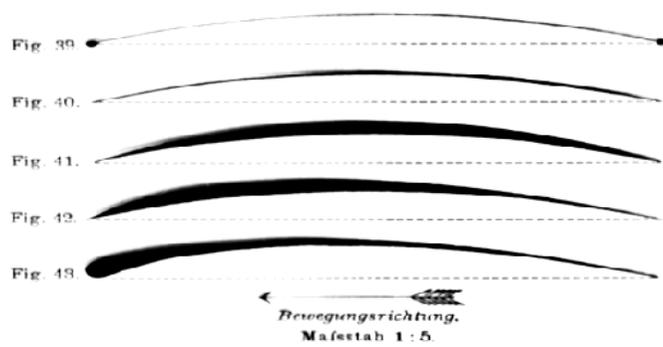
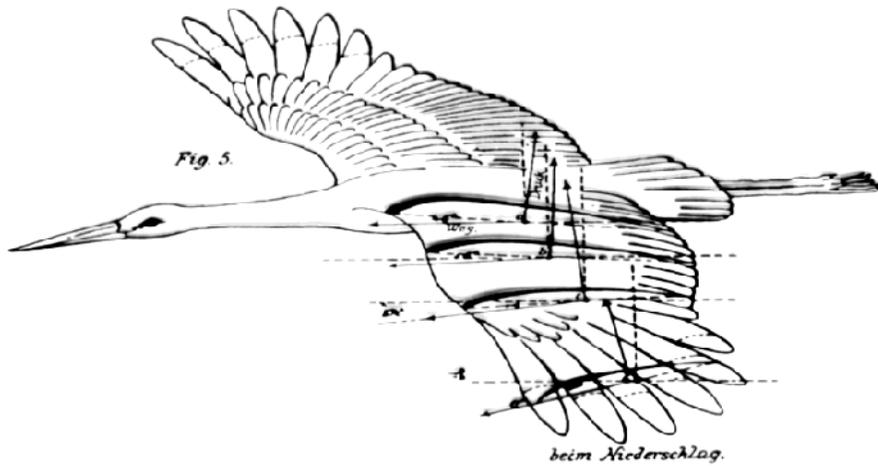
Scramjet X-43A

Film: Wiedereintrittskapsel

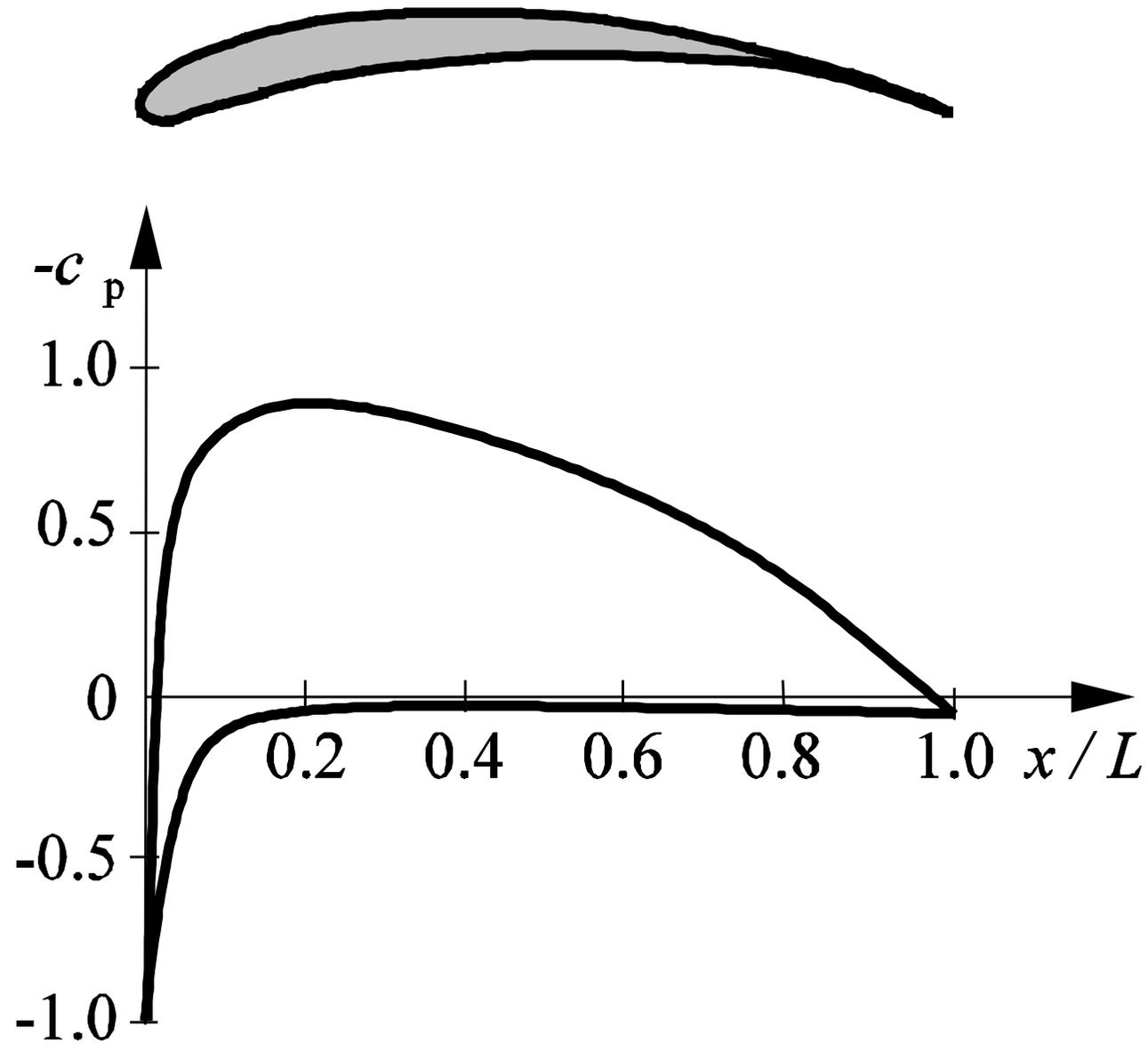
Wiedereintritt



Storchenflügel und Hanggleiter



Druckverteilung



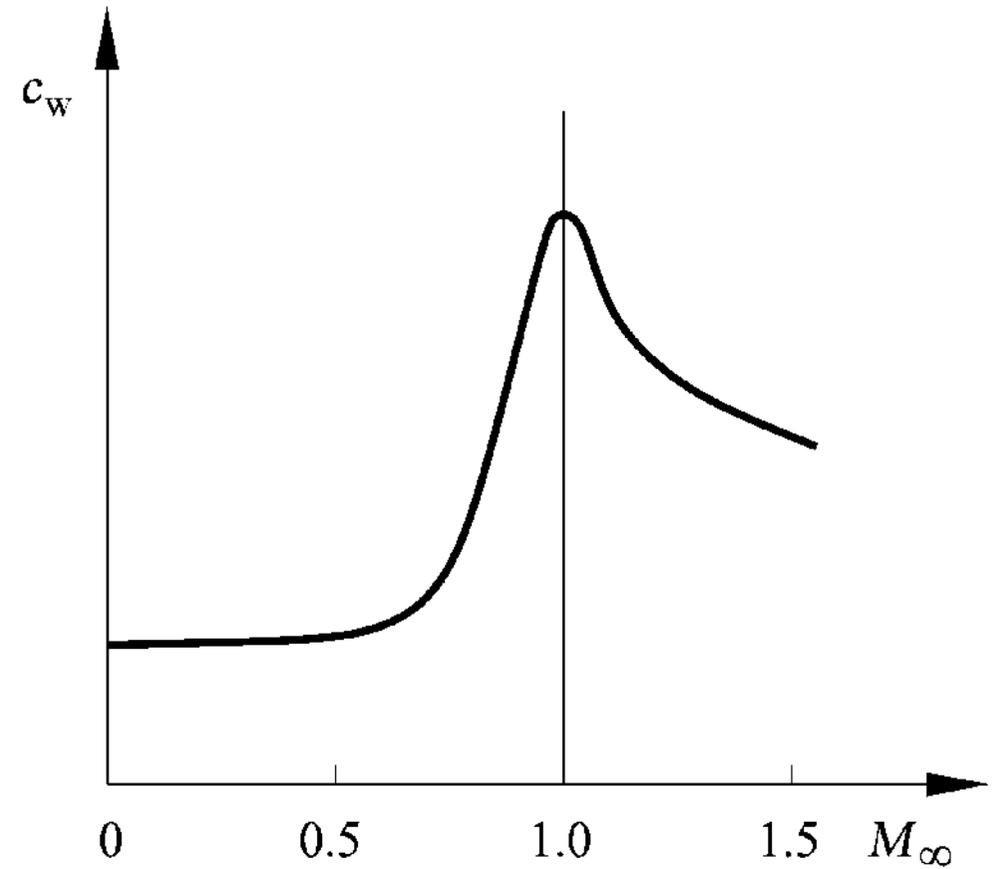
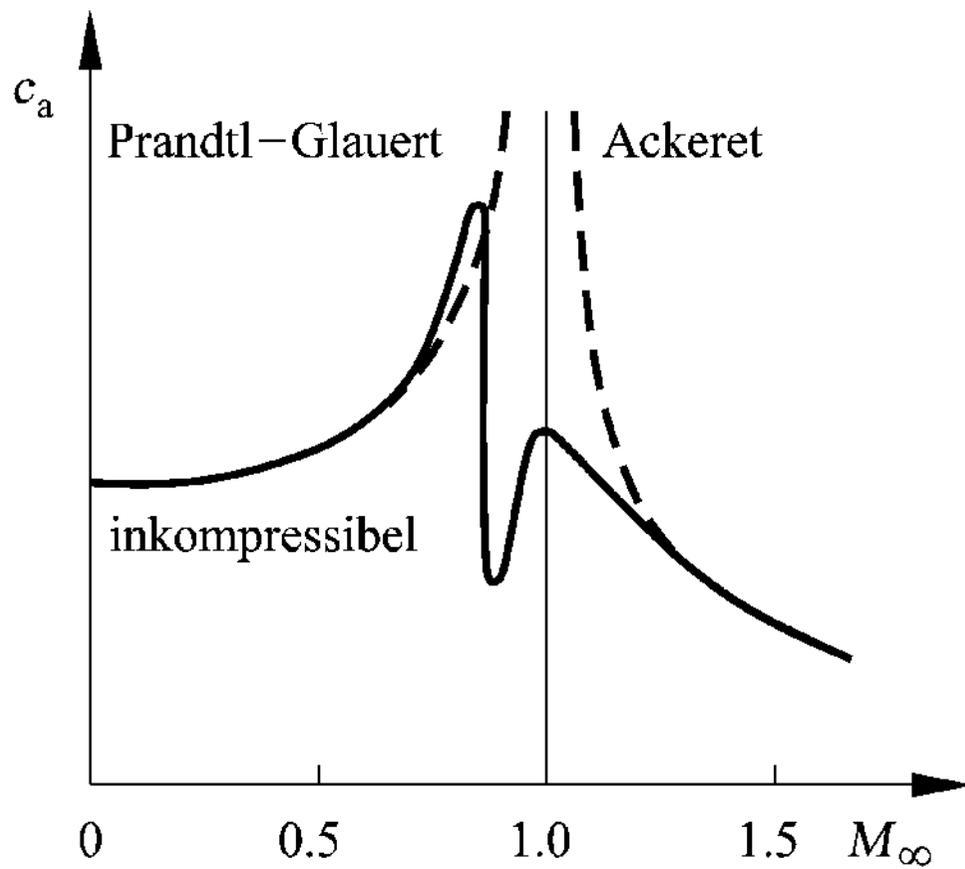
Fliegen



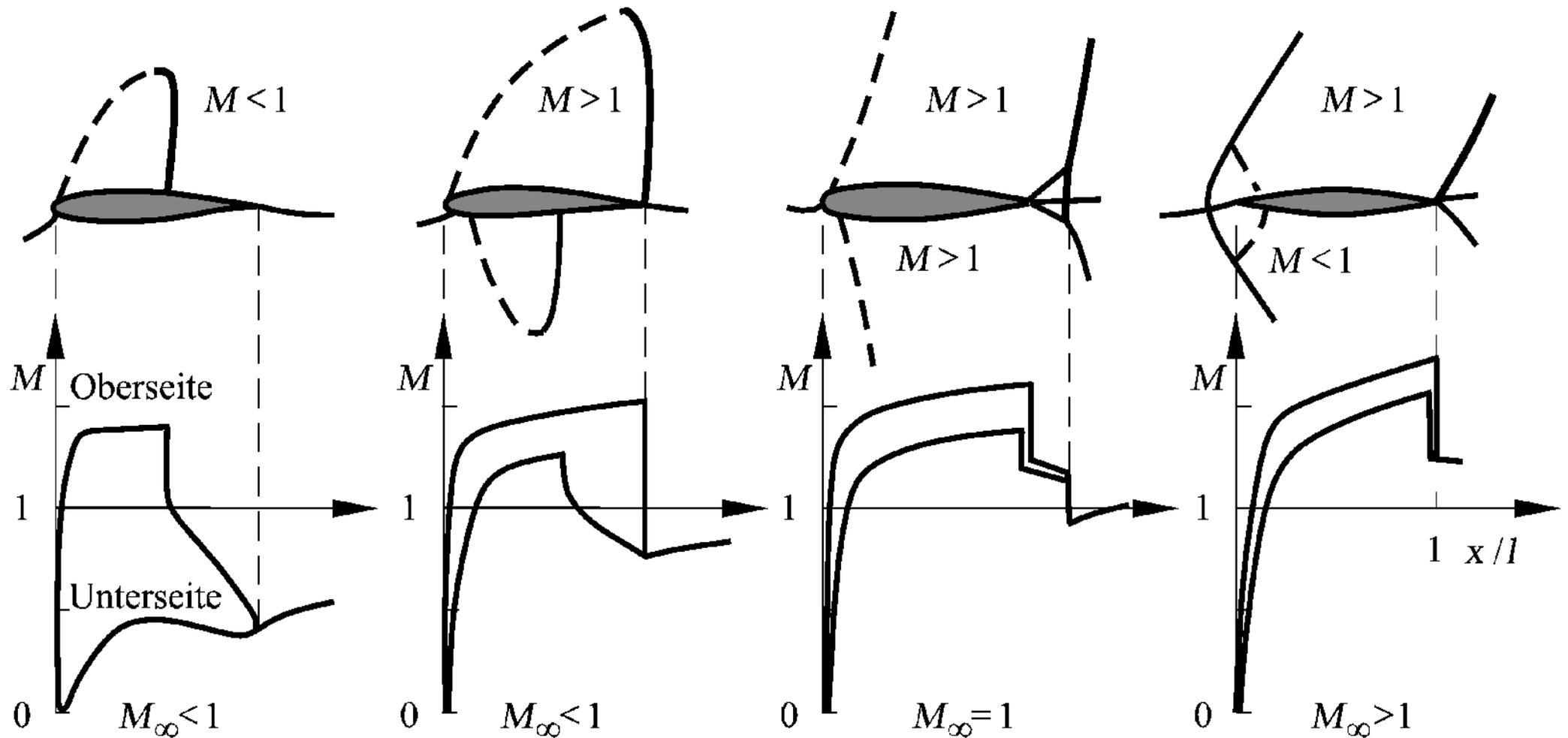
Technische Umsetzung des Vogelflugs



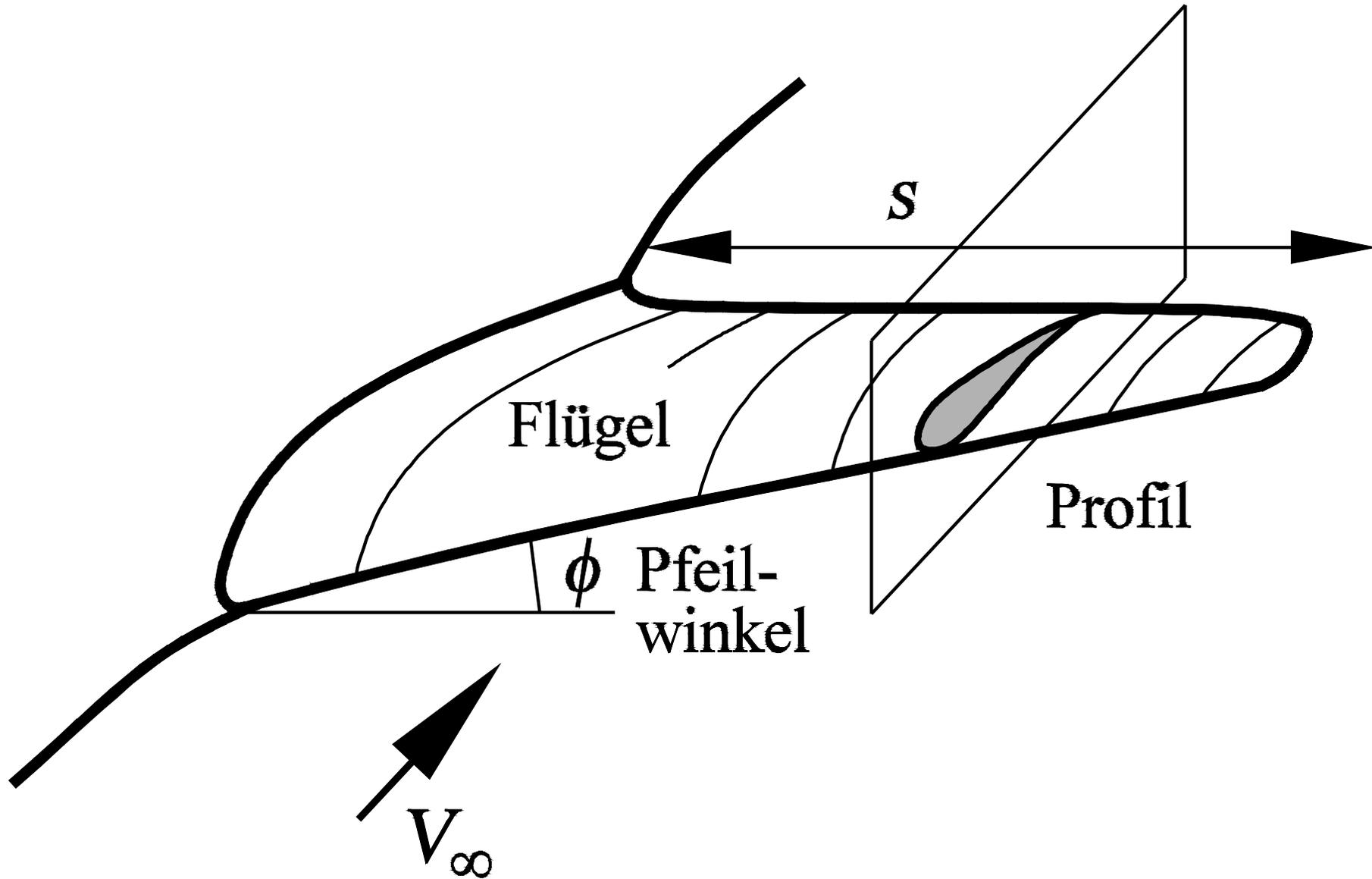
Auftriebsbeiwert c_a und Widerstandbeiwert c_w als Funktion von M_∞



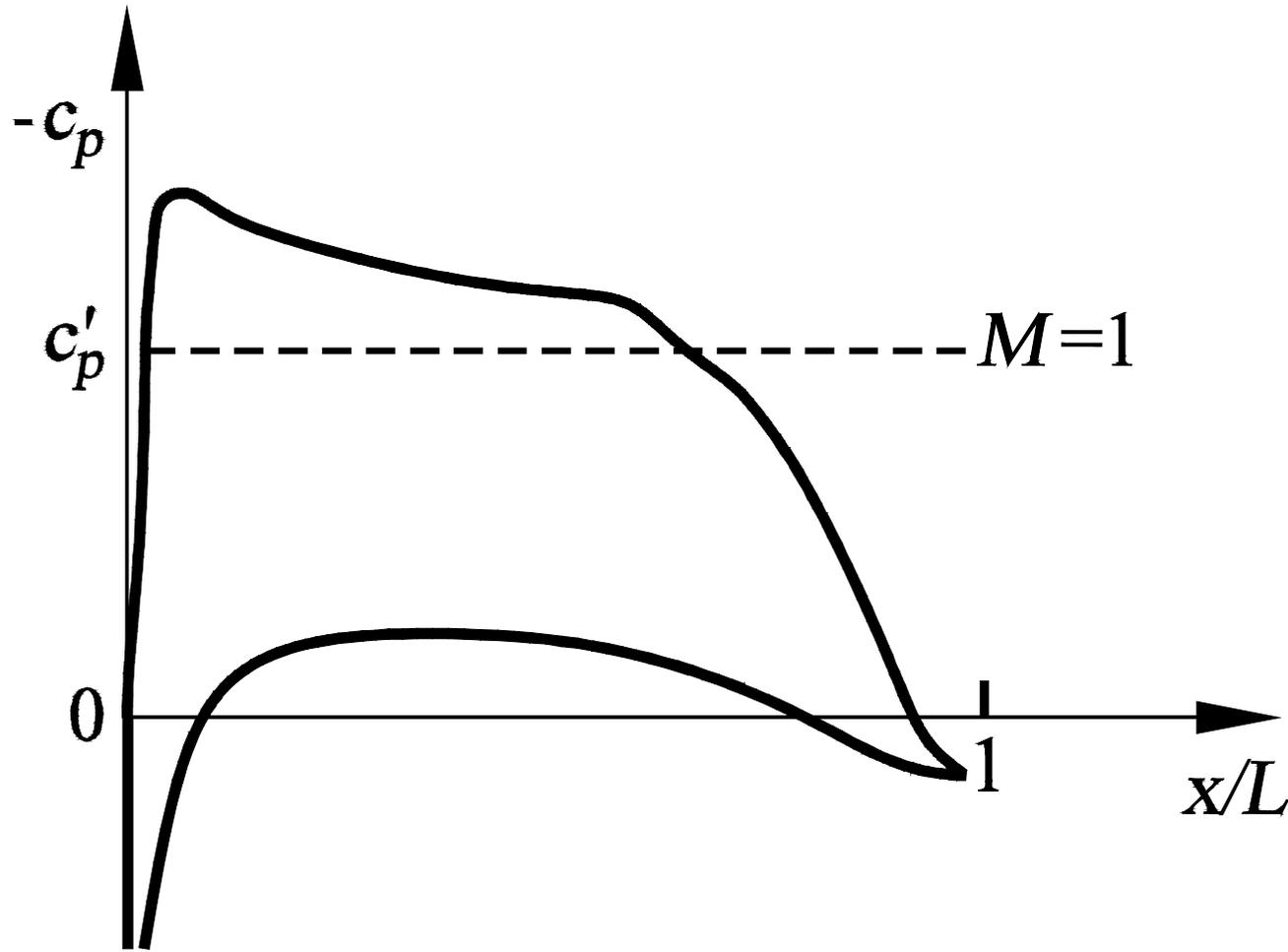
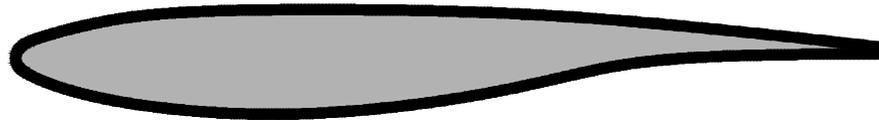
Mach-Zahlverteilung der transsonischen Profilstromung



Pfeilflügel



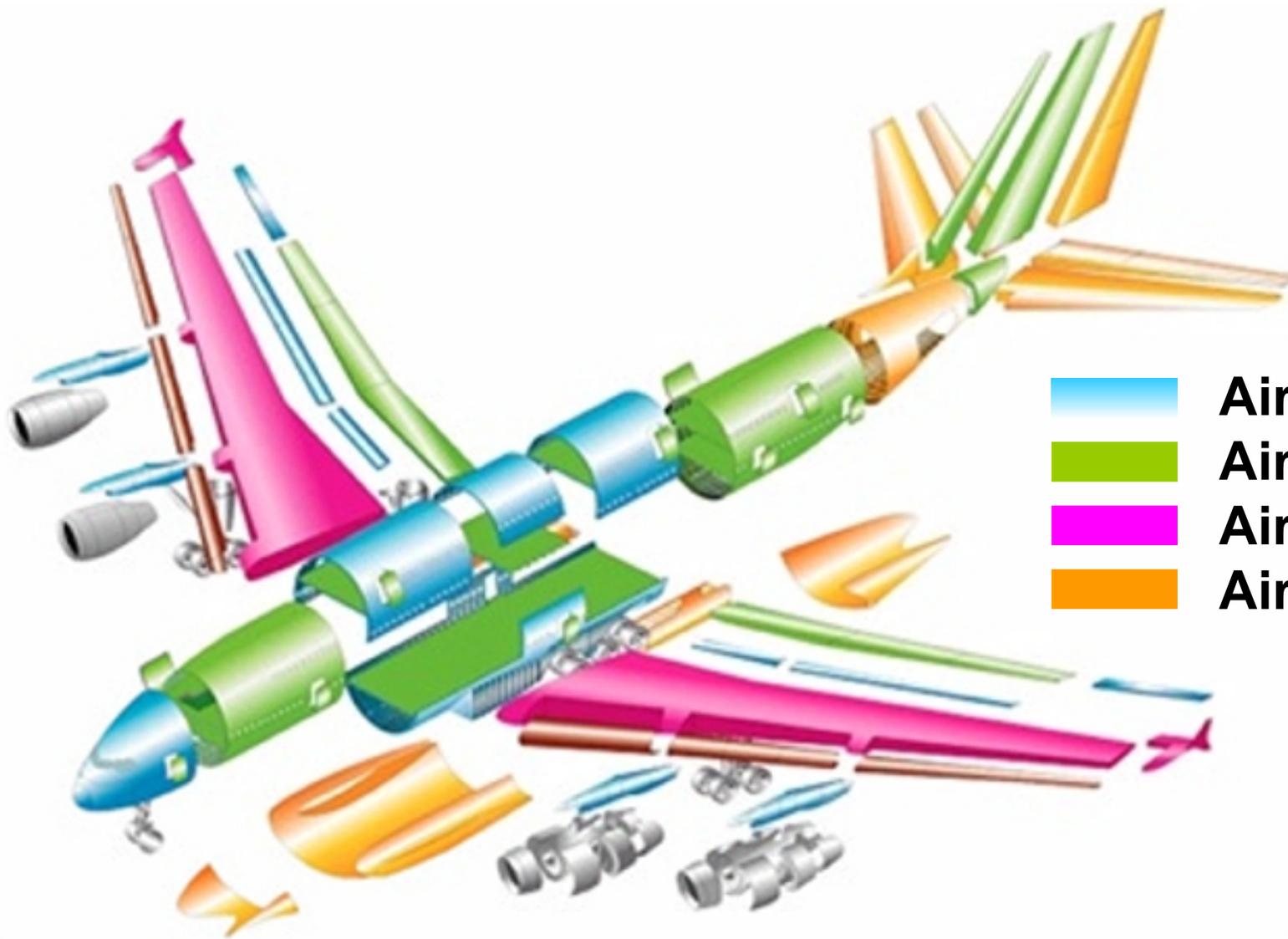
Superkritischer Flügel



Airbus A380



Bauaufteilung Airbus A380



-  Airbus France
-  Airbus Deutschland
-  Airbus UK
-  Airbus España



Standorterweiterung Hamburg für Airbus A380



Schwerpunkte

- Rumpfsektionen für alle Airbustypen:
 - Single Aisle
 - Long Range
 - Wide Body
 - A380
- Ausrüstungskomponenten



Sektion 13 Airbus A380



Vormontage Sektionen 18/19 Airbus A380



Flügel Airbus A380

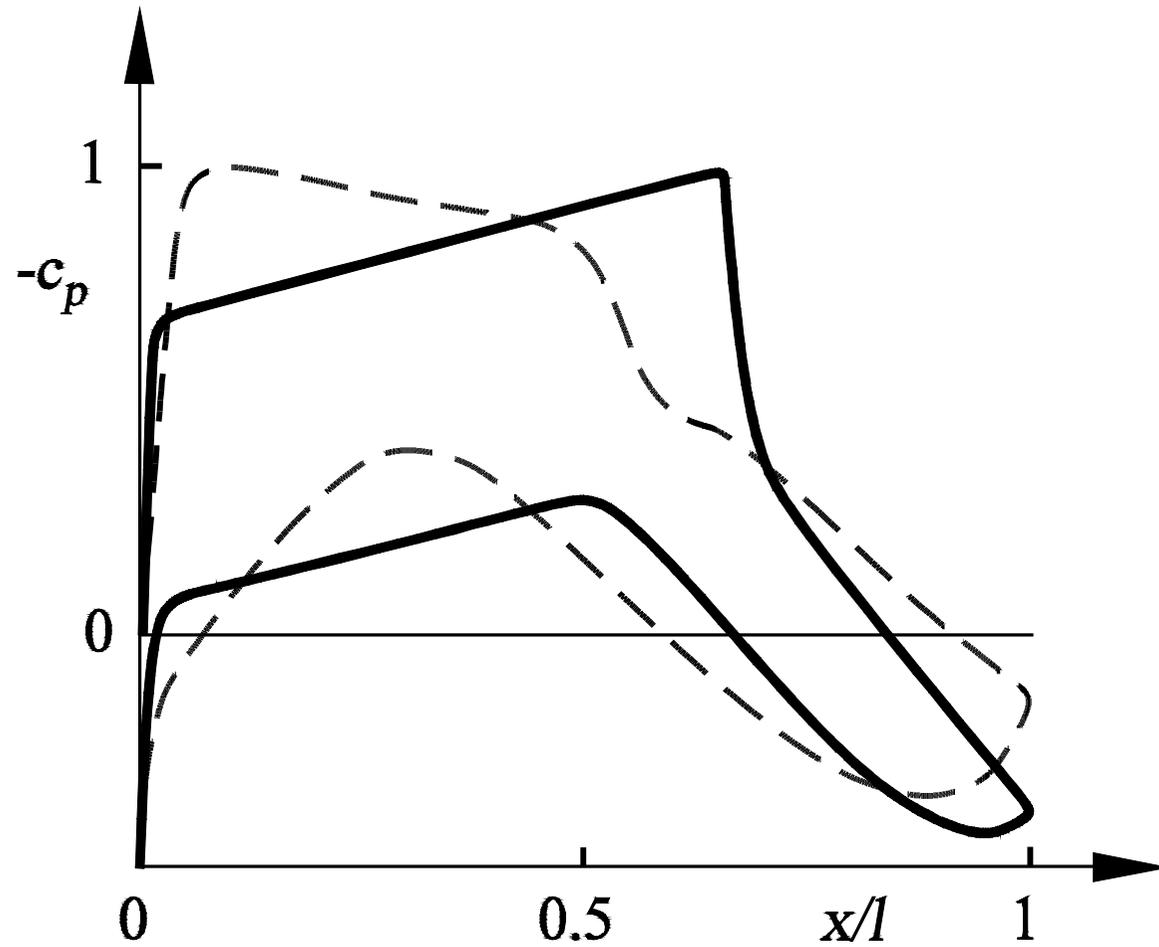




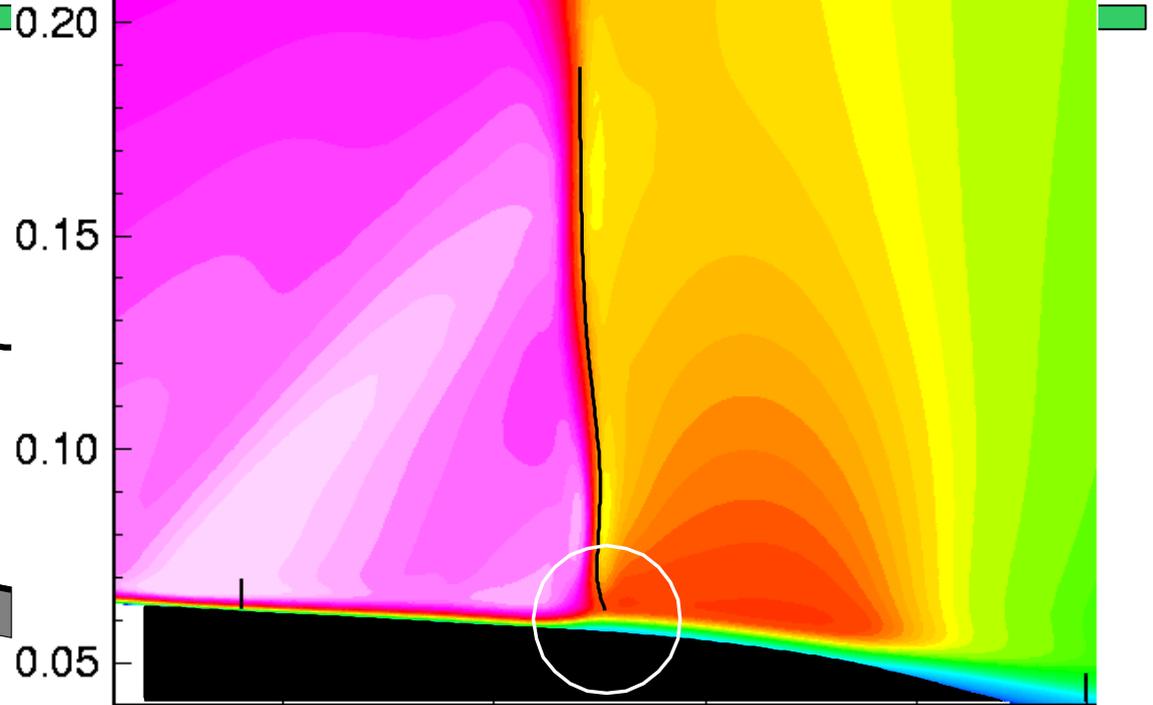
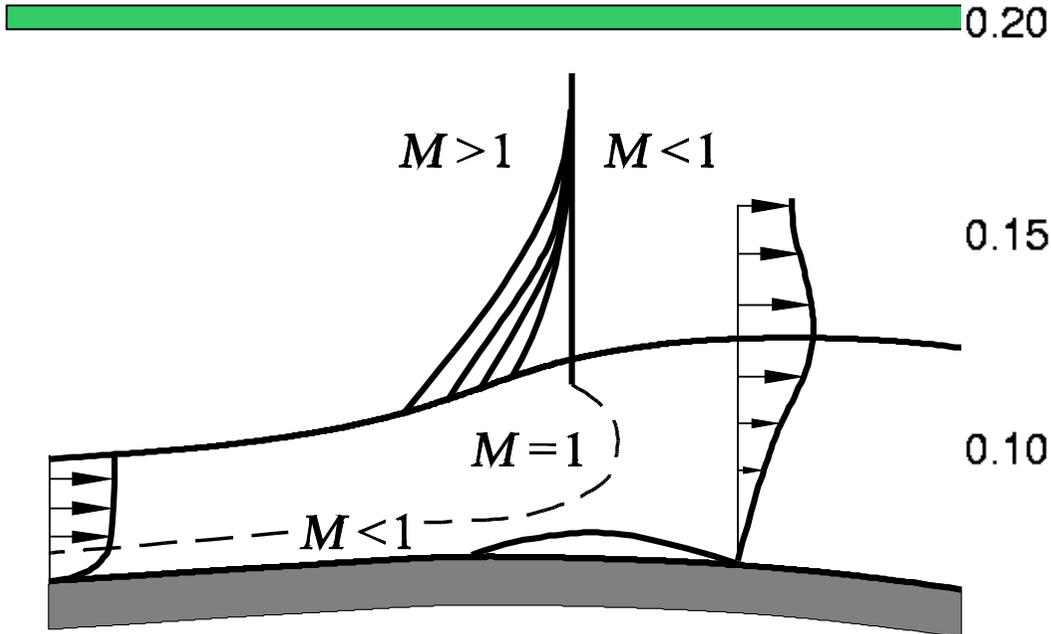
Aerodynamik



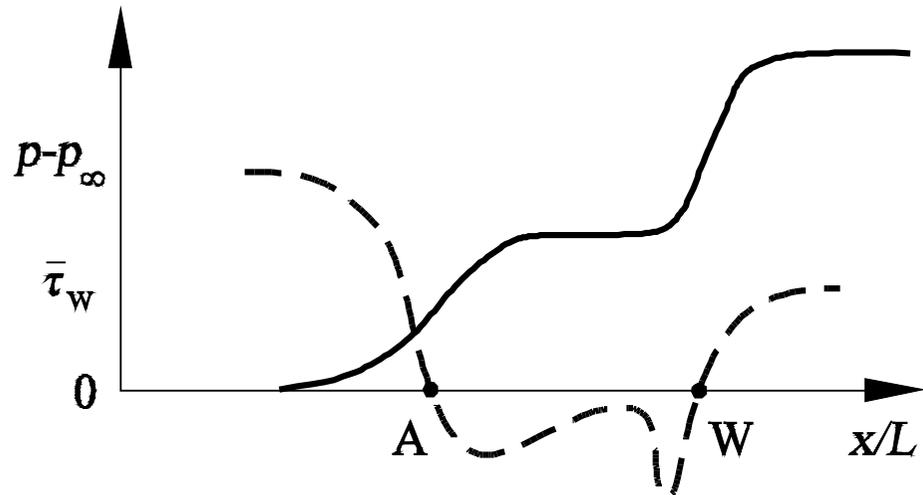
Laminarflügel



Stoß-Grenzsch



Mach-Zahlverteilung auf dem Profil



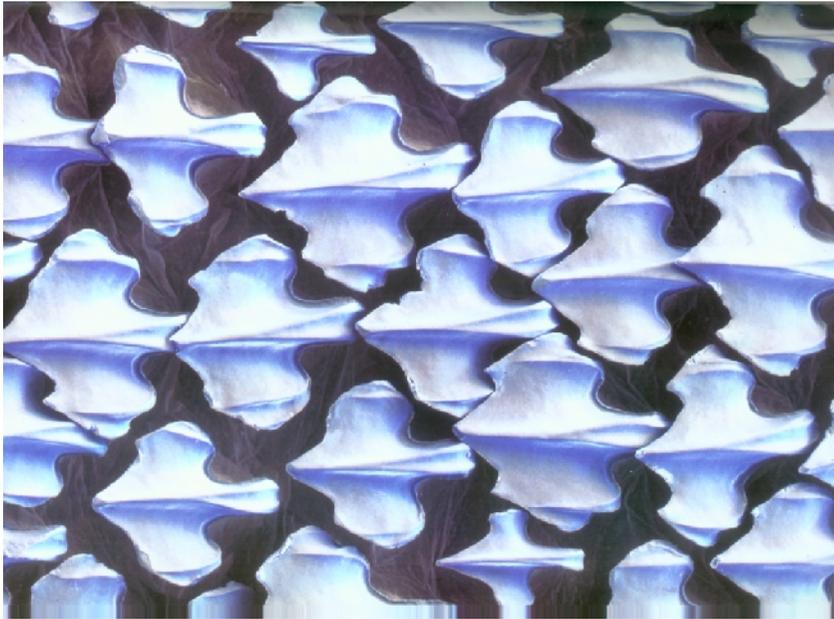
Ablösung Wiederanlegen



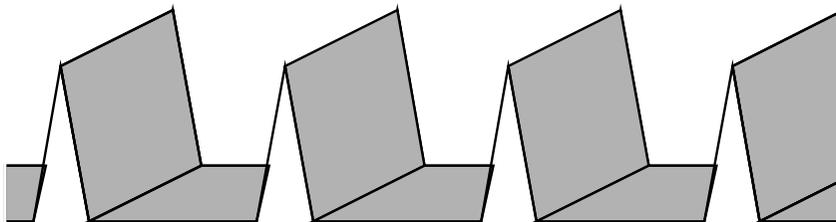
Turbulenzbeeinflussung

u_∞ →

100 μm



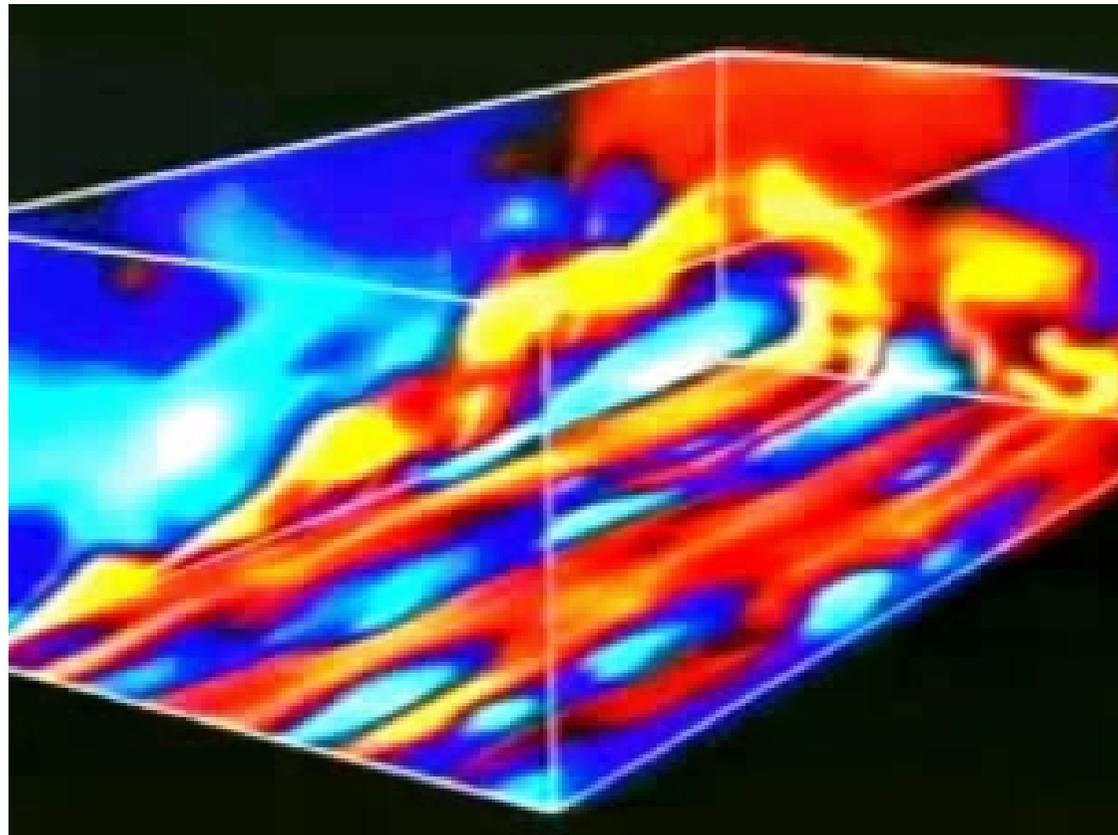
Haifisch-Schuppen



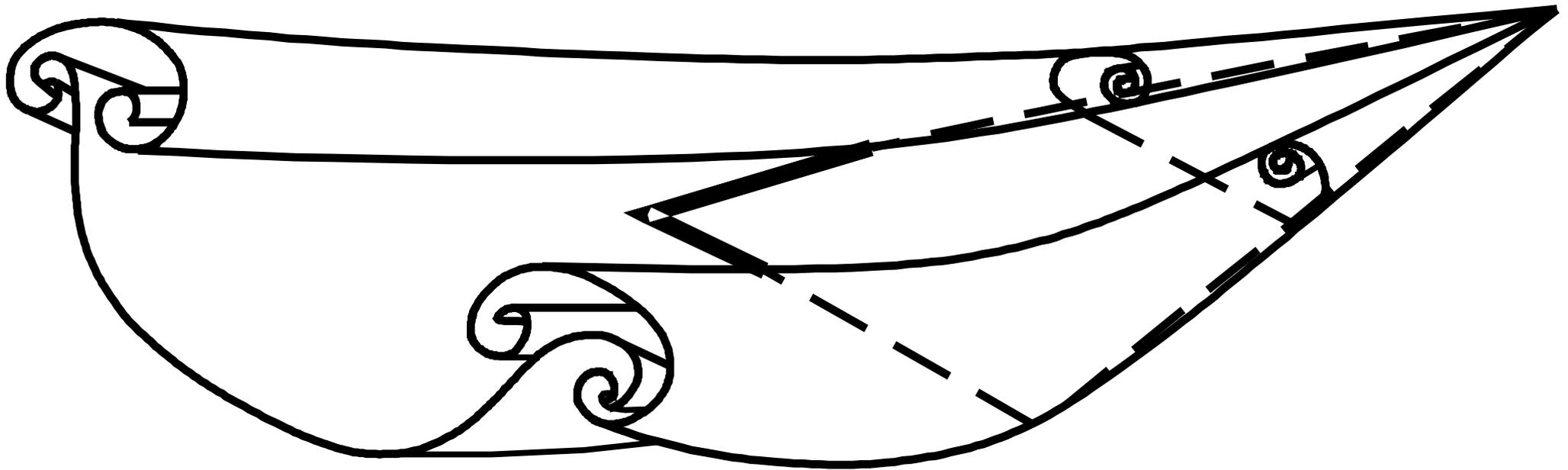
Riblet-Folie



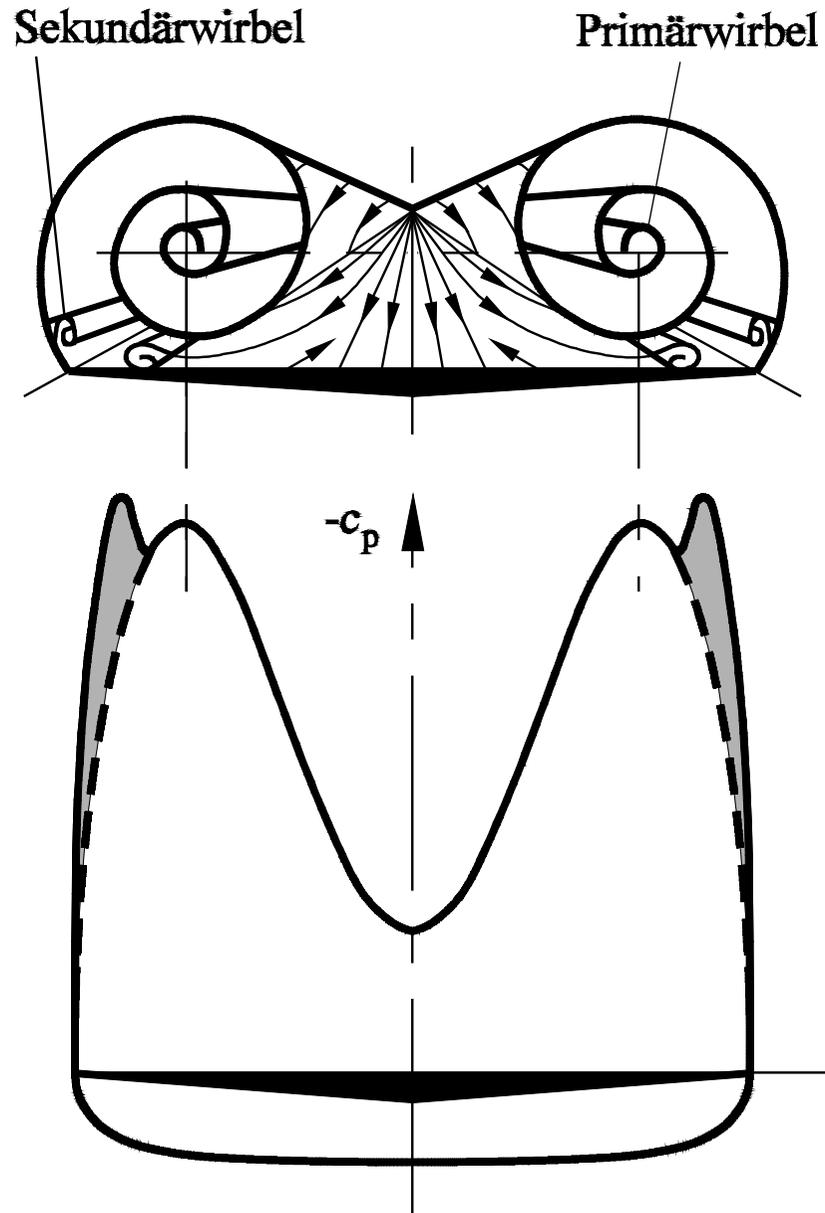
Film: Struktur der viskosen Unterschicht



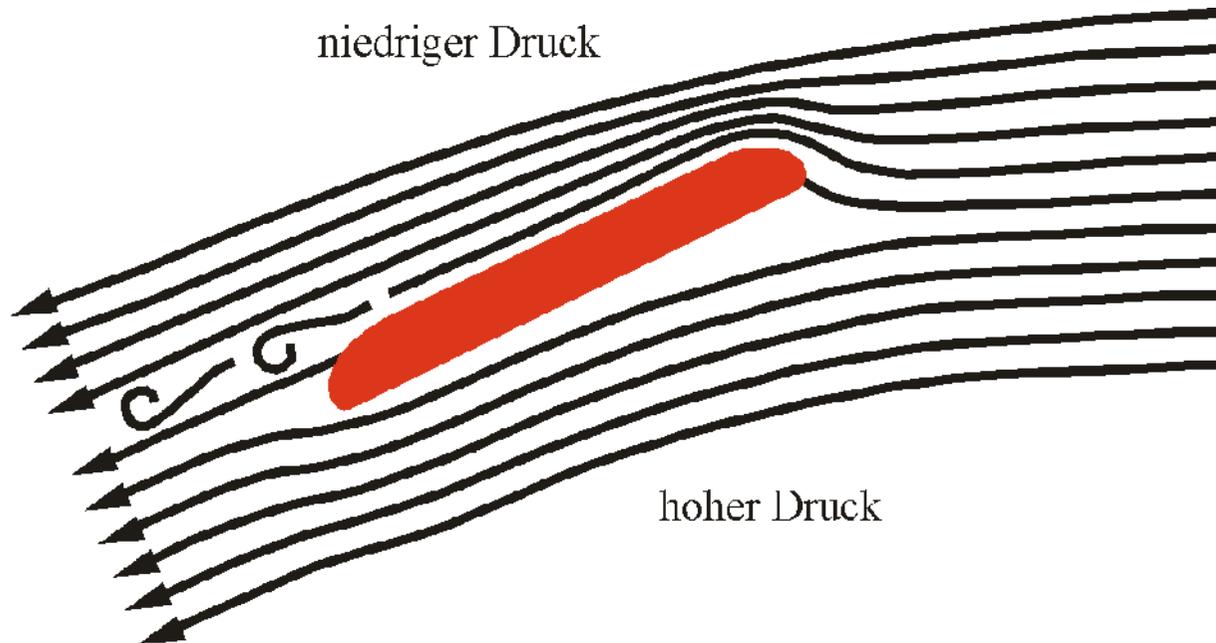
Deltaflügel



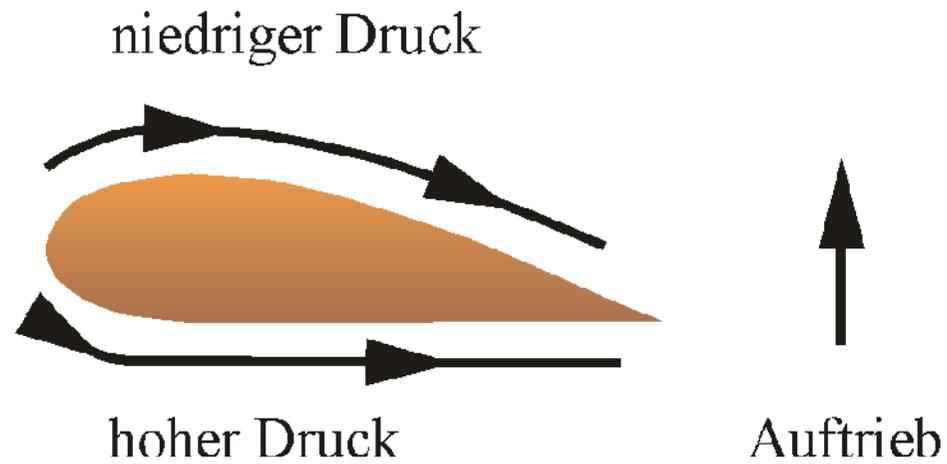
Druckverteilung



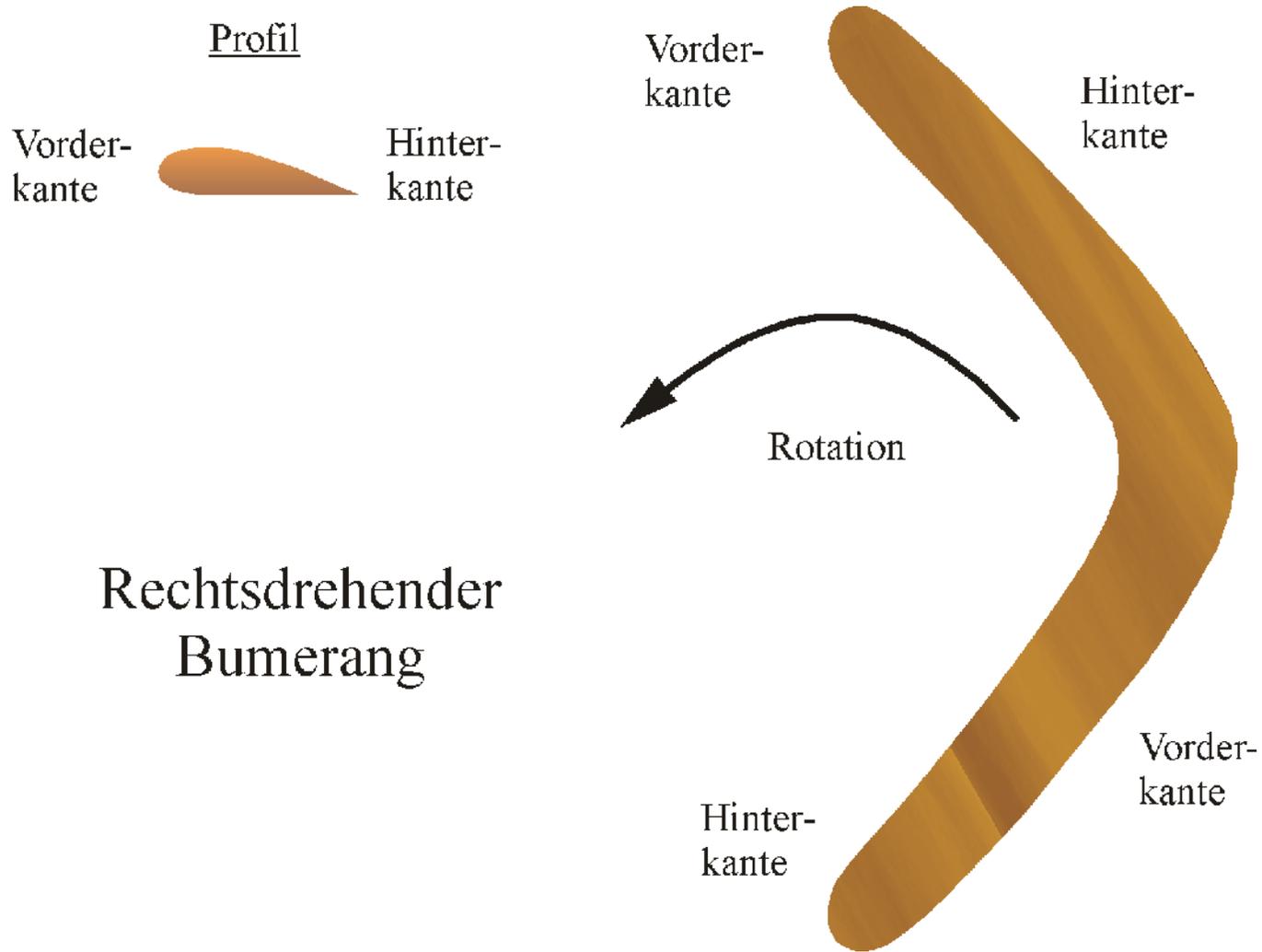
Umströmung eines Frisbees



Form eines Bumerangs



Flug eines Bumerangs



Rechtsdrehender
Bumerang



Rückkehr eines Bumerangs

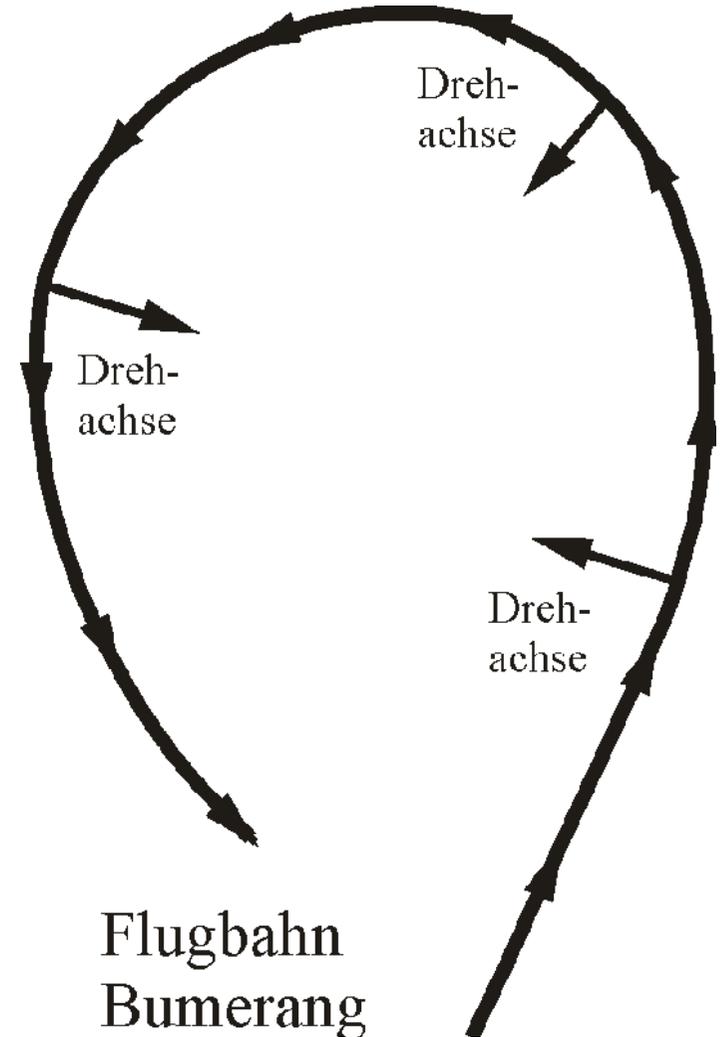
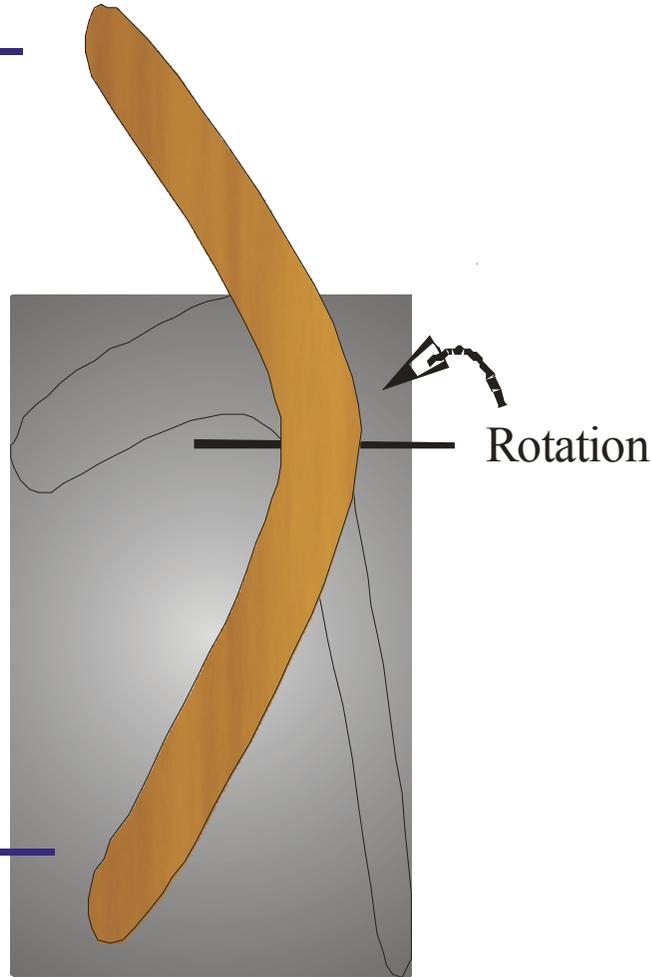
Größere
aerodynamische
Kraft



Kraft
einviertel
Umdrehung
später



Geringere
aerodynamische
Kraft



Film: Concorde



Film: Space Shuttle



Film: Scramjet X-43A



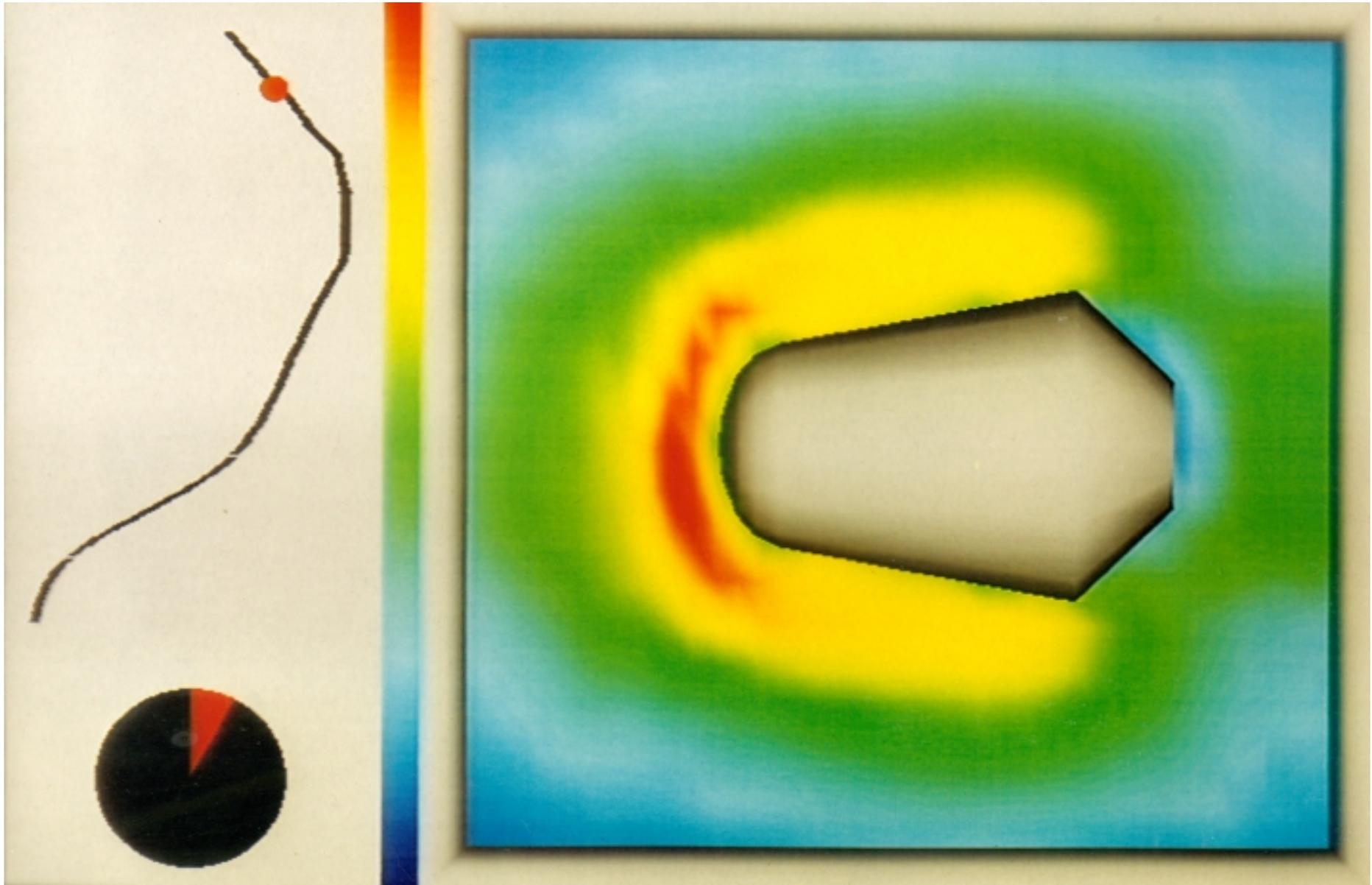
Scramjet X-43A



Aerothermodynamik



Wiedereintritt



Kompressible Strömungen

Experiment: Peitschenknall

Peitschenknall

Experiment: Platzender Luftballon

Wellenausbreitung einer Störquelle

Geschoss bei Überschallgeschwindigkeit

Überschallflug, Druckverteilung am Boden

Stromfadentheorie bei Querschnittsveränderung

Space Shuttle Main Engine

Film: Raketendüse

Laval-Düse

Mach-Zahlverlauf, Massenstromdichte in Laval-Düse

Verdichtungsstoß

Kugelkopfwelle

Raumkapsel auf Wiedereintrittstrajektorie

Film: Numerische Simulation Wiedereintrittskapsel

Wiedereintrittskapsel im Windkanal

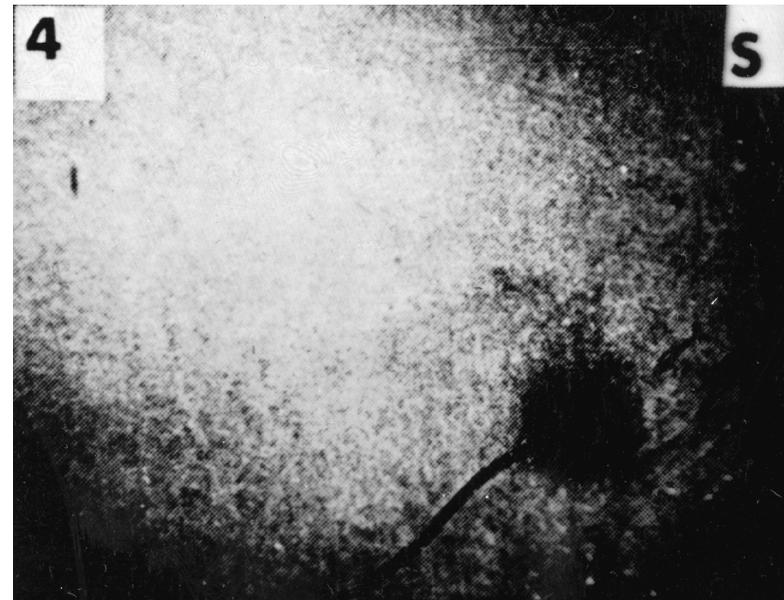
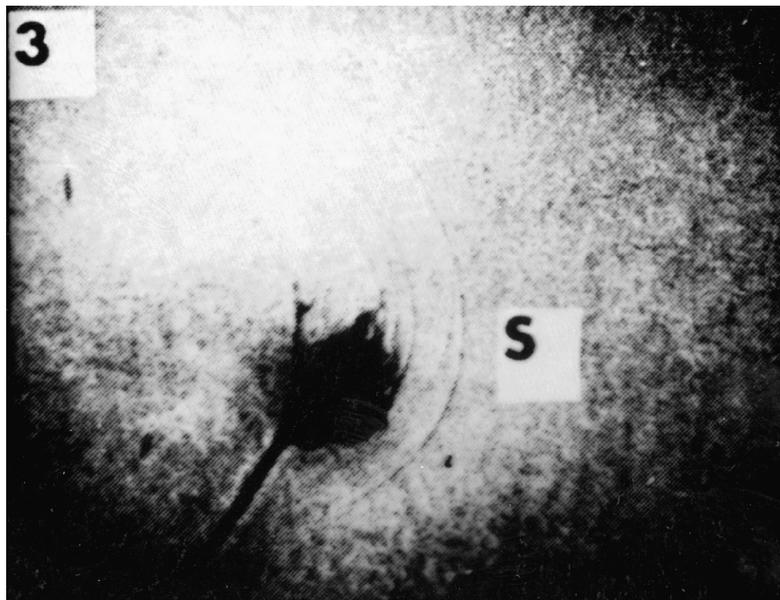
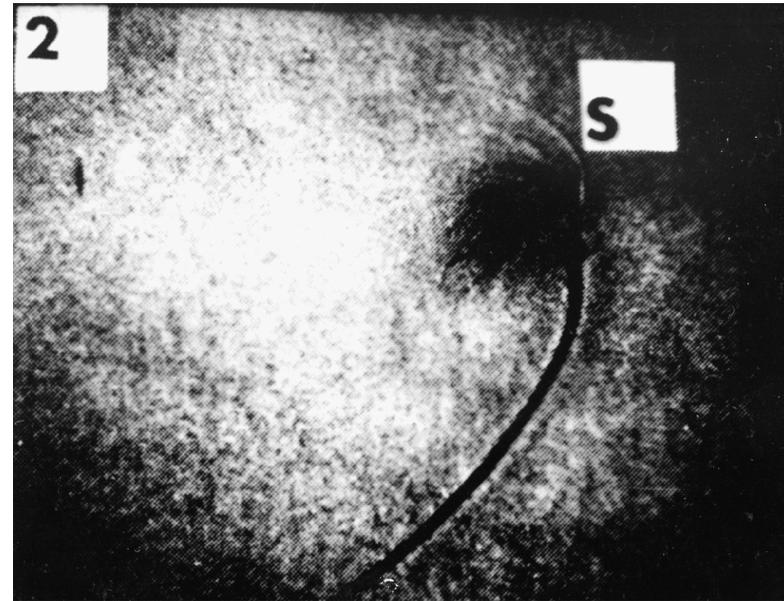
Kopfwelle vor Wiedereintrittsflugzeug Space Shuttle



Experiment: Peitschenknall



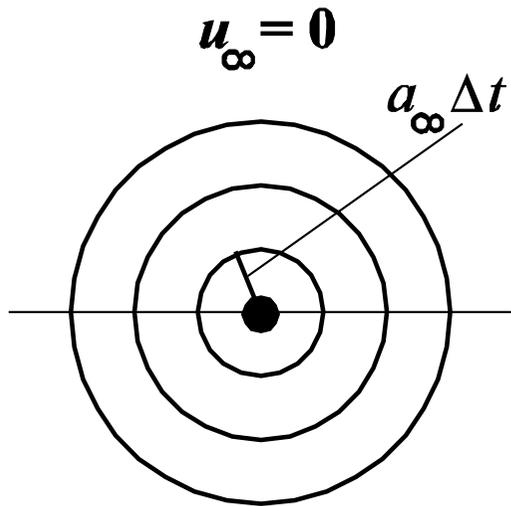
Peitschenknall



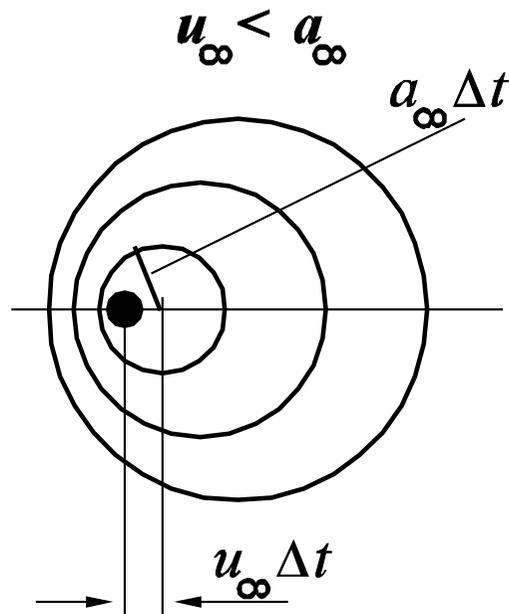
Experiment: Platzender Ballon



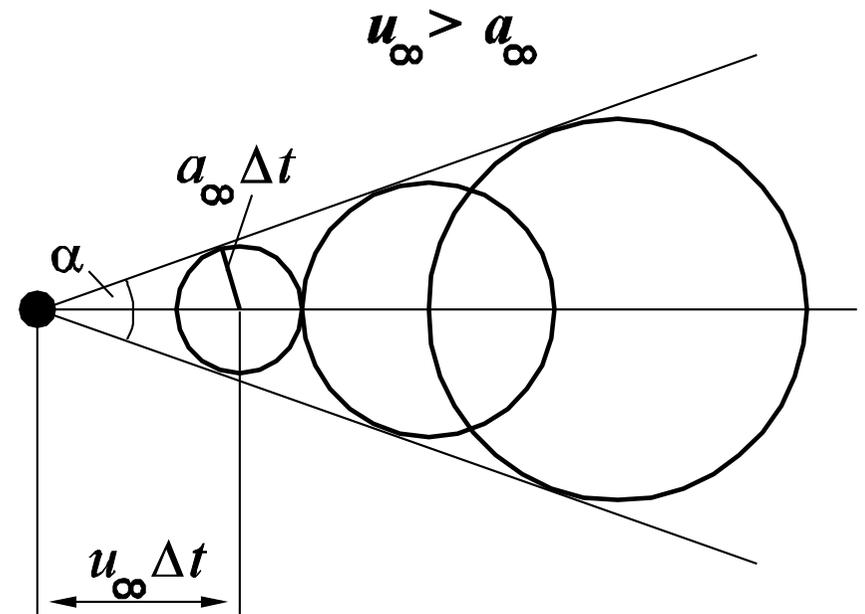
Wellenausbreitung einer Störquelle



ruhende Schallquelle



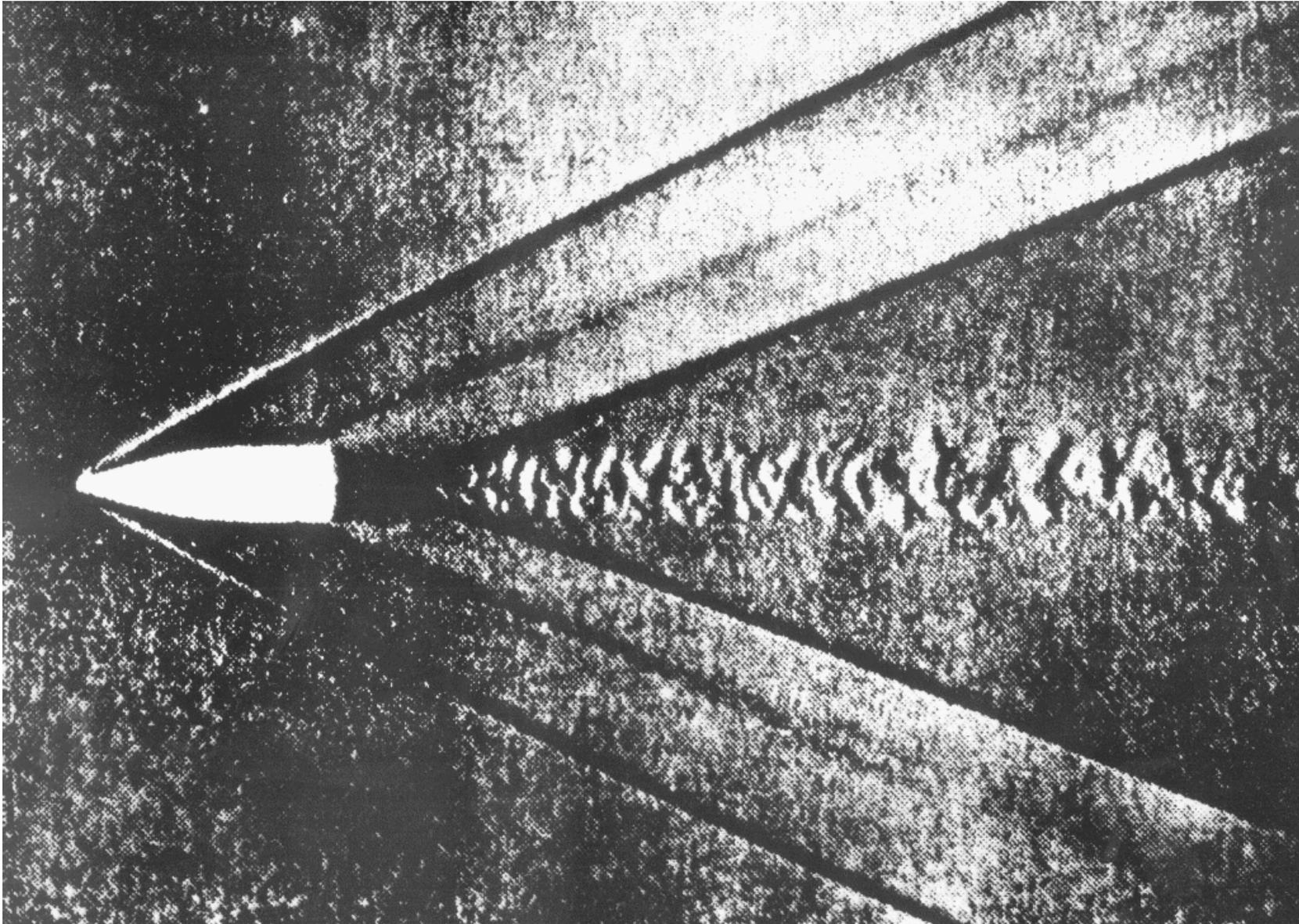
bewegte Schallquelle



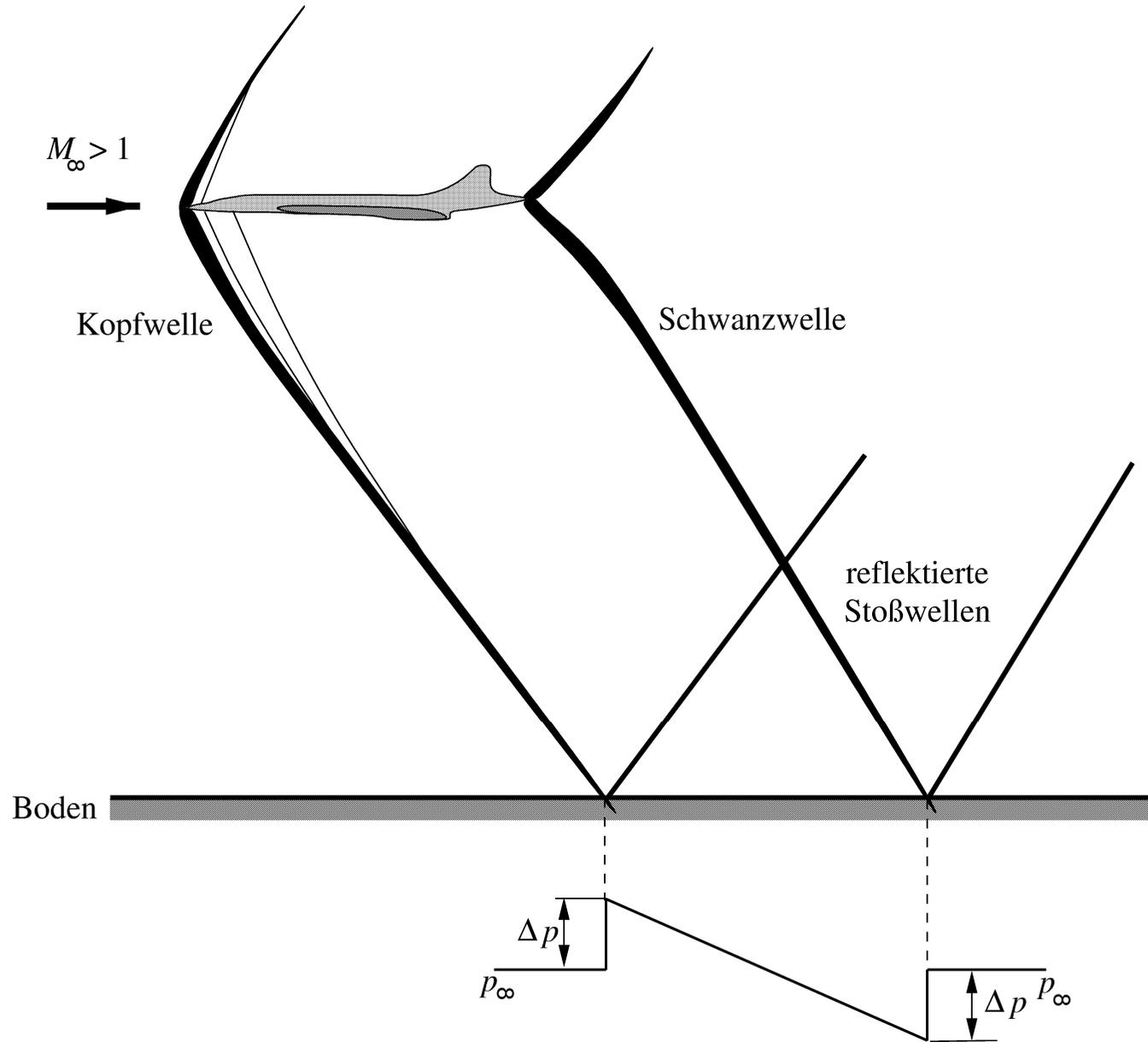
bewegte Schallquelle



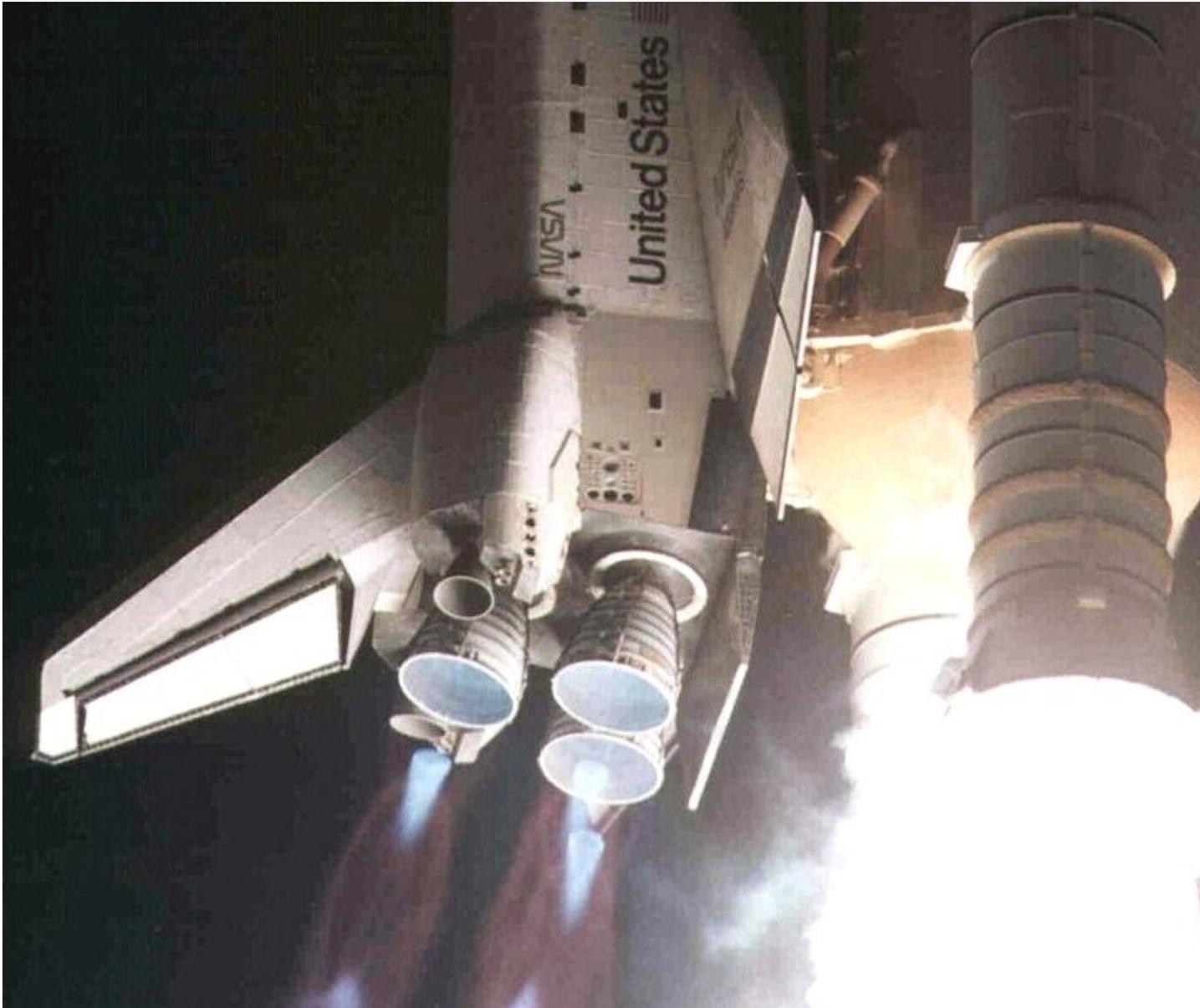
Geschoss bei Überschallgeschwindigkeit



Überschallflug und Druckverteilung am Boden



Space Shuttle Main Engine (SSME)

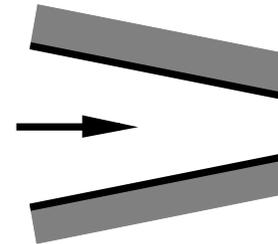


Film: Raketendüse

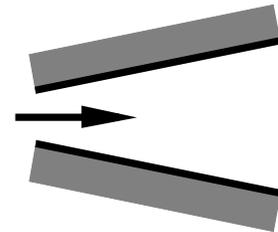


Laval-Düse

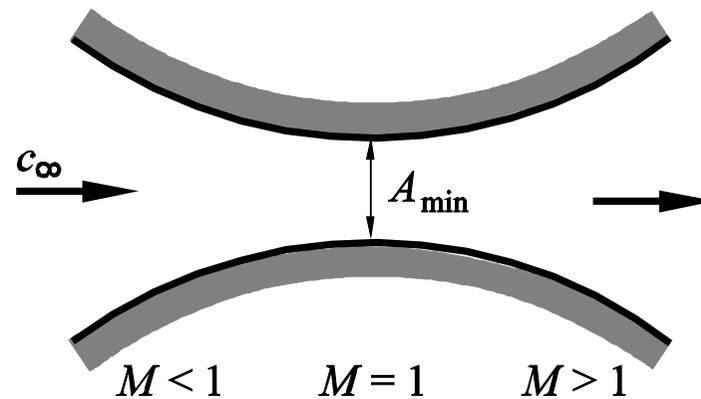
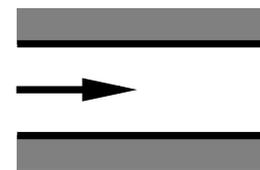
$$\frac{dc}{ds} > 0, M < 1$$
$$\rightarrow \frac{dA}{ds} < 0$$



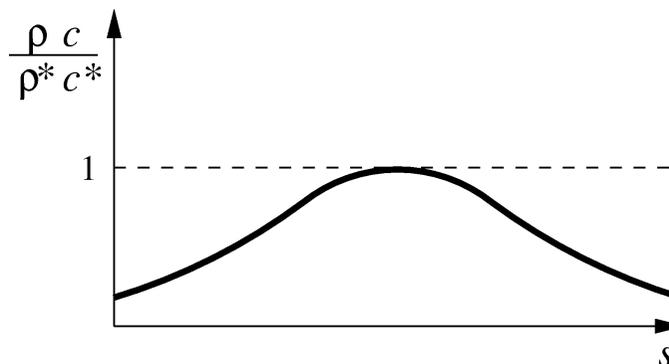
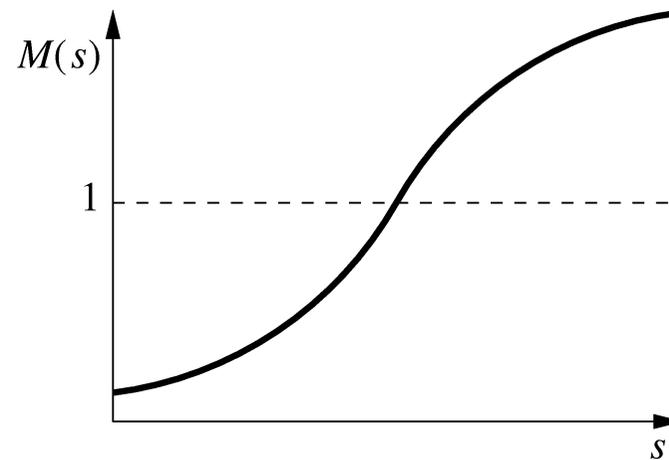
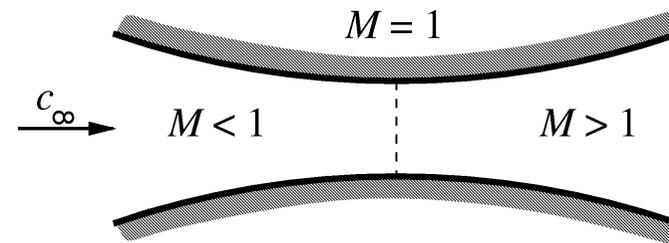
$$\frac{dc}{ds} > 0, M > 1$$
$$\rightarrow \frac{dA}{ds} > 0$$



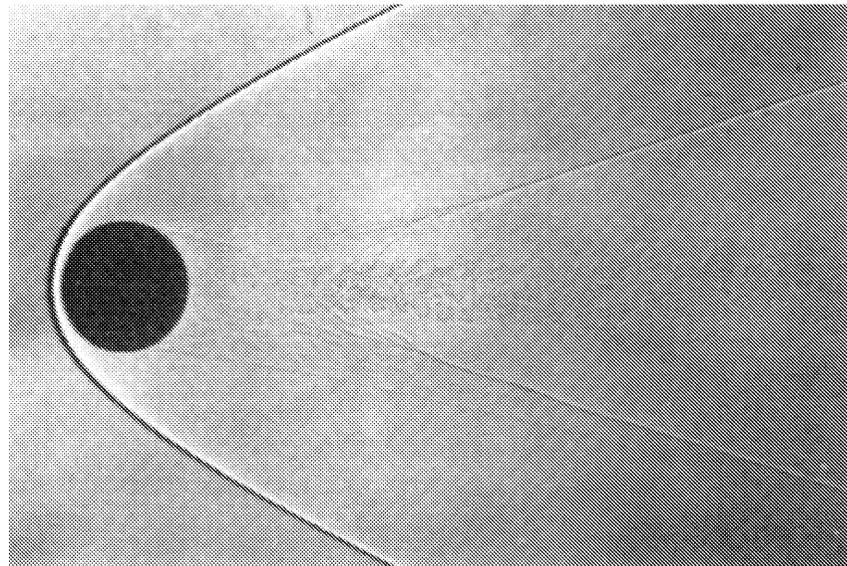
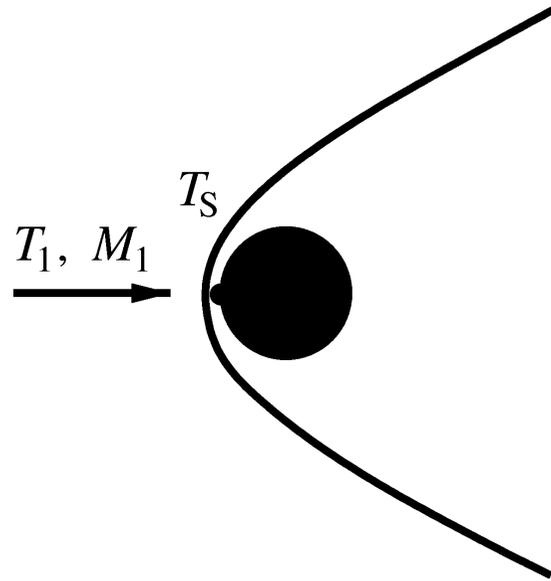
$$\frac{dc}{ds} \text{ nicht singulär, } M = 1$$
$$\rightarrow \frac{dA}{ds} = 0$$



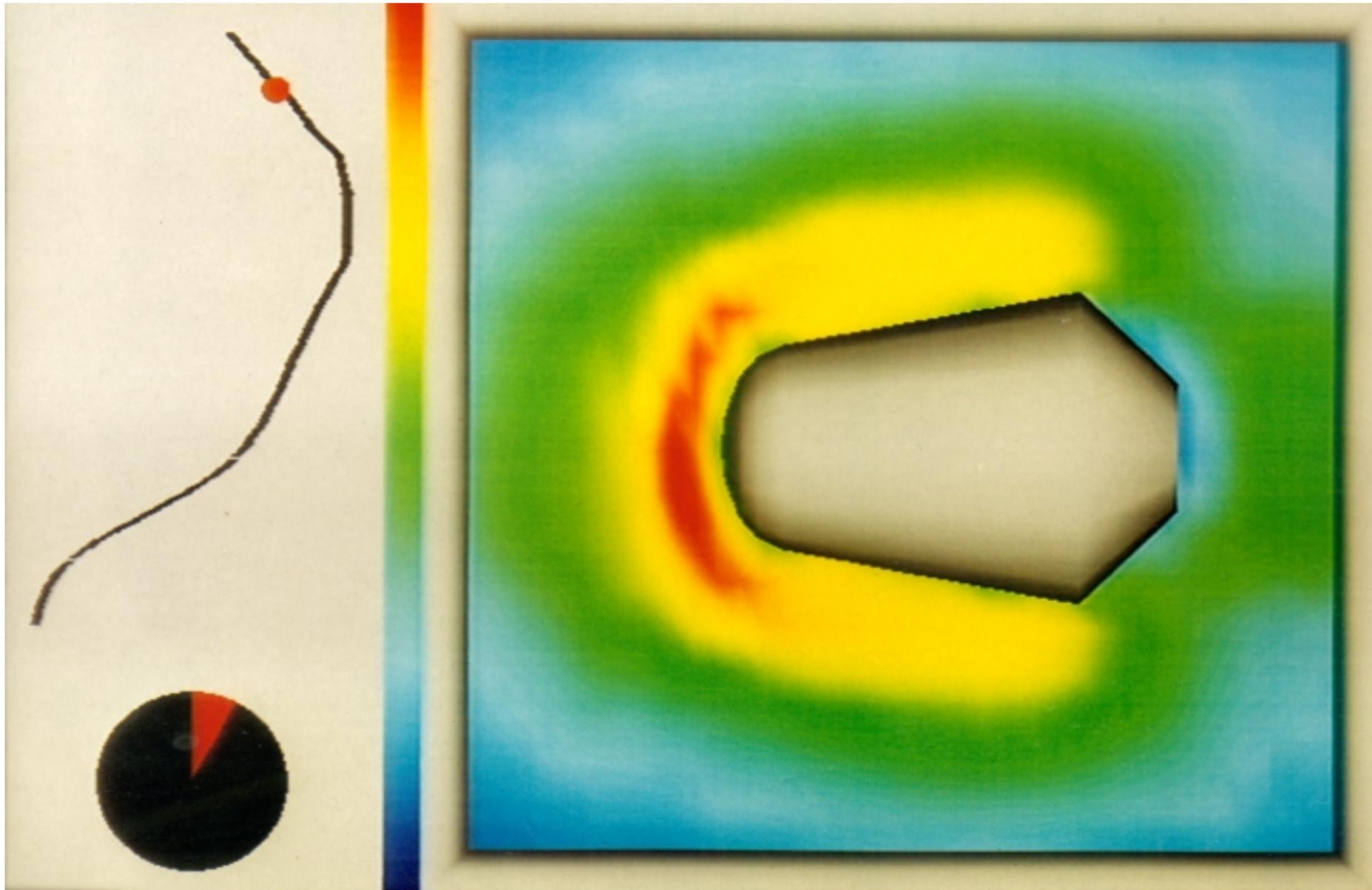
Verlauf der Mach-Zahl und der Massenströmdichte in der Laval-Düse



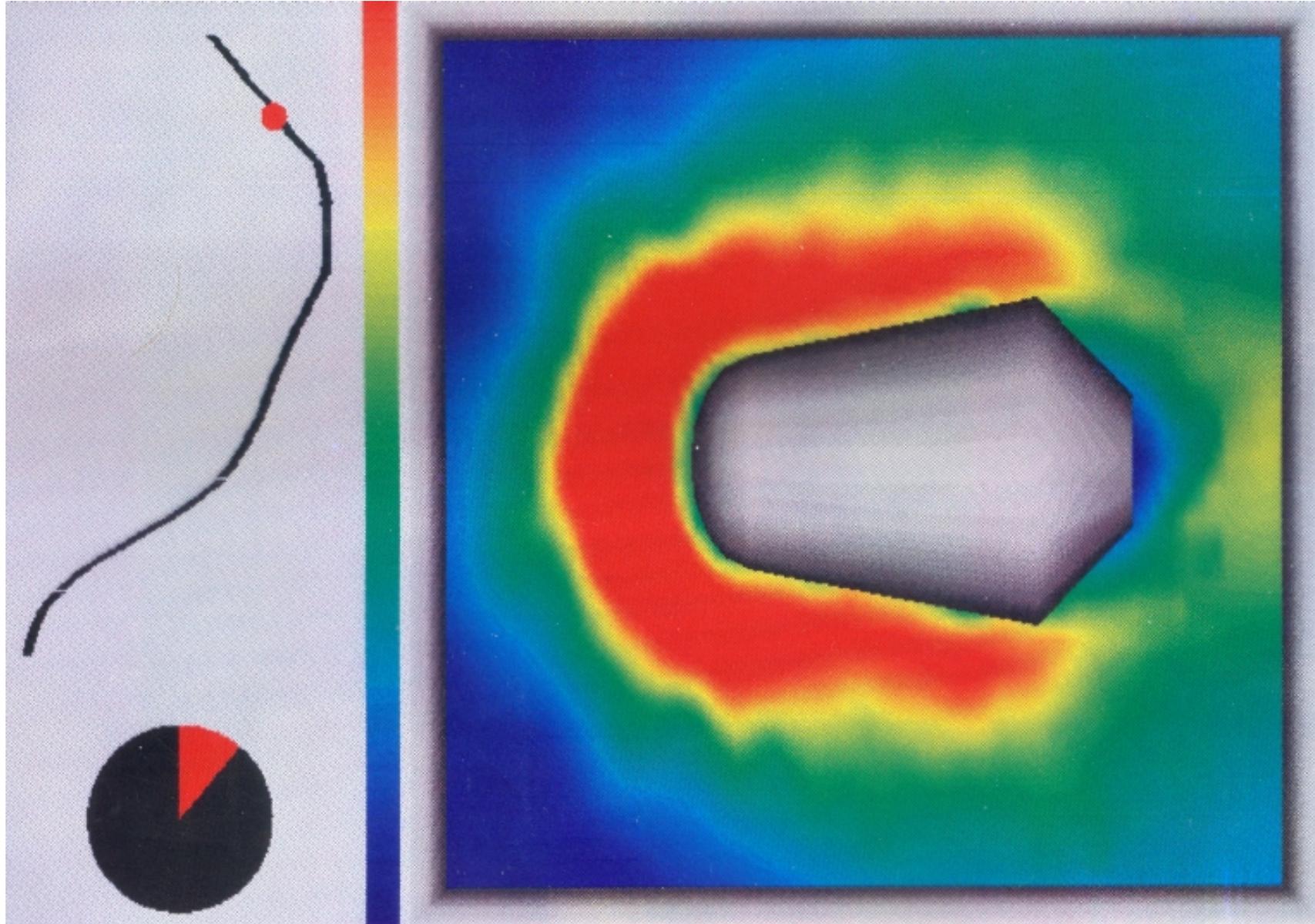
Kugelpopfwele



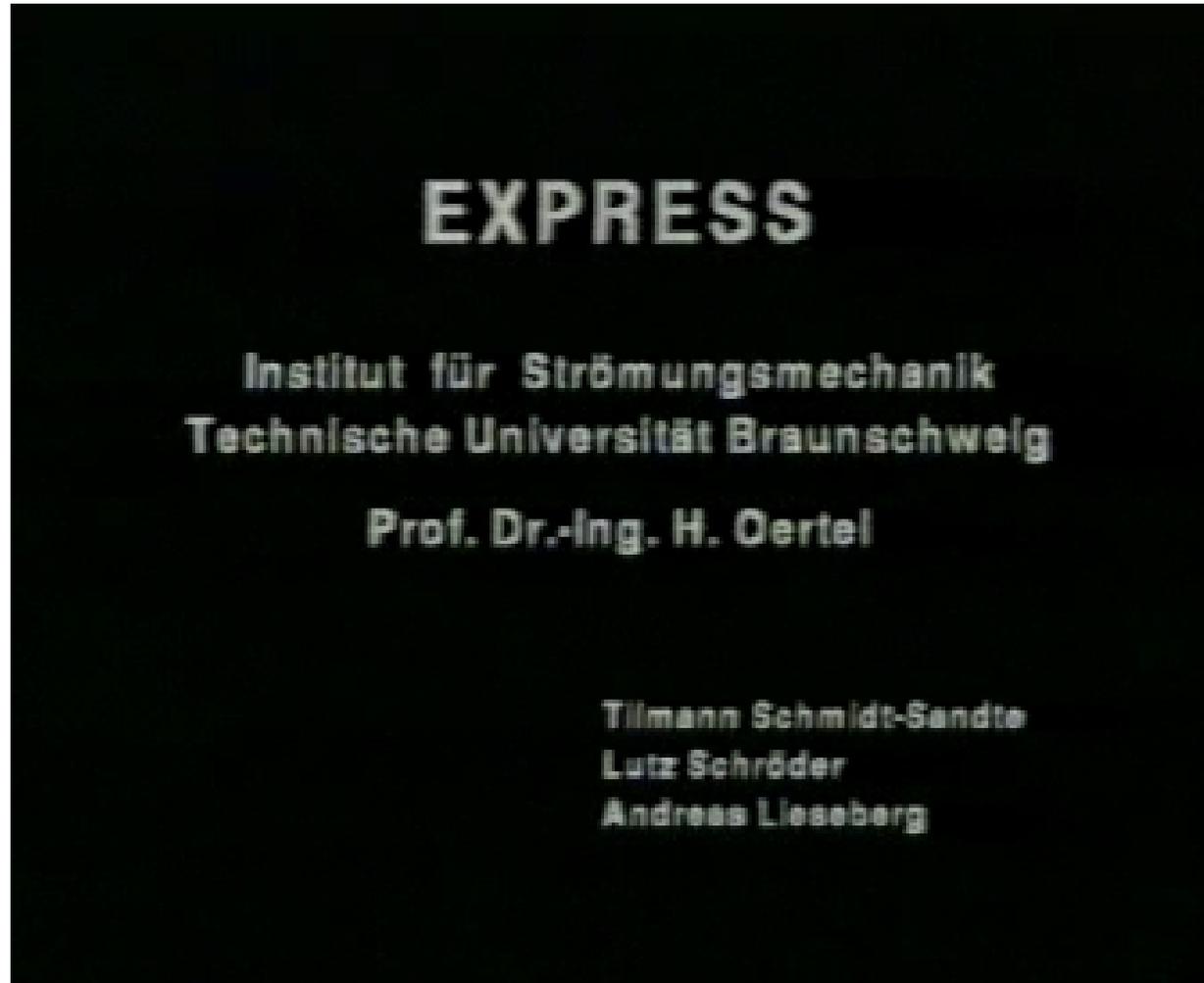
Numerische Simulation Raumkapsel auf Wiedereintrittstrajektorie 1



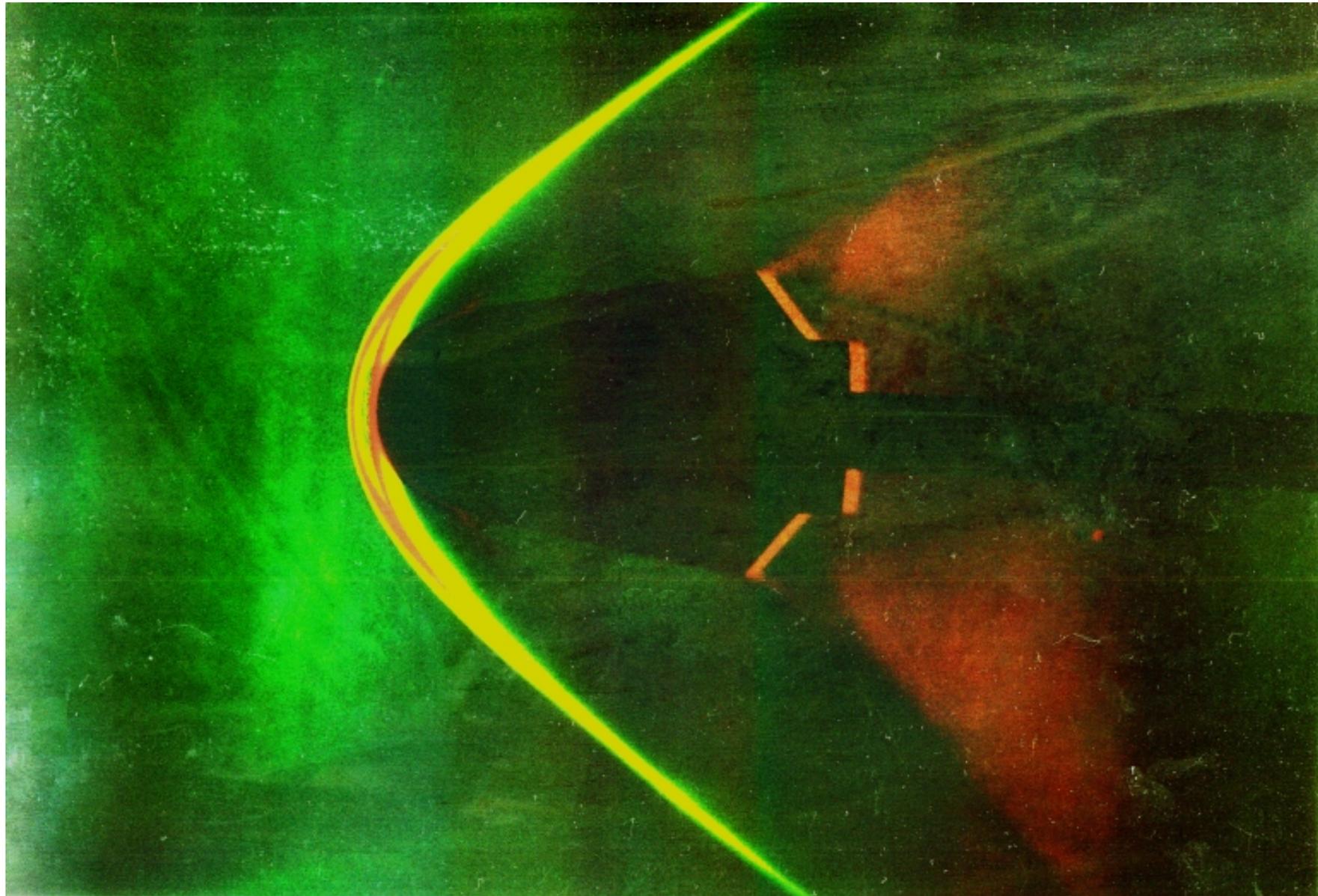
Numerische Simulation Raumkapsel auf Wiedereintrittstrajektorie 2



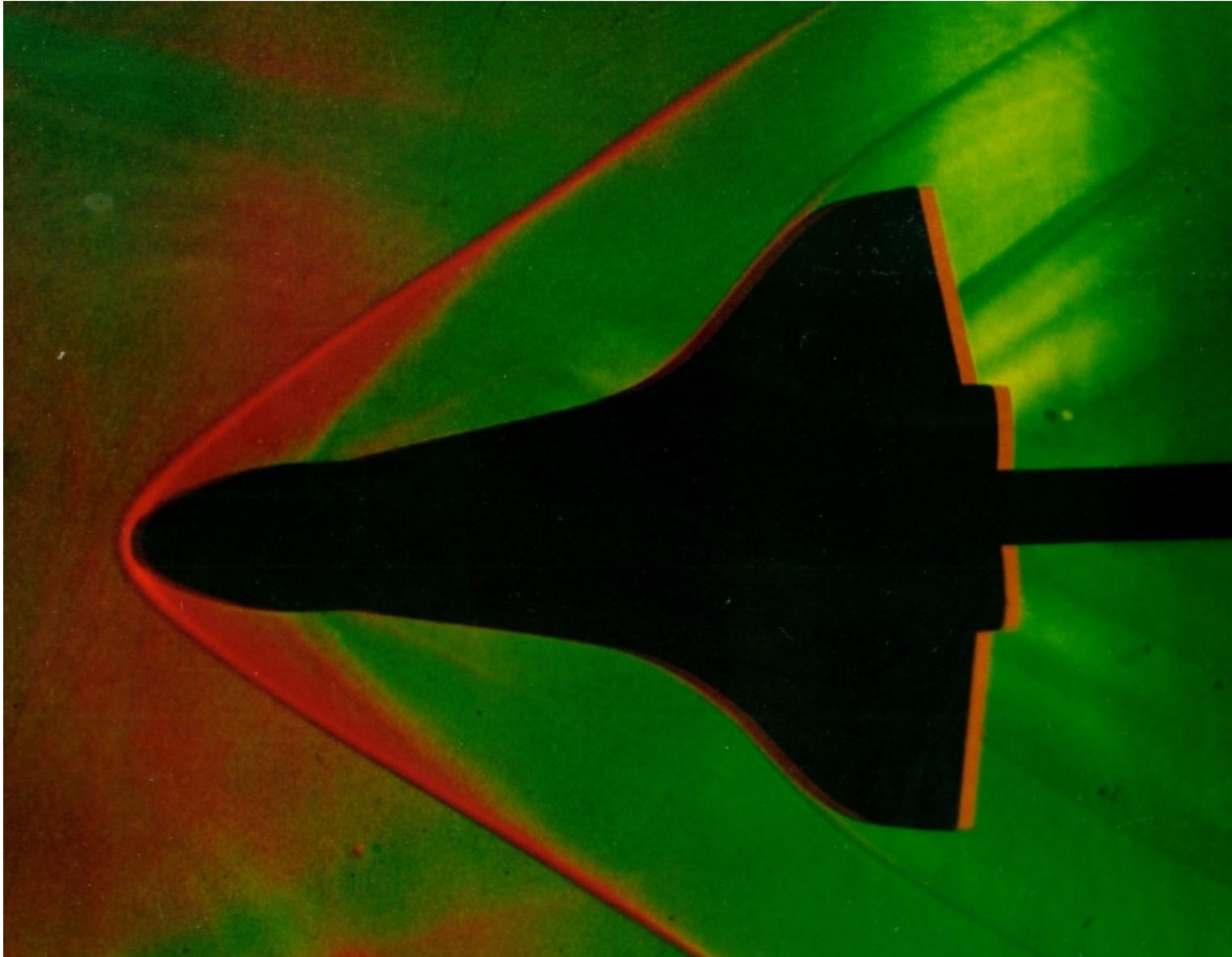
Film: Numerische Simulation der Umströmung einer Wiedereintrittskapsel



Wiedereintrittskapsel im Windkanal



Kopfwellen vor dem Wiedereintrittsflugzeug Space Shuttle, $M_1 = 3$



Turbulente Strömungen

Experiment: Farbfaden im Wasserkanal, laminar, transitionell, turbulent

Film: Farbfaden in laminarer Rohrströmung

Film: Farbfaden in transitioneller Rohrströmung

Film: Farbfaden in turbulenter Rohrströmung

Reynolds-Experiment, laminare und turbulente Rohrströmung

Geschwindigkeitsprofile laminar, turbulent

Transitionsvorgang

Film: Transitionsvorgang am längsangeströmten Zylinder

Film: Computersimulation des Transitionsvorgangs

Reynolds-Ansatz

Prandtlischer Mischungswegansatz

Bereichseinteilung turbulente Grenzschichtströmung

Turbulentes Grenzschichtprofil

Film: Computersimulation Scherrate in viskoser Unterschicht

Haifisch-Schuppen

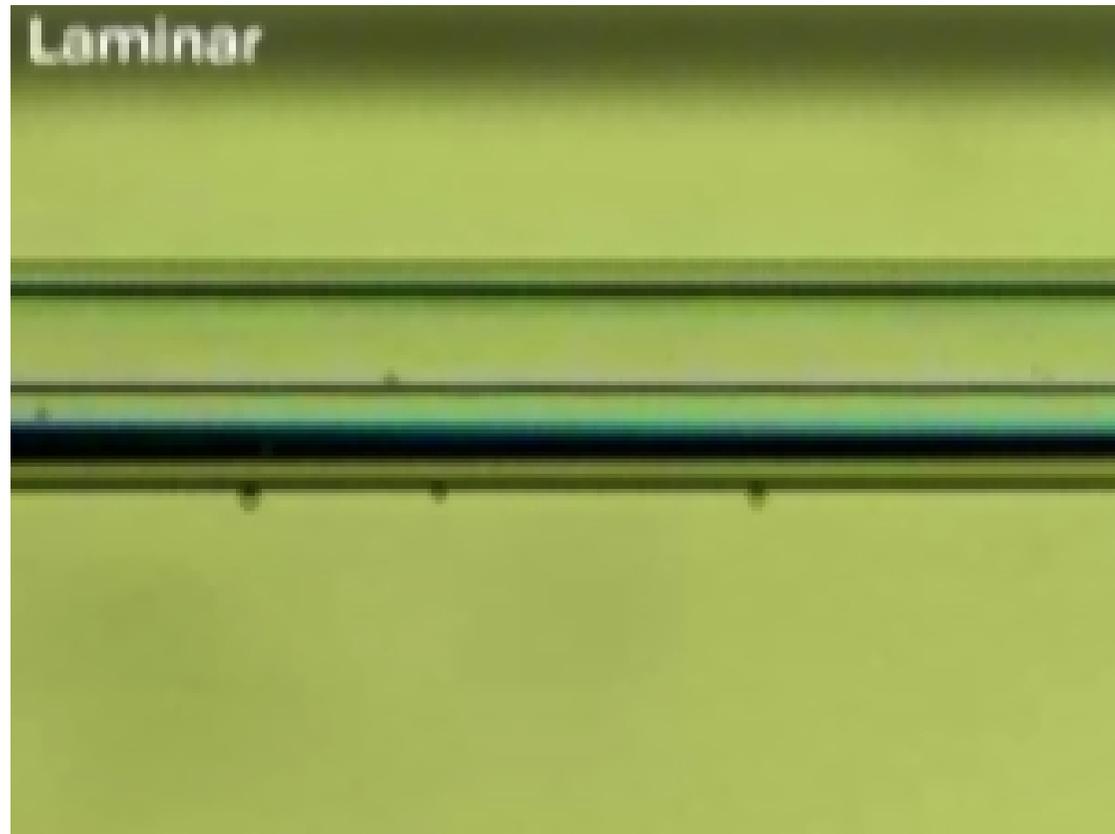
Haifisch-Schuppen und Riblet-Folie



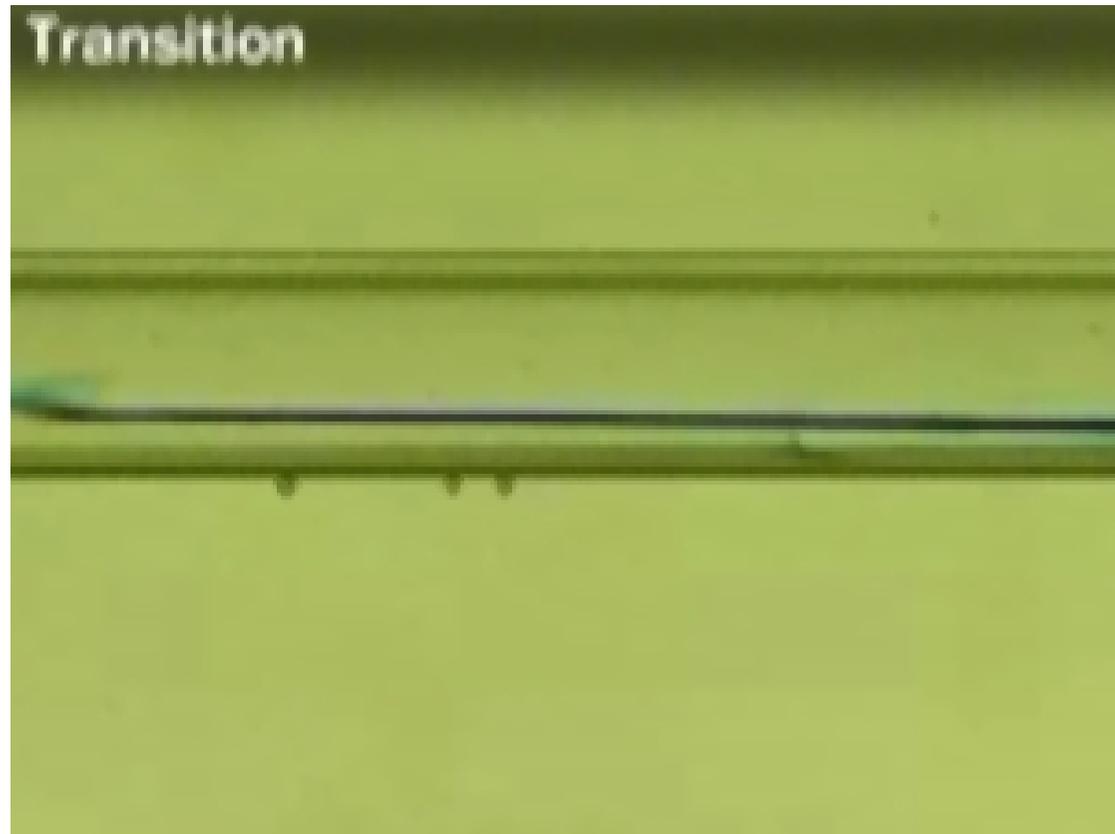
Experiment: Farbfaden im Wasserkanal, laminar, transitionell und turbulent



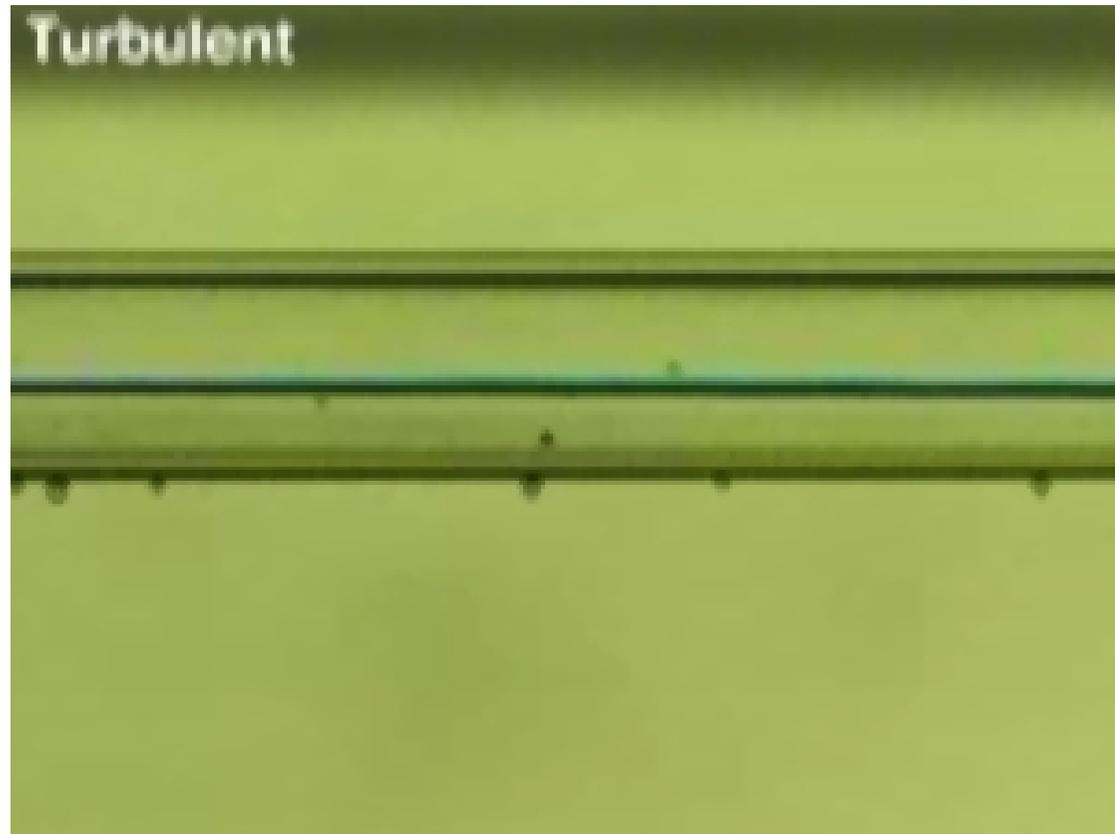
Film: Farbfaden in laminarer Rohrströmung



Film: Farbfaden in transitioneller Rohrströmung



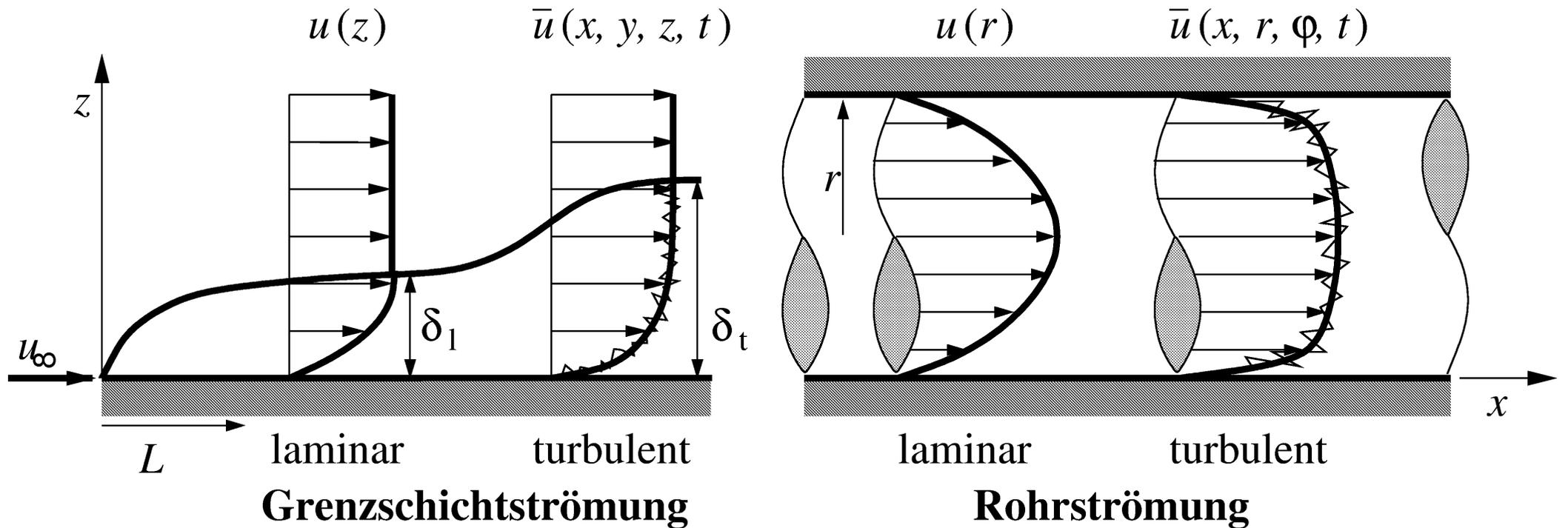
Film: Farbfaden in turbulenter Rohrströmung



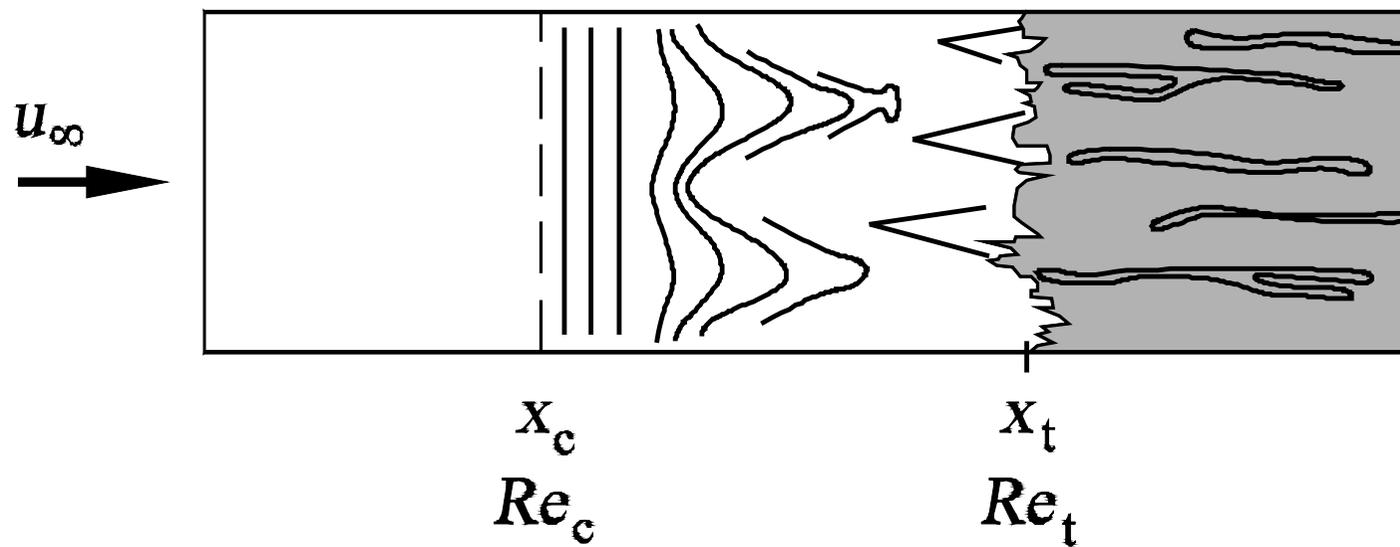
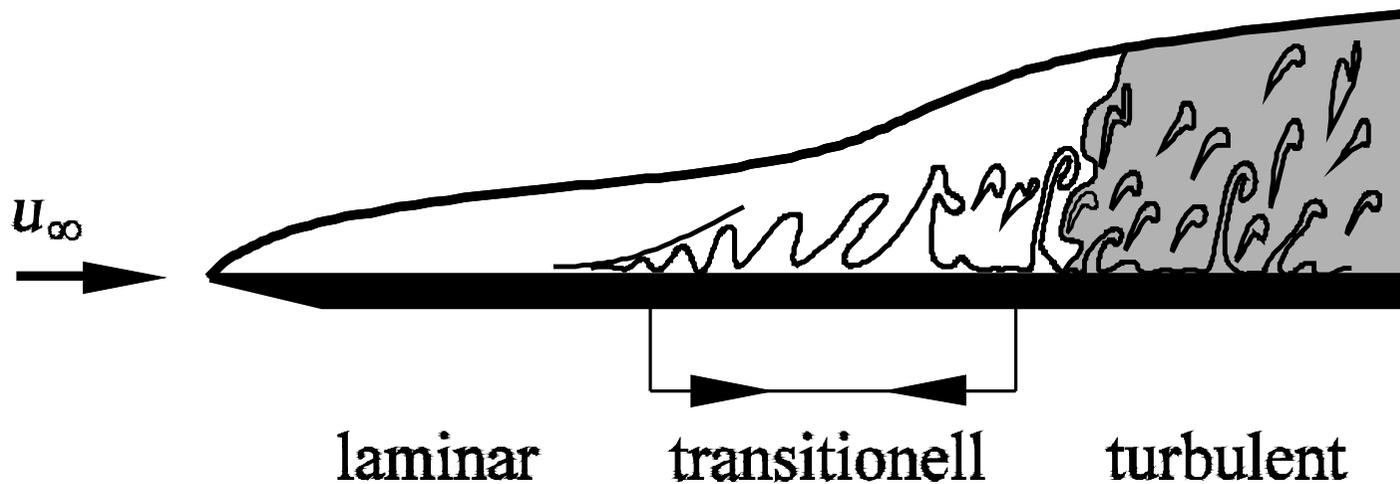
Reynolds-Experiment: laminare und turbulente Rohrströmung, 1883



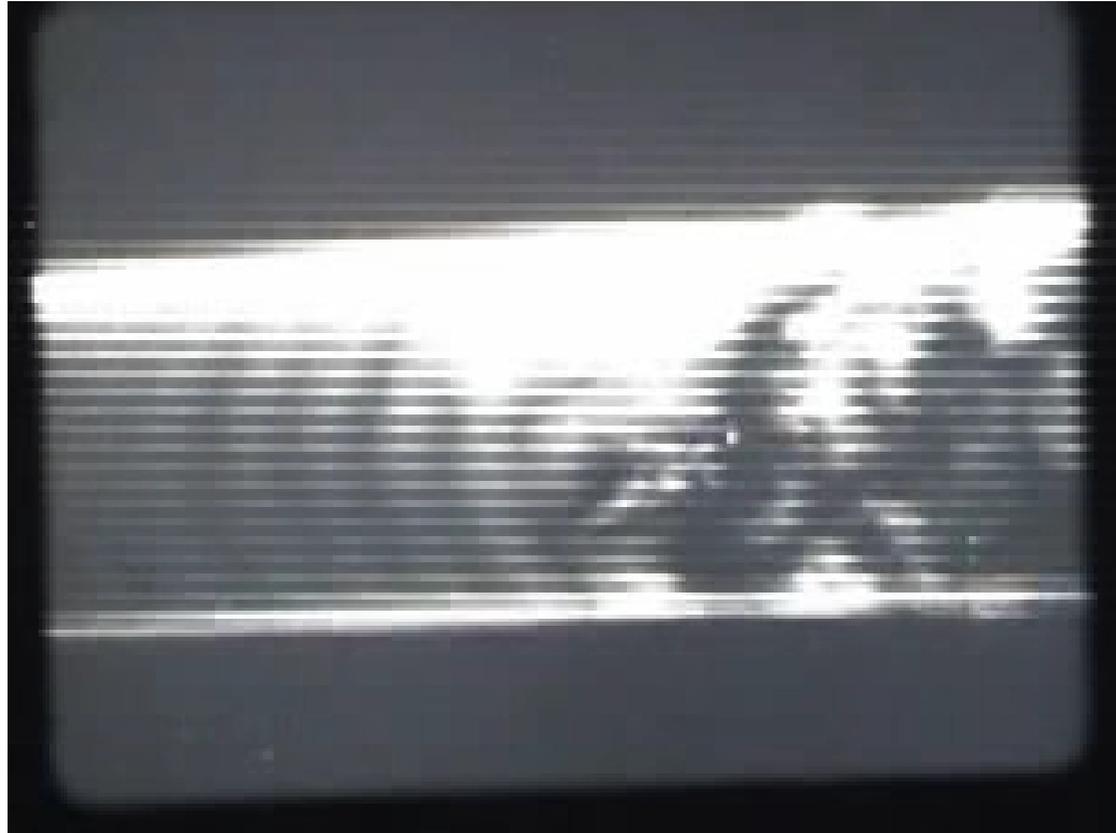
Laminare und turbulente Geschwindigkeitsprofile



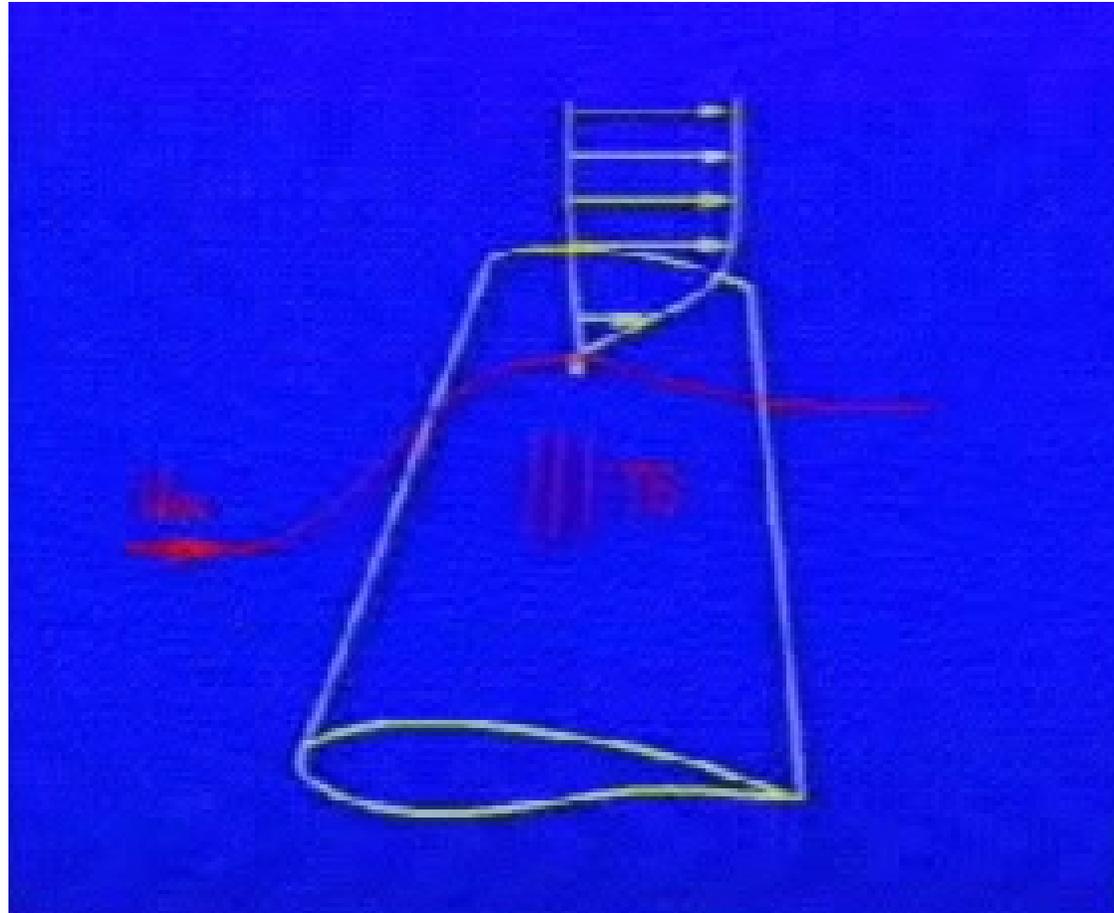
Transitionsvorgang



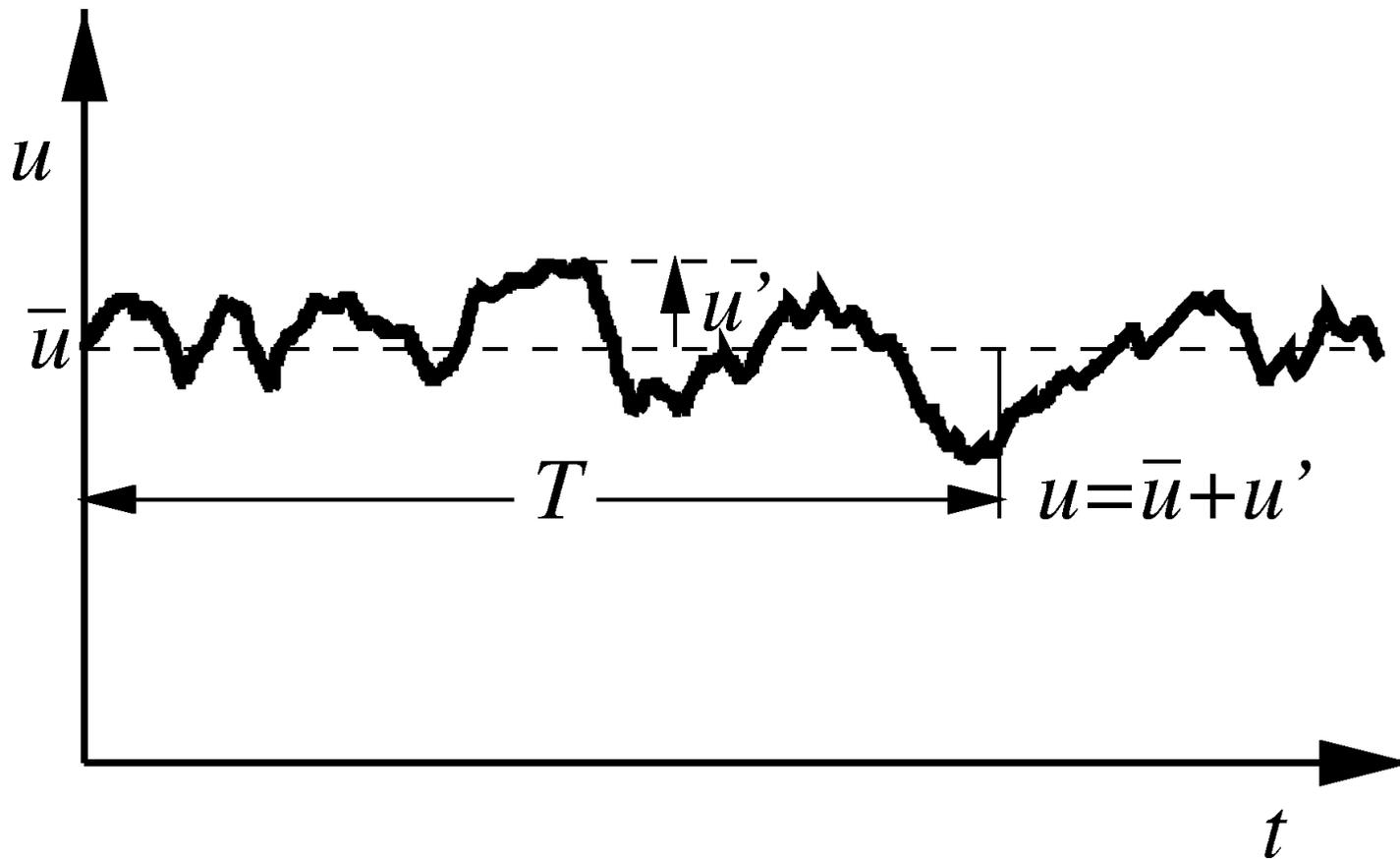
Film: Transitionsvorgang am längsangeströmten Zylinder



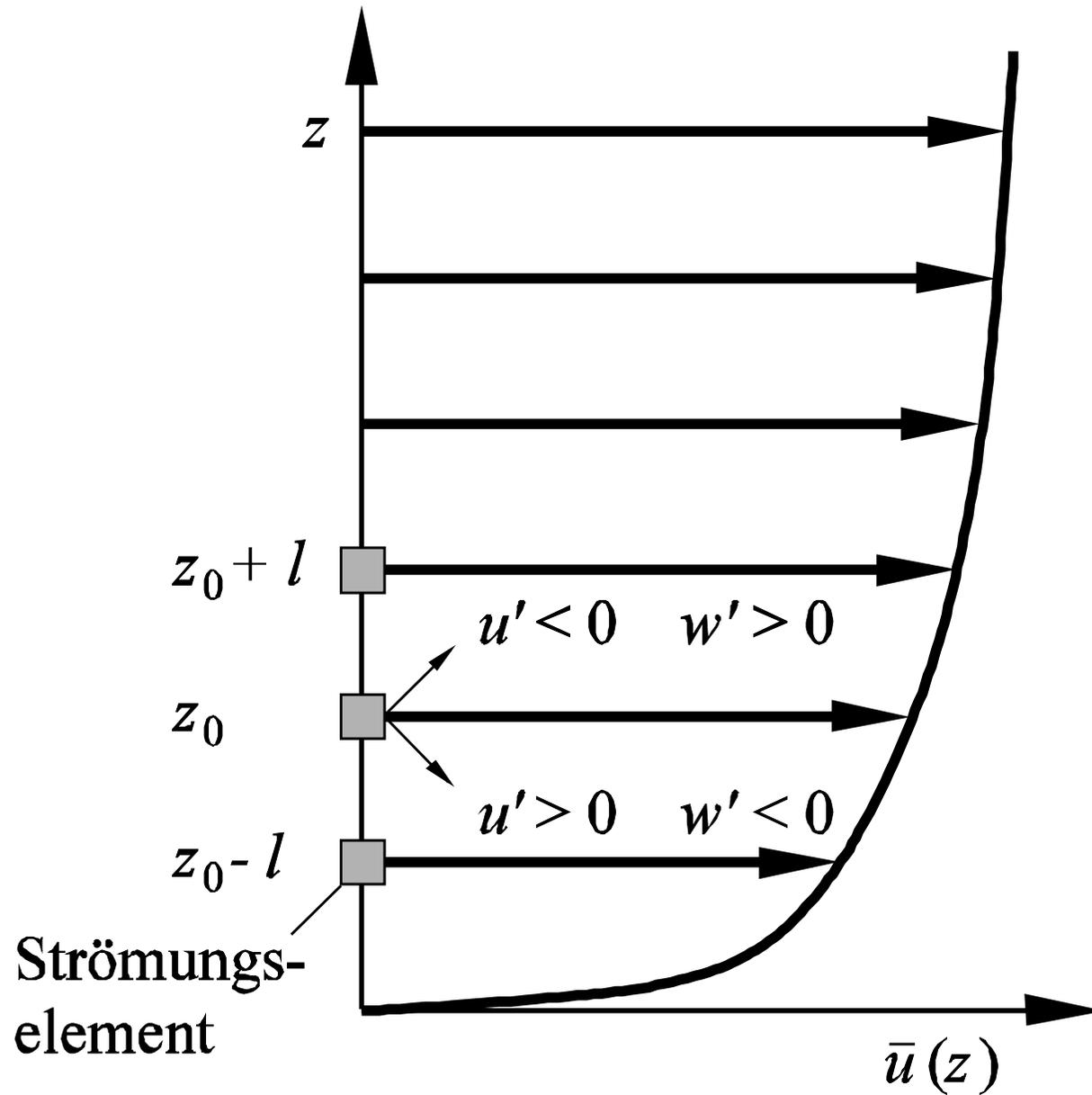
Film: Computersimulation des Transitionsvorgangs



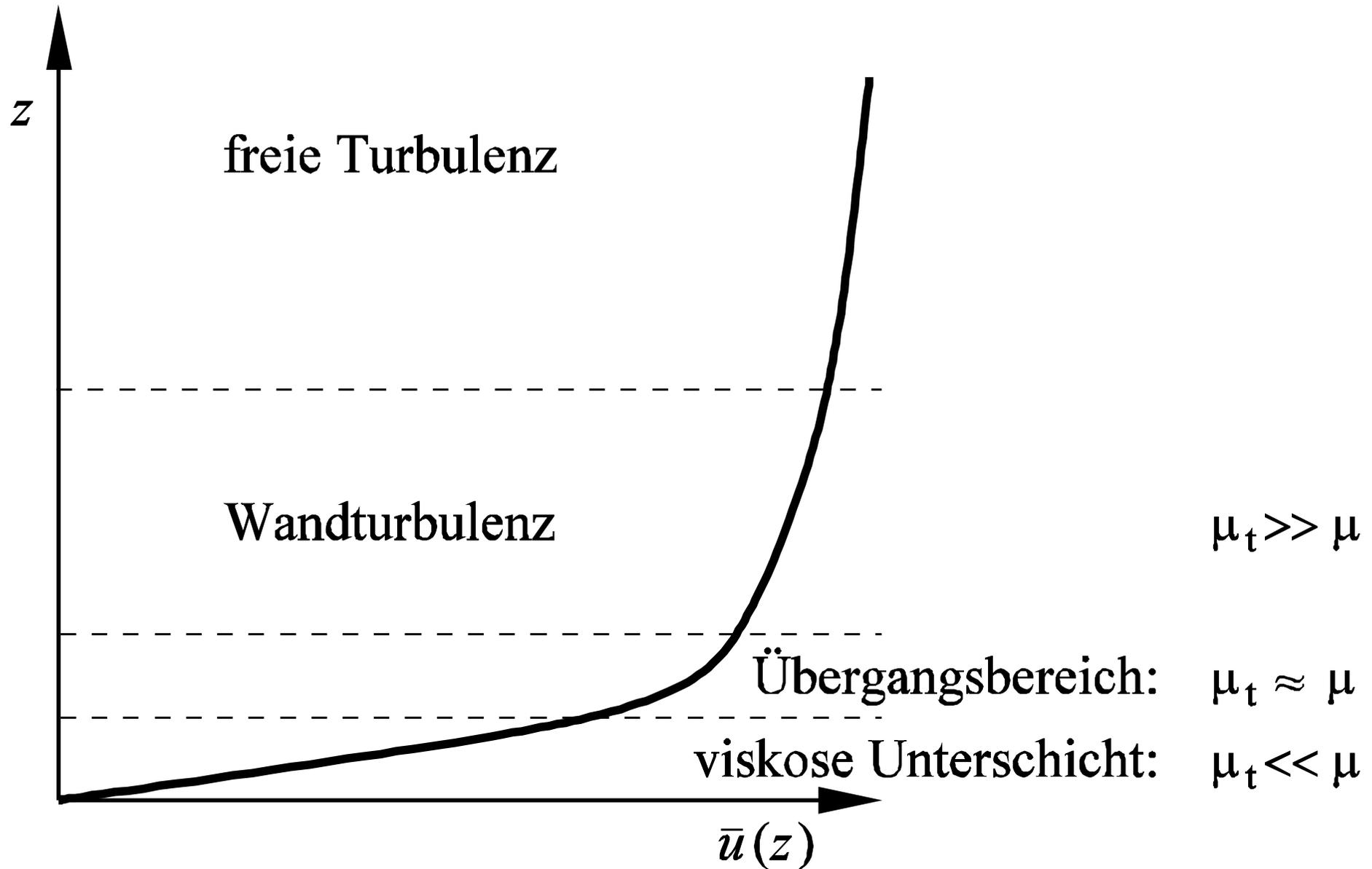
Reynolds-Ansatz für die u -Komponente der Geschwindigkeit



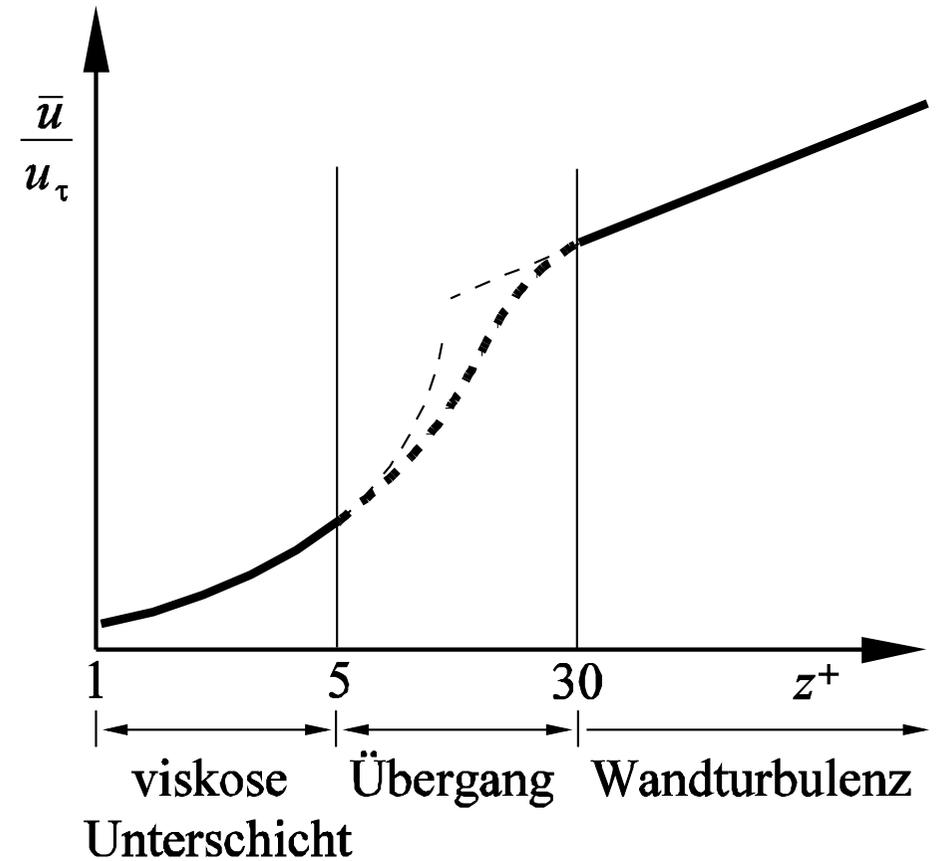
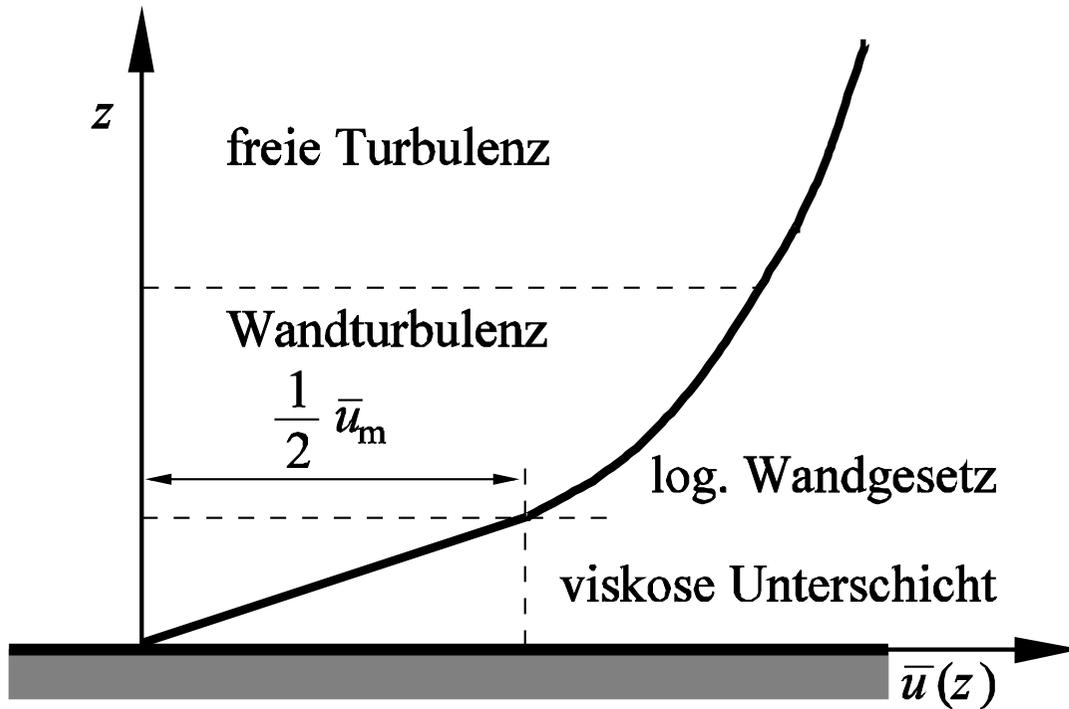
Prinzipskizze zum Prandtl'schen Mischungswegansatz



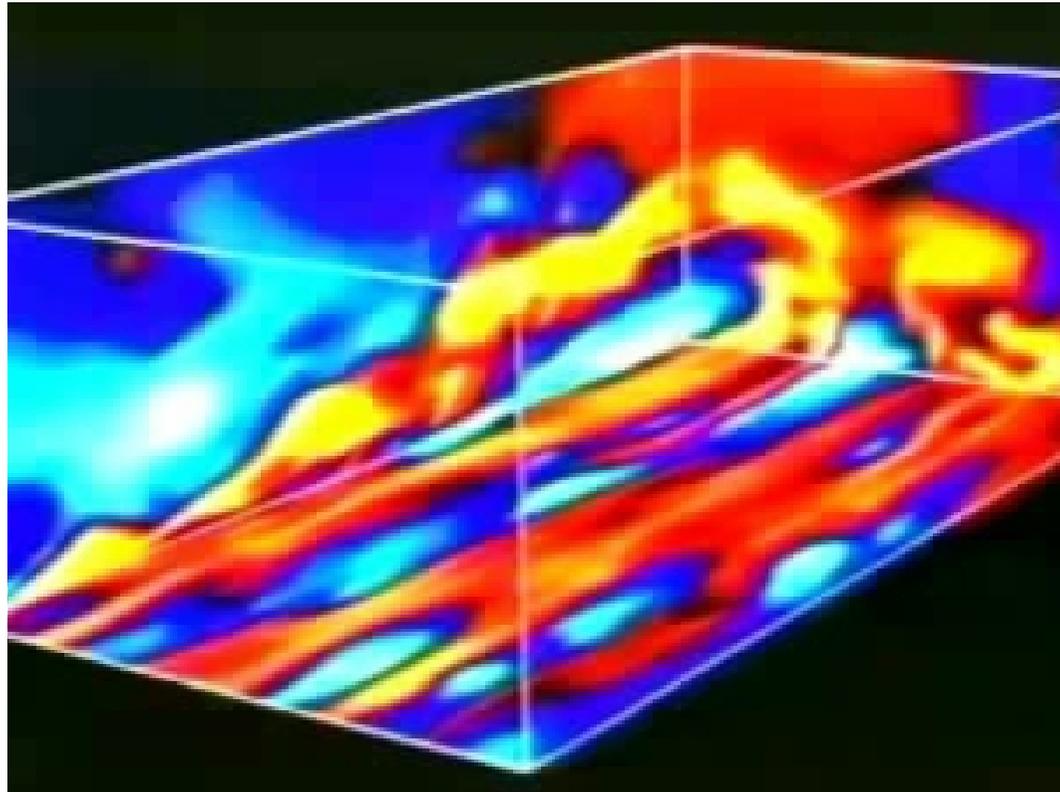
Bereichseinteilung der turbulenten Grenzschicht



Turbulentes Grenzschichtprofil



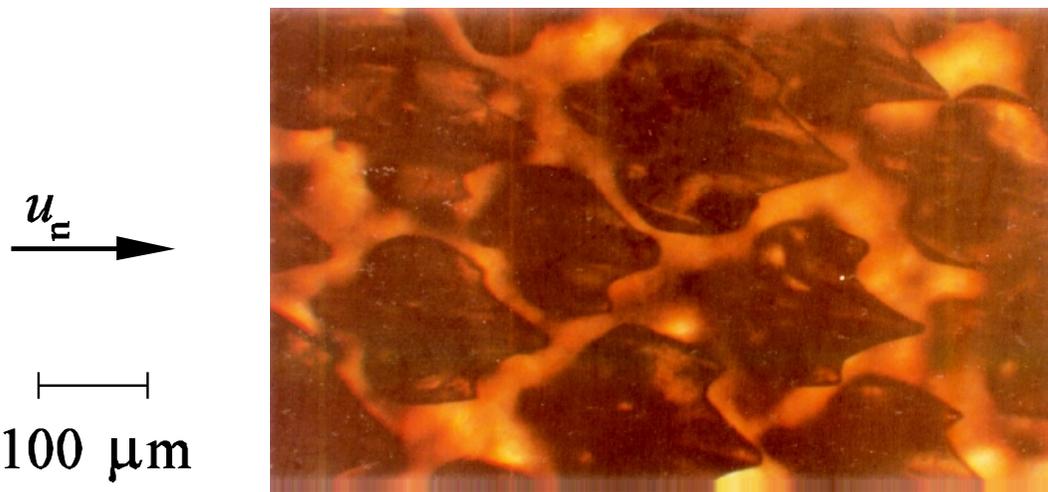
Film: Computersimulation der Scherrate in viskoser Unterschicht



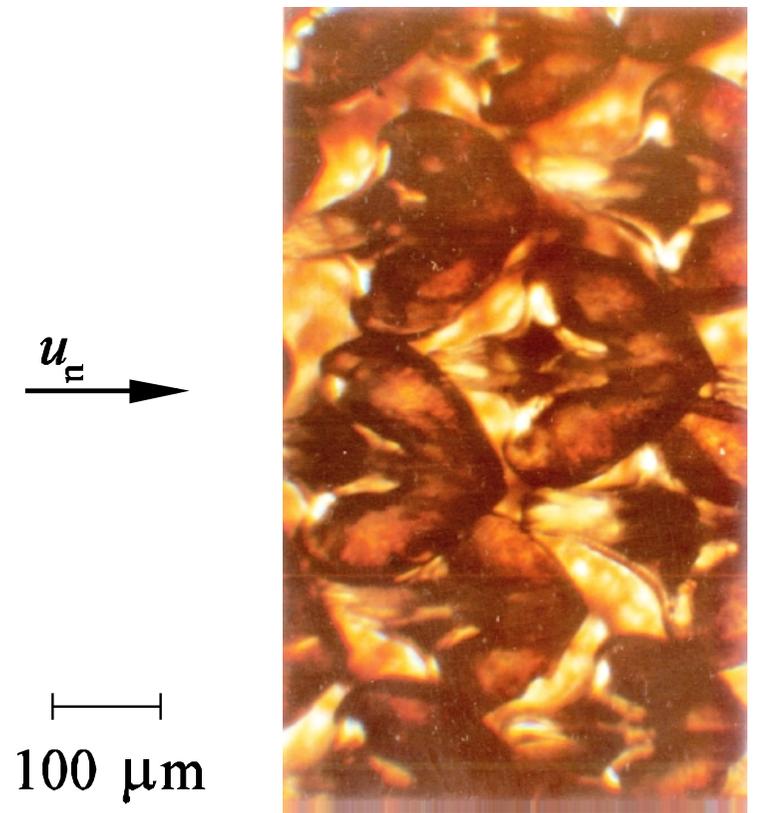
Haifisch-Schuppen



Bauch



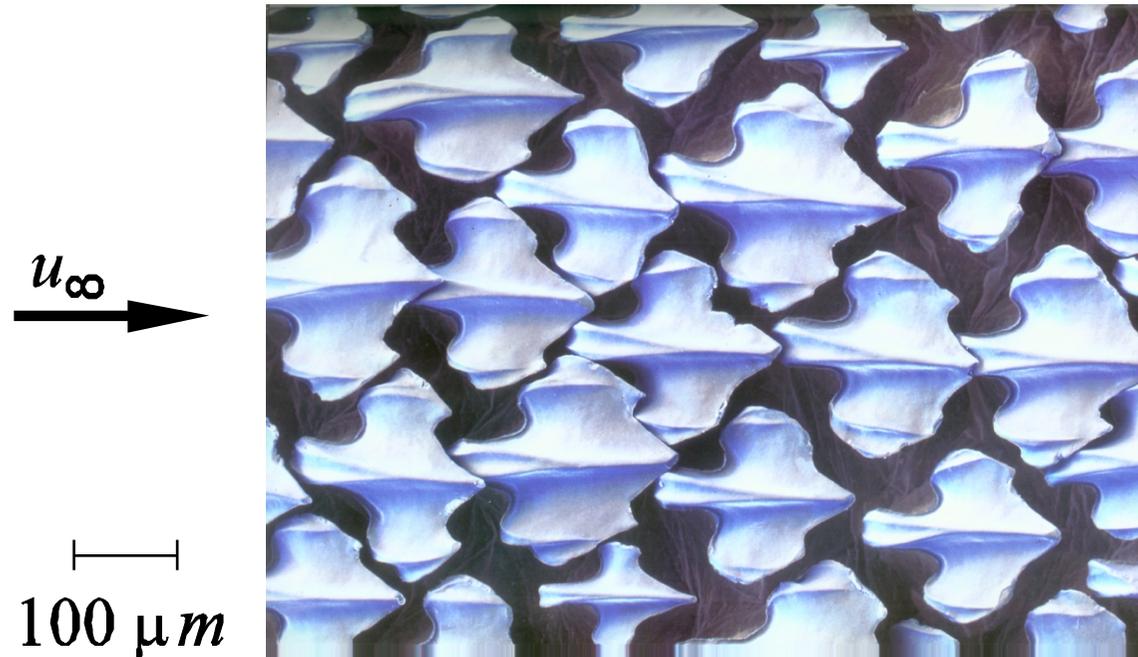
Bauch (ebene Ansicht)



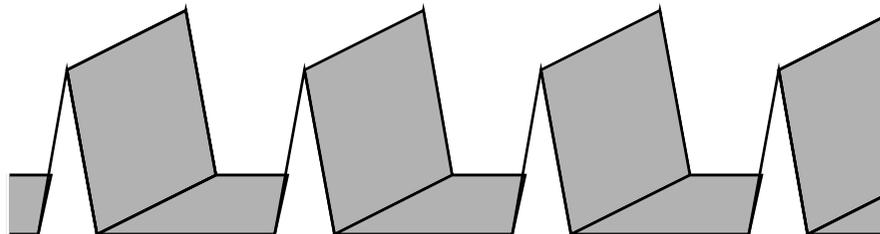
Kopf (ebene Ansicht)



Haifisch-Schuppen und Riblet-Folie



Haifisch-Schuppen



Riblet-Folie



Impulssatz

Kräfte am Kontrollvolumen, Profilmströmung

Kräfte am Kontrollvolumen, laminare Grenzschicht

Impulssatz - Kontrollvolumen

Kräftegleichgewicht

Kräftegleichgewicht A

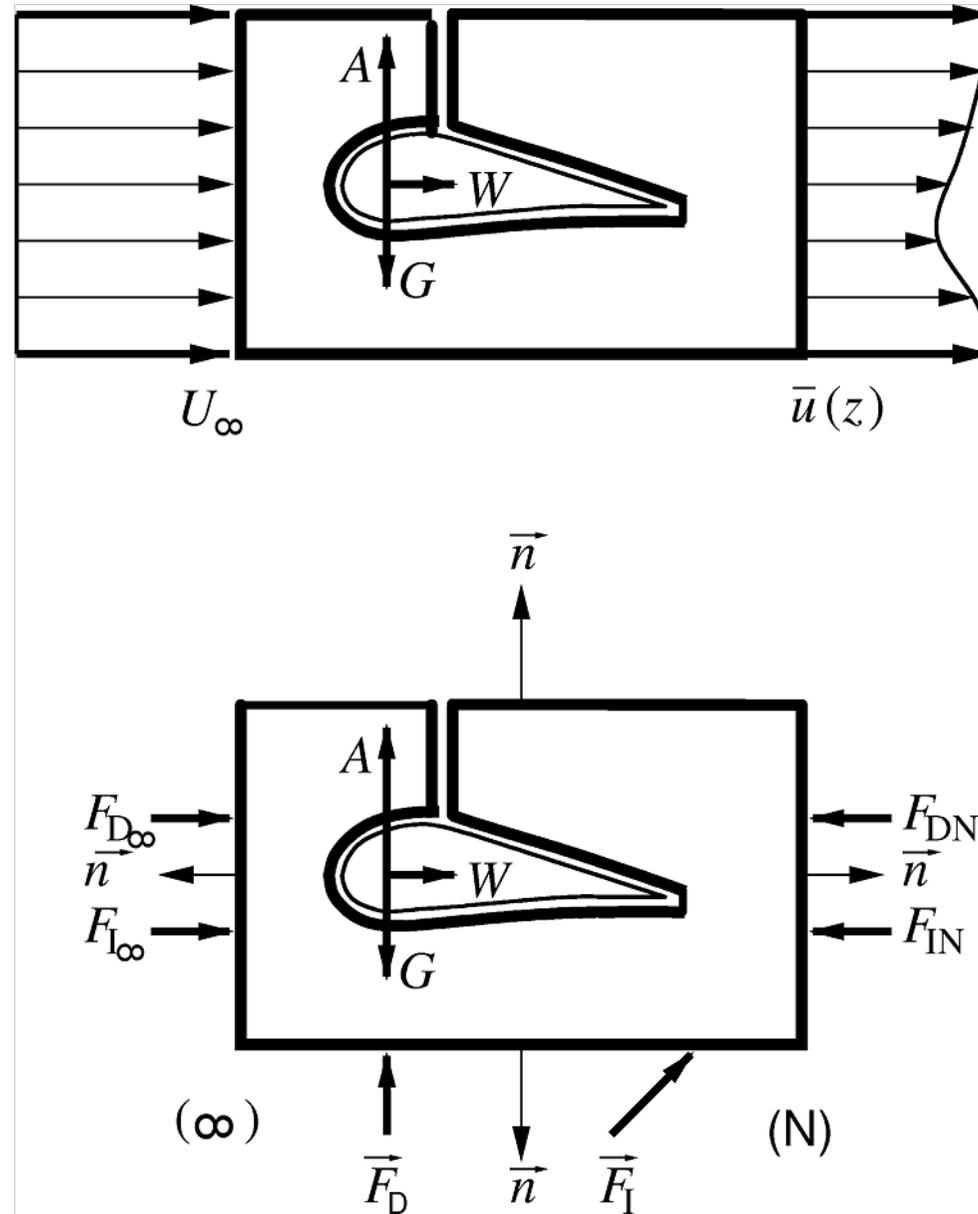
Kräftegleichgewicht B

Integration c_p -Verteilung

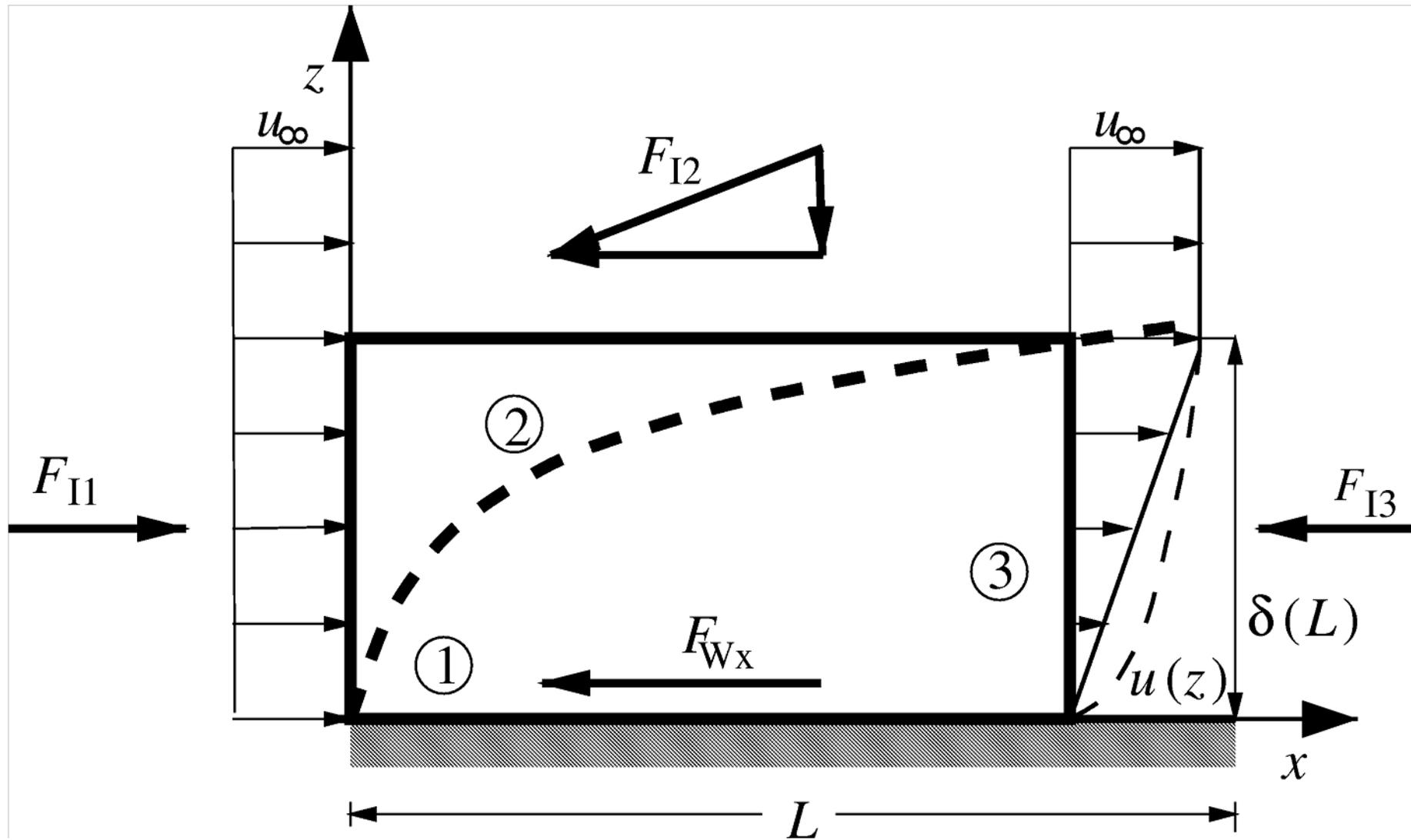
Integration τ_w -Verteilung



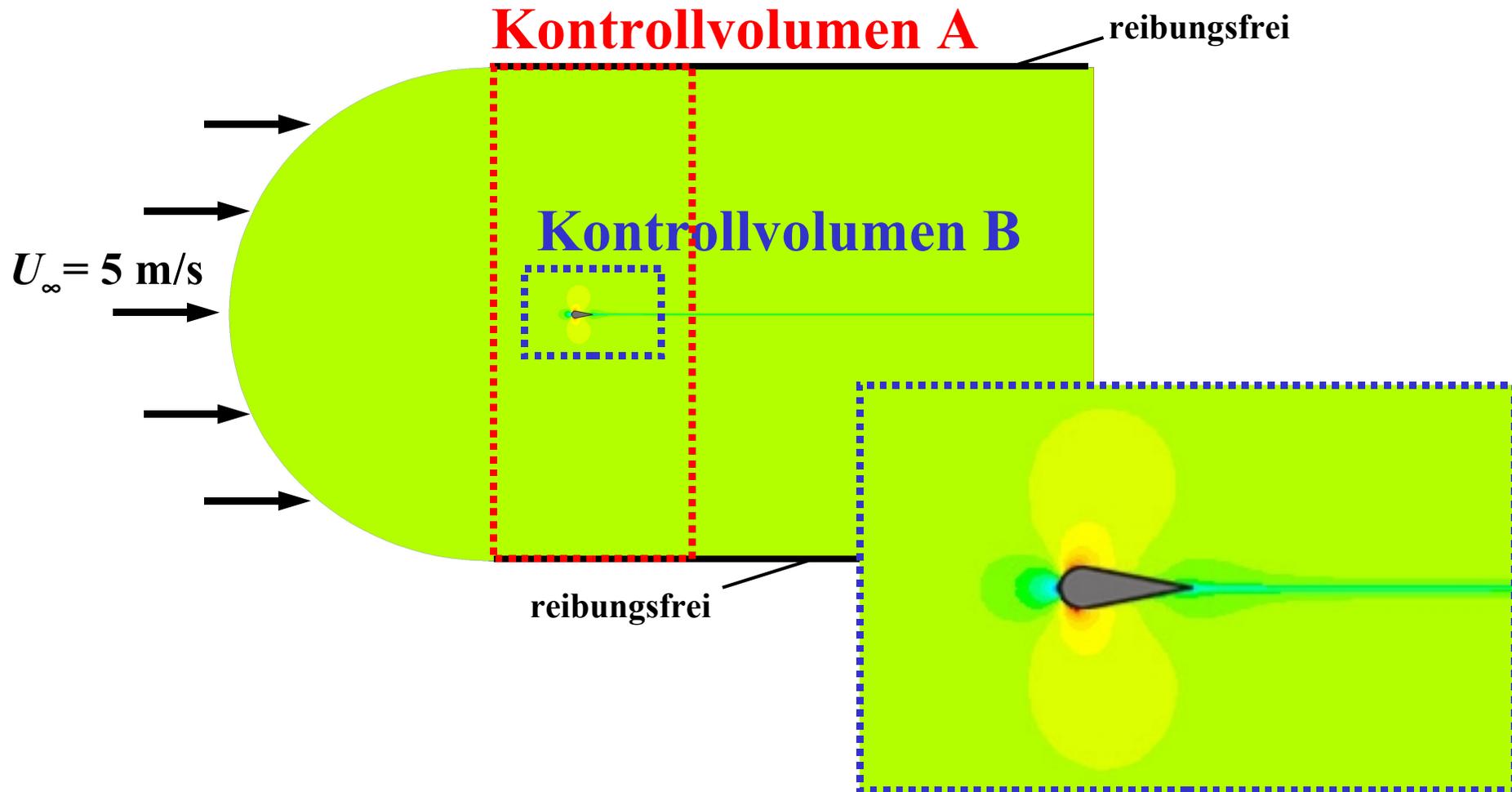
Kräfte am Kontrollvolumen V für die Profilmströmung



Kräfte am Kontrollvolumen V für die laminare Plattengrenzschicht

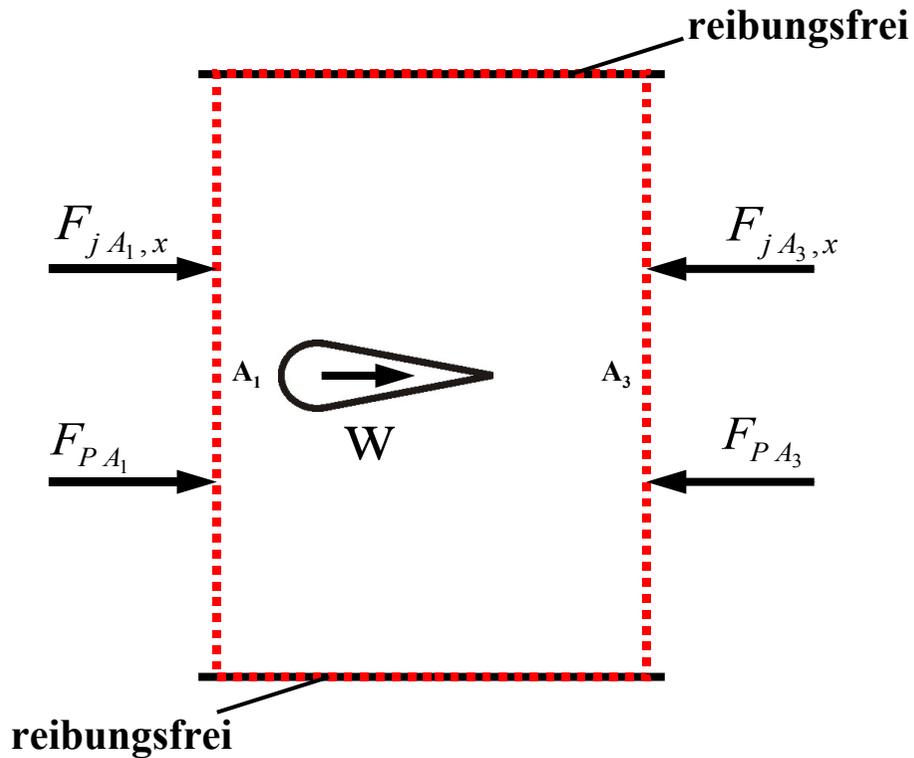


Impulssatz - Kontrollvolumen



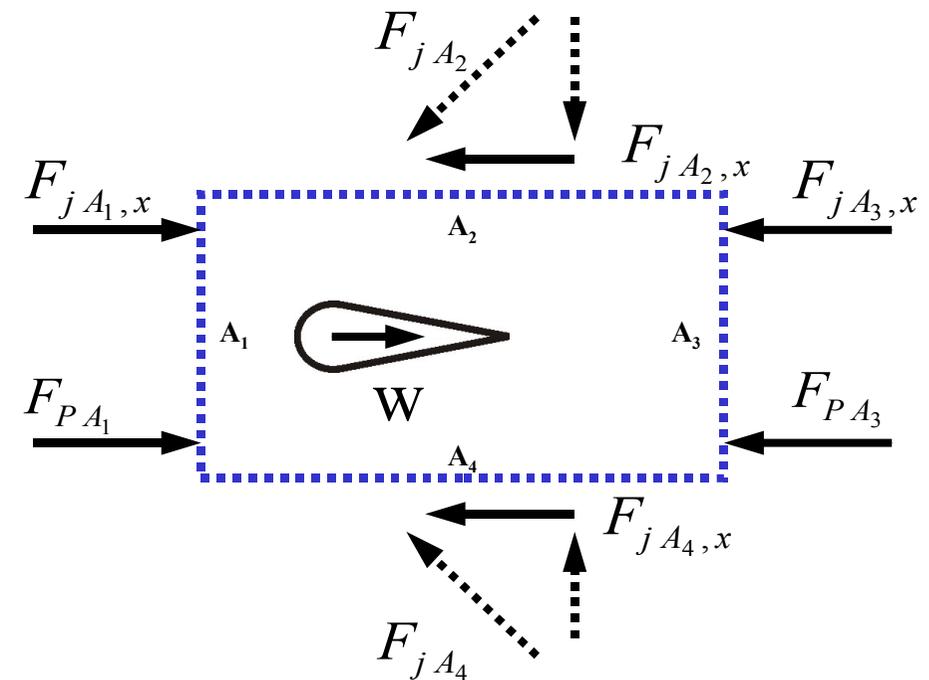
Kräftegleichgewicht

Kontrollvolumen A



$$|F_{j A_1, x}| + |F_{P A_1}| - |F_{j A_3, x}| - |F_{P A_3}| = |W|$$

Kontrollvolumen B



$$|F_{j A_1, x}| + |F_{P A_1}| - |F_{j A_2, x}| - |F_{j A_3, x}| - |F_{P A_3}| - |F_{j A_4, x}| = |W|$$



Kräftegleichgewicht A

Kontrollvolumen A

$$F_j = -\int_A \rho \cdot v \cdot (v \cdot n) dA$$

$$F_{jA_1,x} = +9187.32 \text{ N}$$

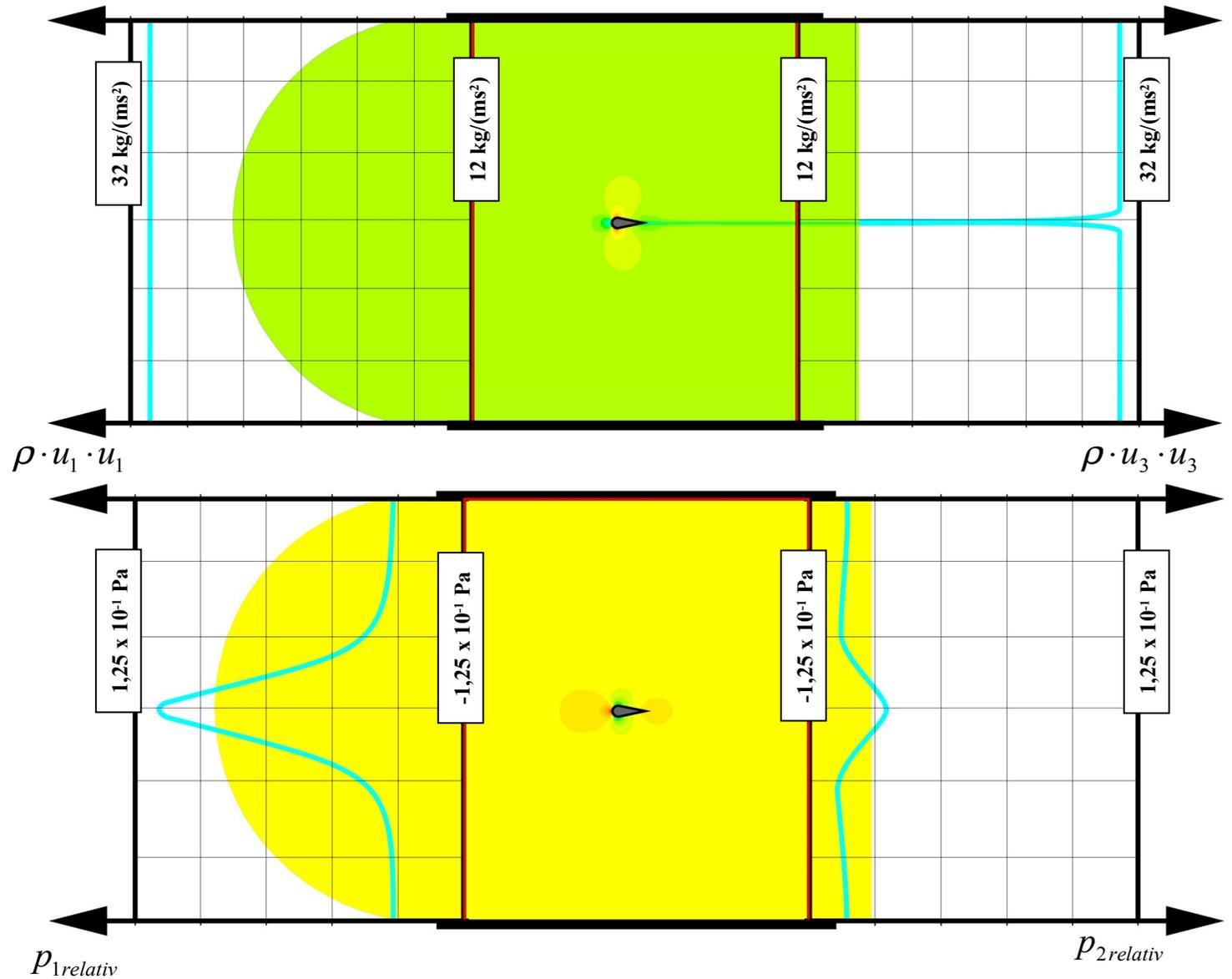
$$F_{jA_3,x} = -9189.61 \text{ N}$$

$$F_p = -\int_A p \cdot n dA$$

$$F_{pA_1} = +30397490 \text{ N}$$

$$F_{pA_3} = -30397472 \text{ N}$$

$$\rightarrow W = +15.71 \text{ N}$$



Kräftegleichgewicht B

Kontrollvolumen B

$$F_j = - \int_A \rho \cdot v \cdot (v \cdot n) dA$$

$$F_{j A_1, x} = +1202,63 \text{ N}$$

$$F_{j A_2, x} = -2.49 \text{ N}$$

$$F_{j A_3, x} = -1193.11 \text{ N}$$

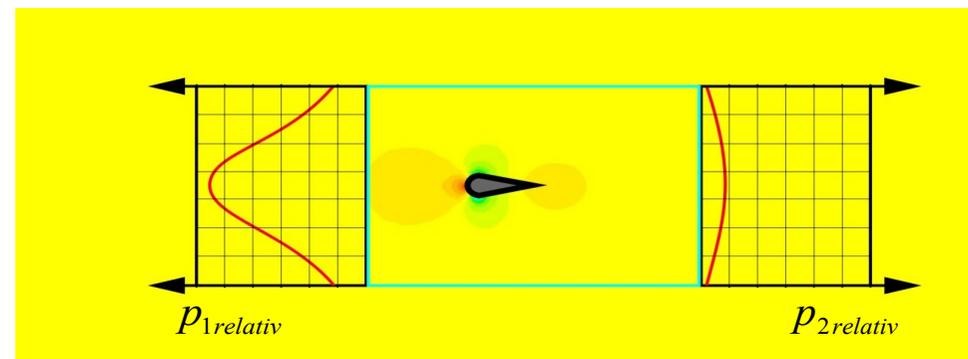
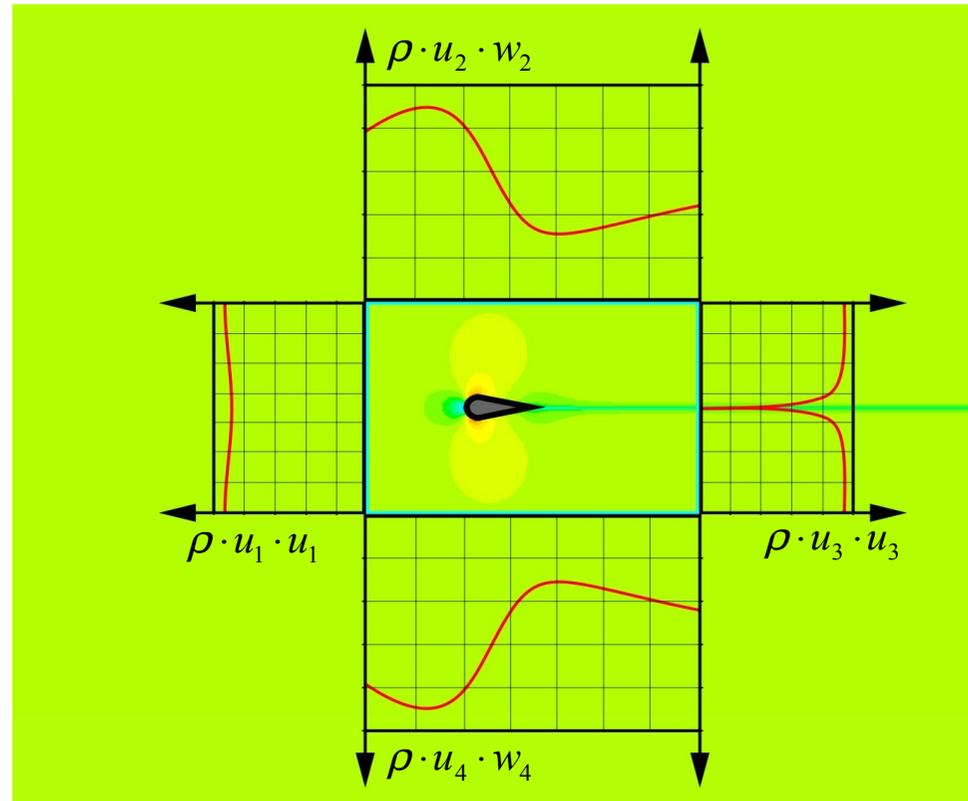
$$F_{j A_4, x} = -2.4 \text{ N}$$

$$F_P = - \int_A p \cdot n dA$$

$$F_{P A_1} = +4053009.2 \text{ N}$$

$$F_{P A_3} = -4052998.2 \text{ N}$$

$$\longrightarrow W = +15.57 \text{ N}$$



Integration c_p -Verteilung

$$c_w = c_d + c_{f,g}$$

$$W = F_D + F_R$$

Druckwiderstand

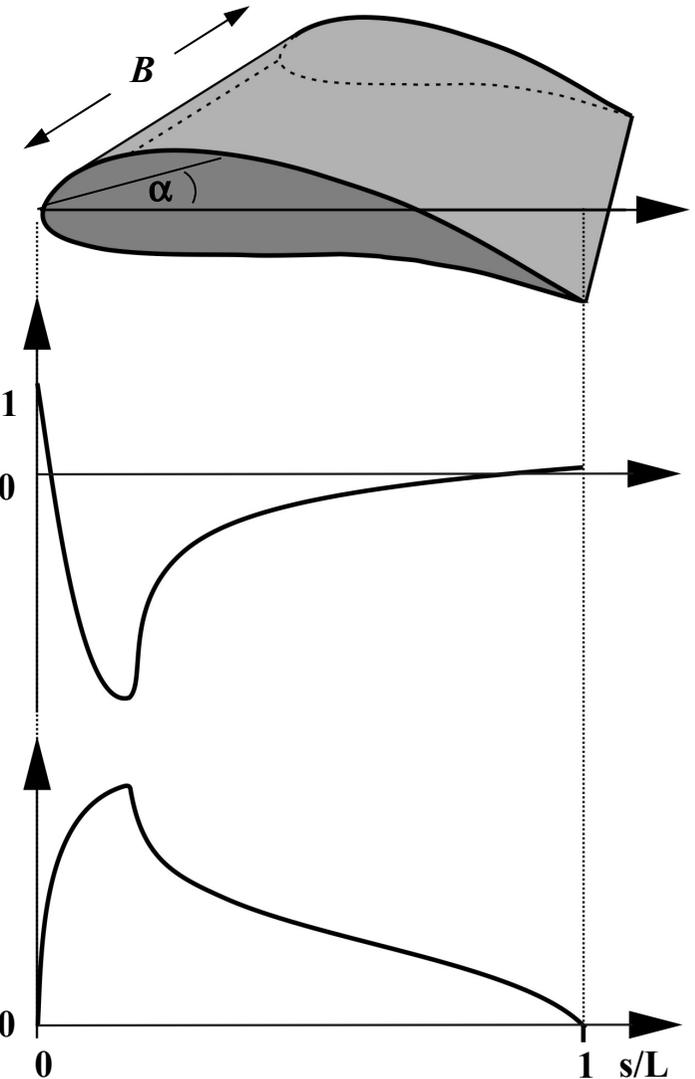
$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty^2 \cdot B \cdot \left(\int_0^L c_{P,o} \cdot \sin(\alpha_o) ds - \int_0^L c_{P,u} \cdot \sin(\alpha_u) ds \right)$$

$$c_P = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot U_\infty^2}$$

Reibungswiderstand

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty^2 \cdot B \cdot \left(\int_0^L c_{g,o} \cdot \sin(\alpha_o) ds - \int_0^L c_{g,u} \cdot \sin(\alpha_u) ds \right)$$

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot U_\infty^2}$$



Integration τ_w -Verteilung

$$c_w = c_d + c_{f,g}$$

$$W = F_D + F_R$$

Druckwiderstand

$$c_d = 0.25 \quad \longrightarrow \quad F_D = +15.61 \text{ N}$$

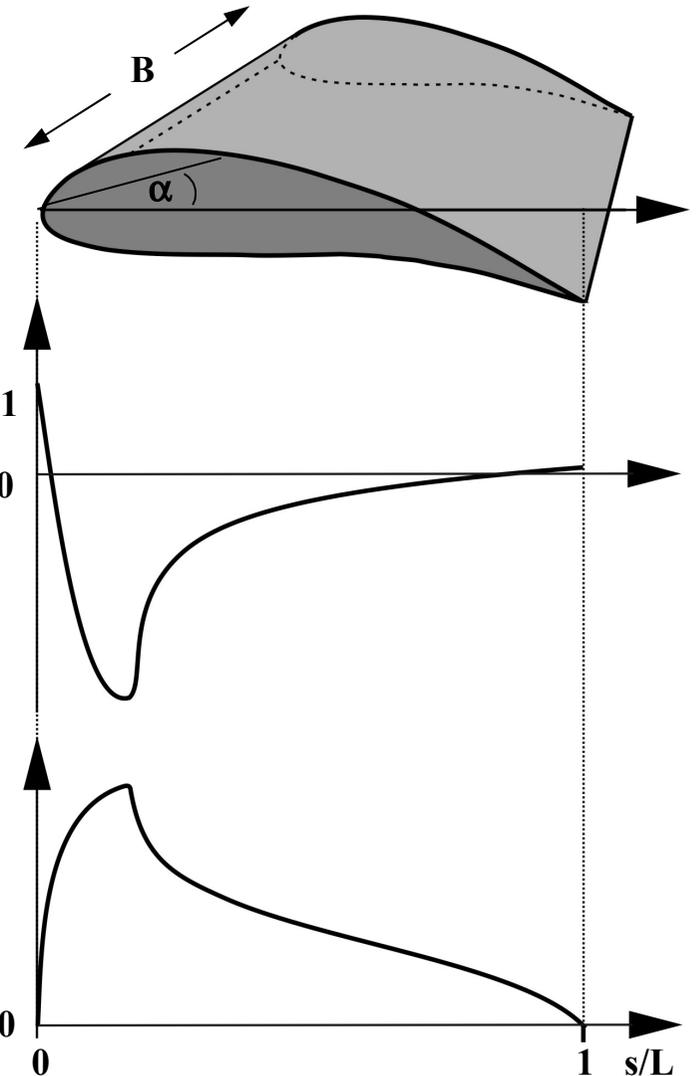
$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot U_\infty^2}$$

Reibungswiderstand

$$c_{f,g} = 0.00055 \quad \longrightarrow \quad F_R = +0.03 \text{ N}$$

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho_\infty \cdot U_\infty^2}$$

$$\longrightarrow \quad c_w = 0.255 \quad W = +15.64 \text{ N}$$



Rohrhydraulik

Kräftebilanz, Hagen-Poiseuille-Strömung

Kräftebilanz am Kontrollvolumen, turbulente Rohrströmung

Nikuradse-Diagramm

Experiment: Rohrverluste

Rauhigkeiten unterschiedlicher Materialien

Druckverlust bei unterschiedlichen Rohrquerschnitten

Geschwindigkeitsprofile, laminare und turbulente Rohrströmung

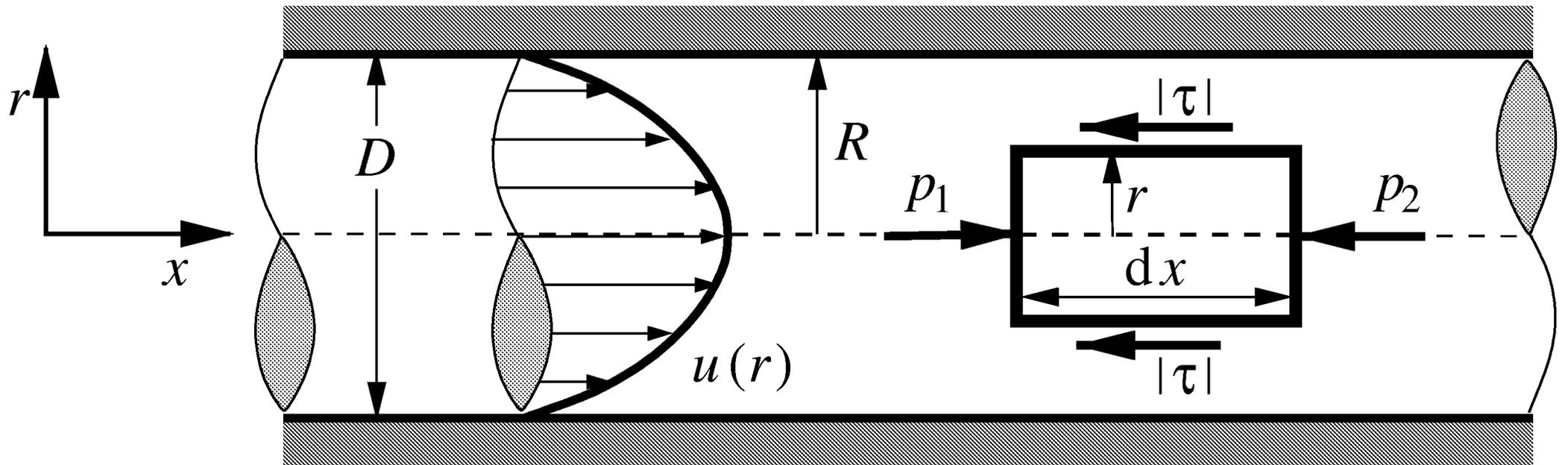
Geschwindigkeitsprofil einer Nicht-Newtonschen Flüssigkeit

Weissenberg-Effekt

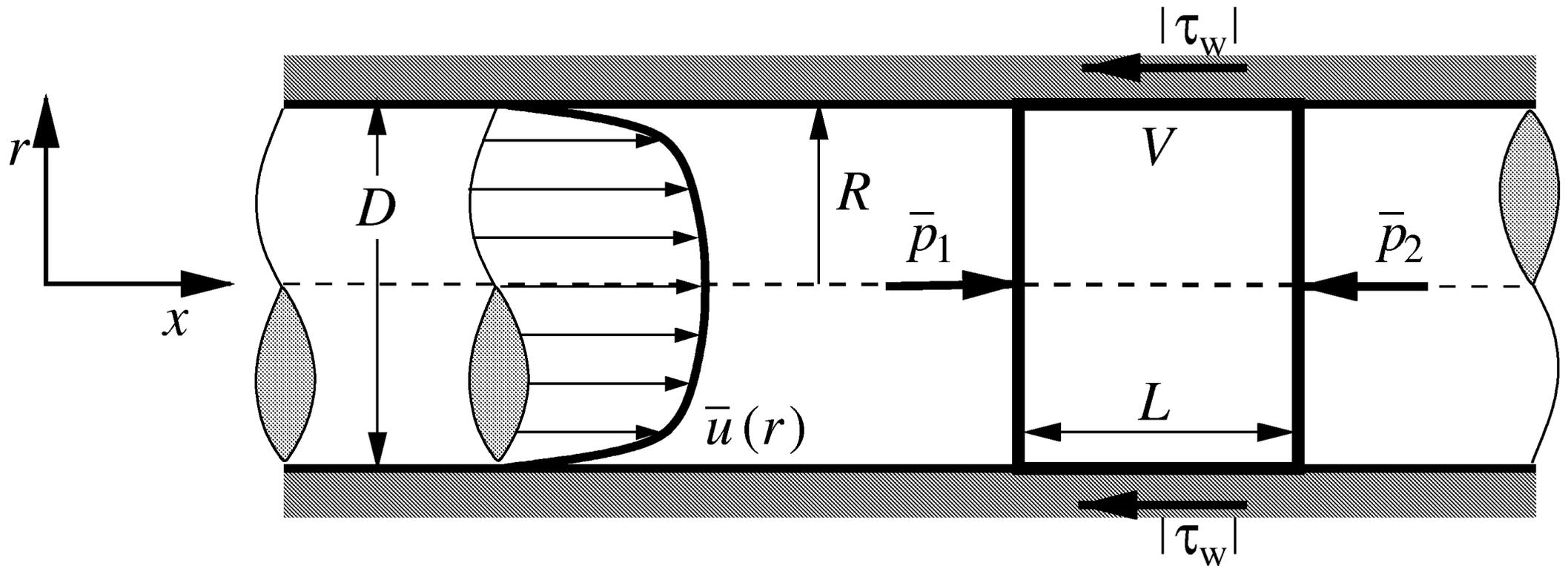
Strahlaufweitung



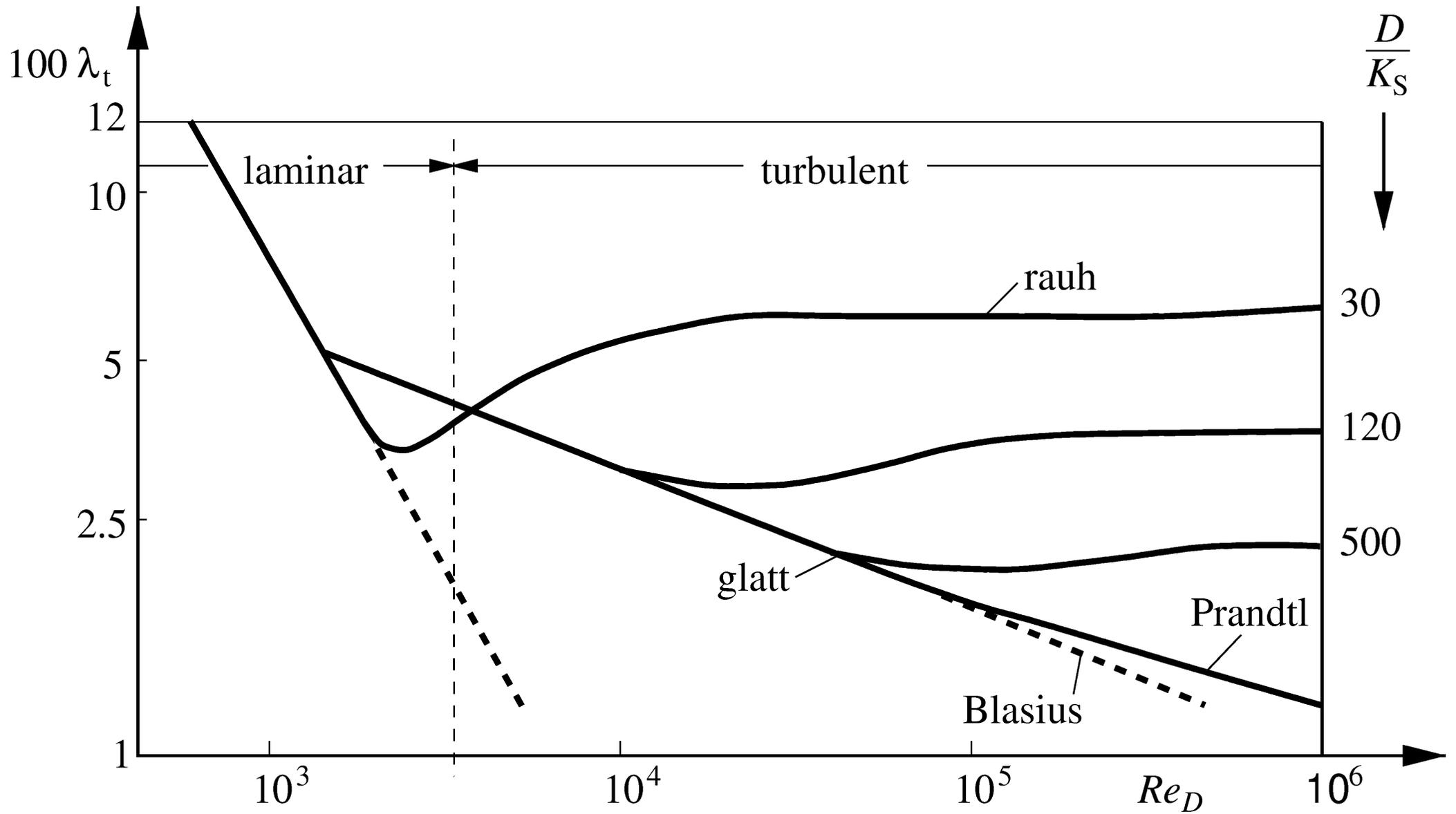
Kräftebilanz für die Hagen-Poiseuille-Rohrströmung



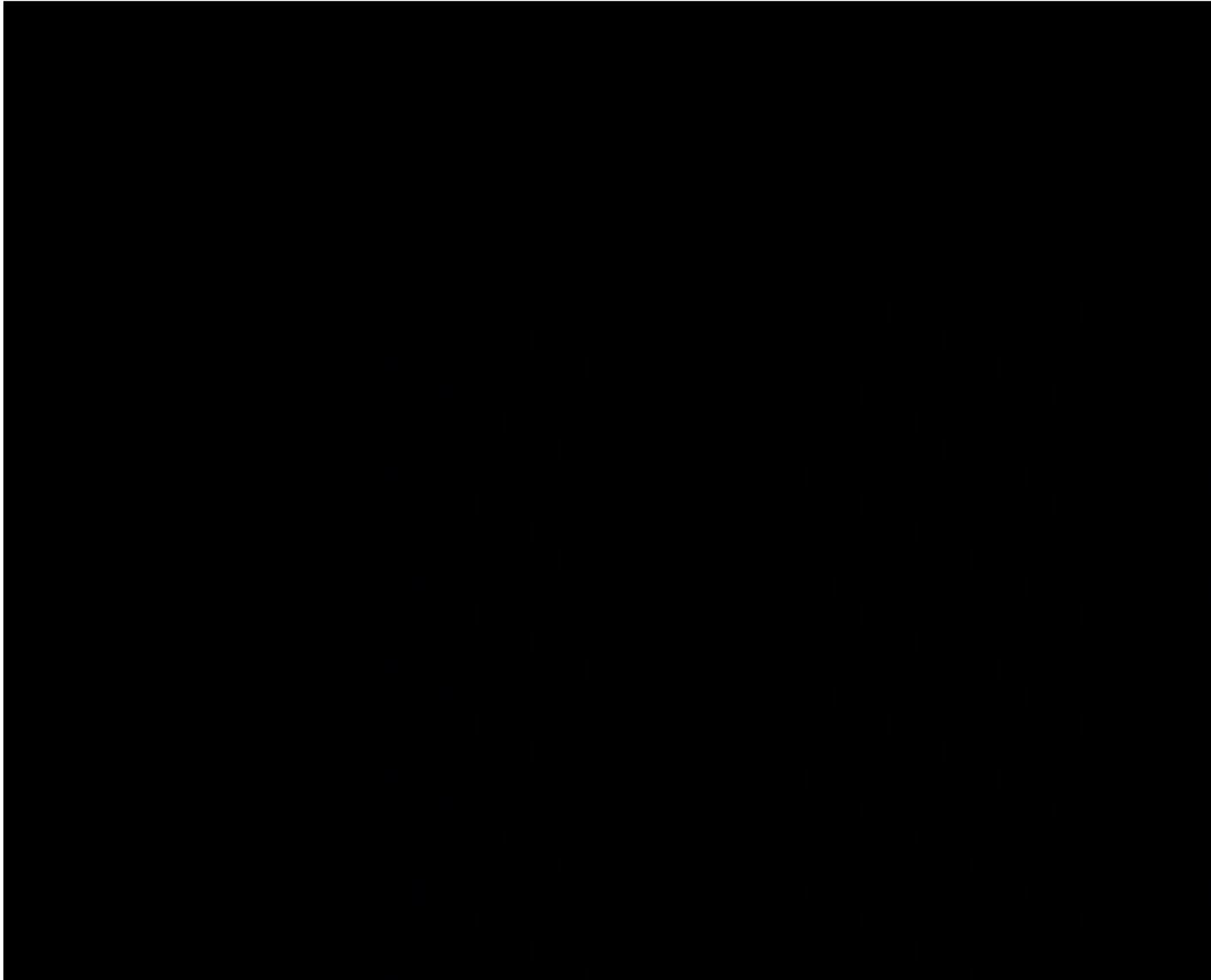
Kräftebilanz am Kontrollvolumen V für die turbulente Rohrströmung

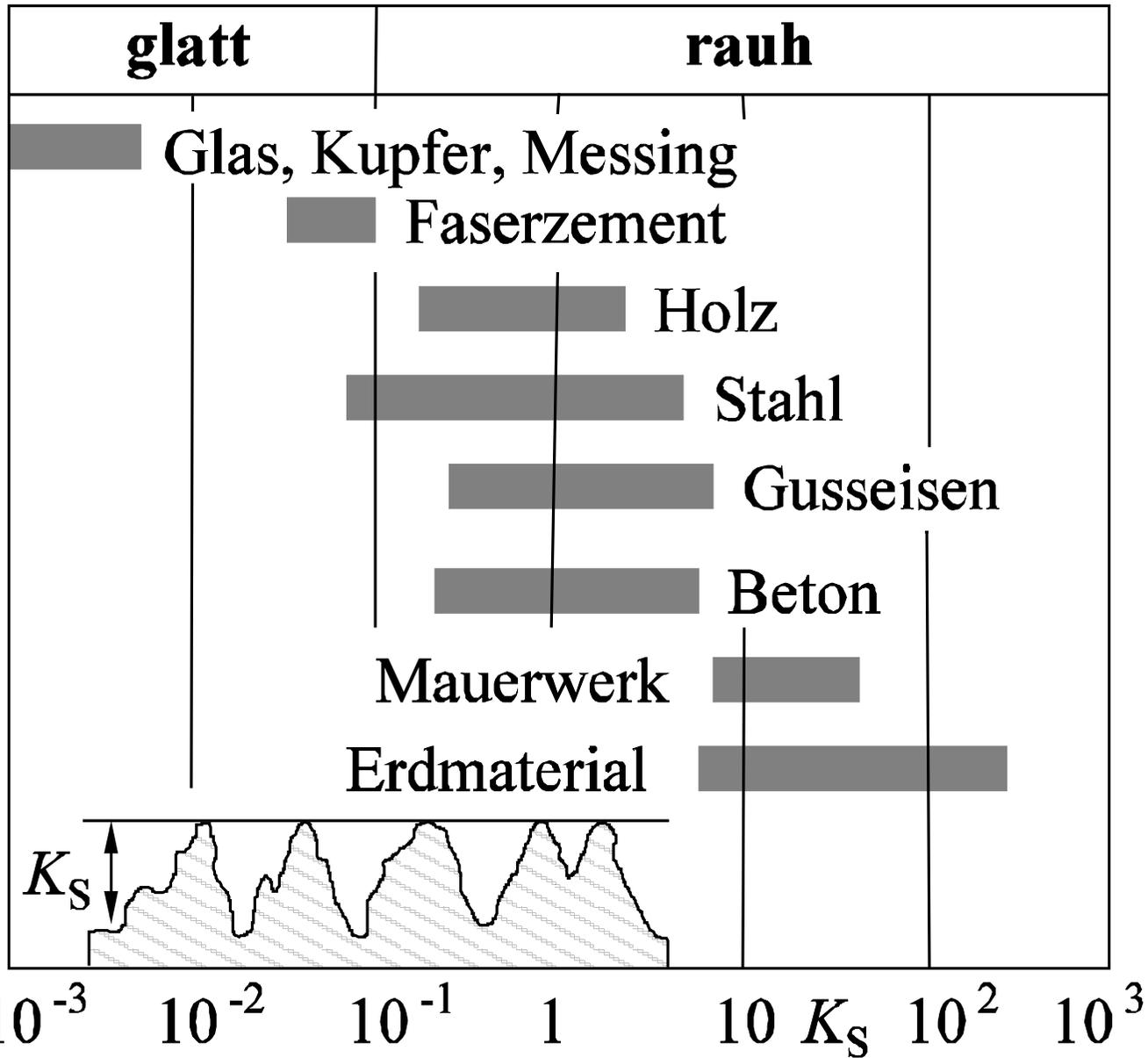


Nikuradse-Diagramm

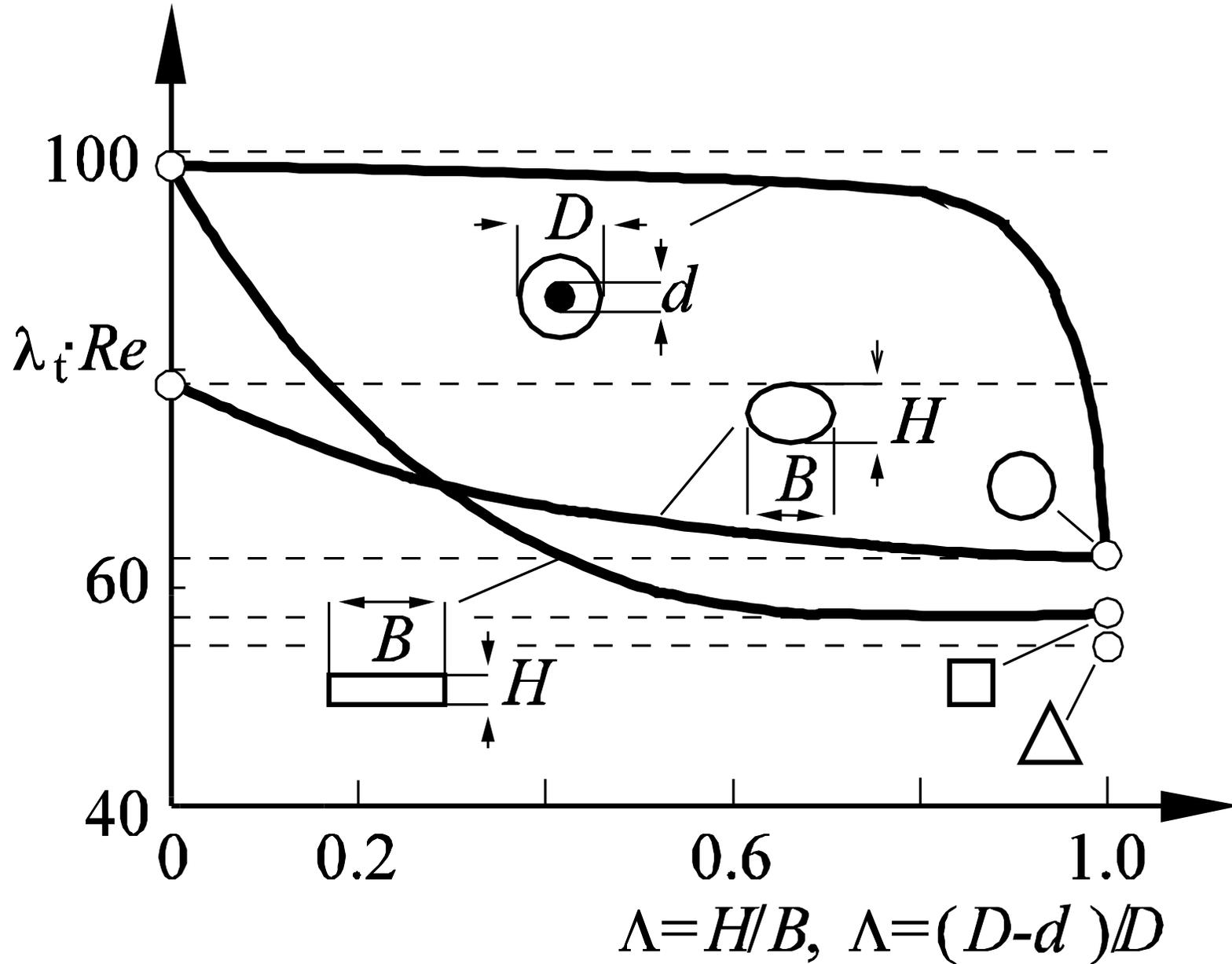


Experiment: Rohrverluste

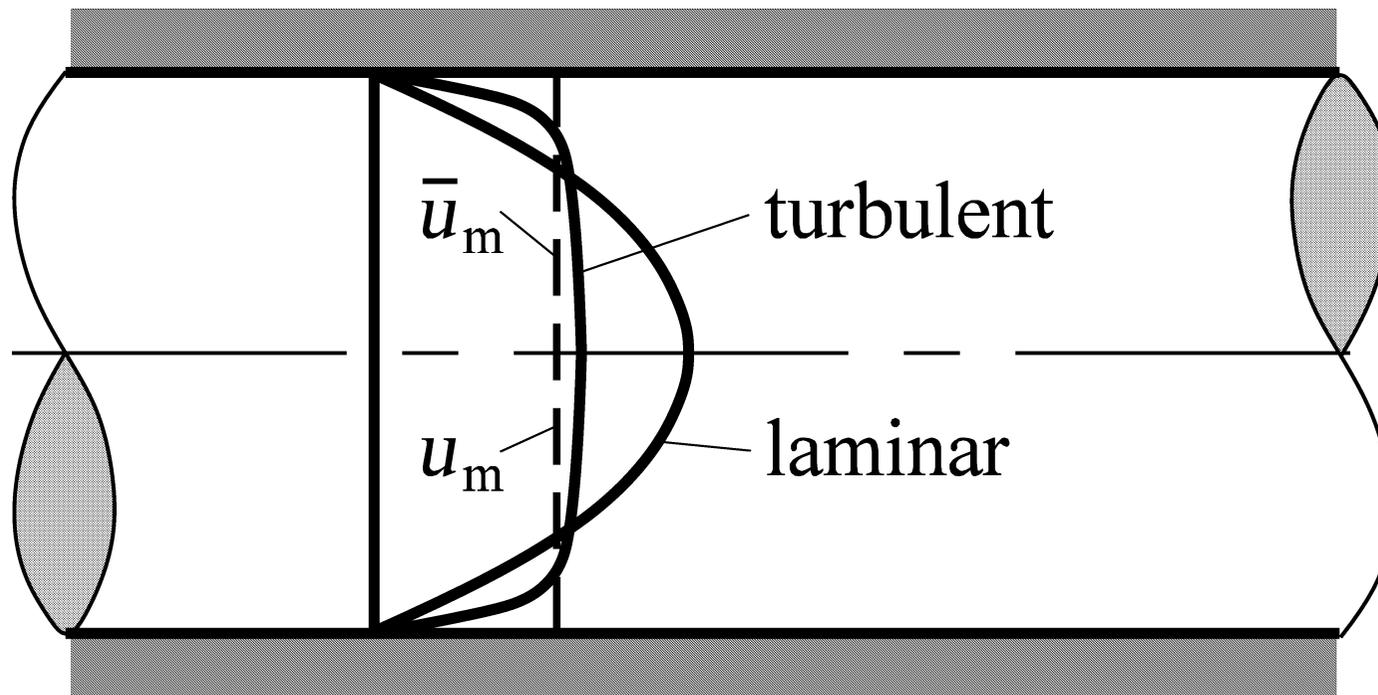




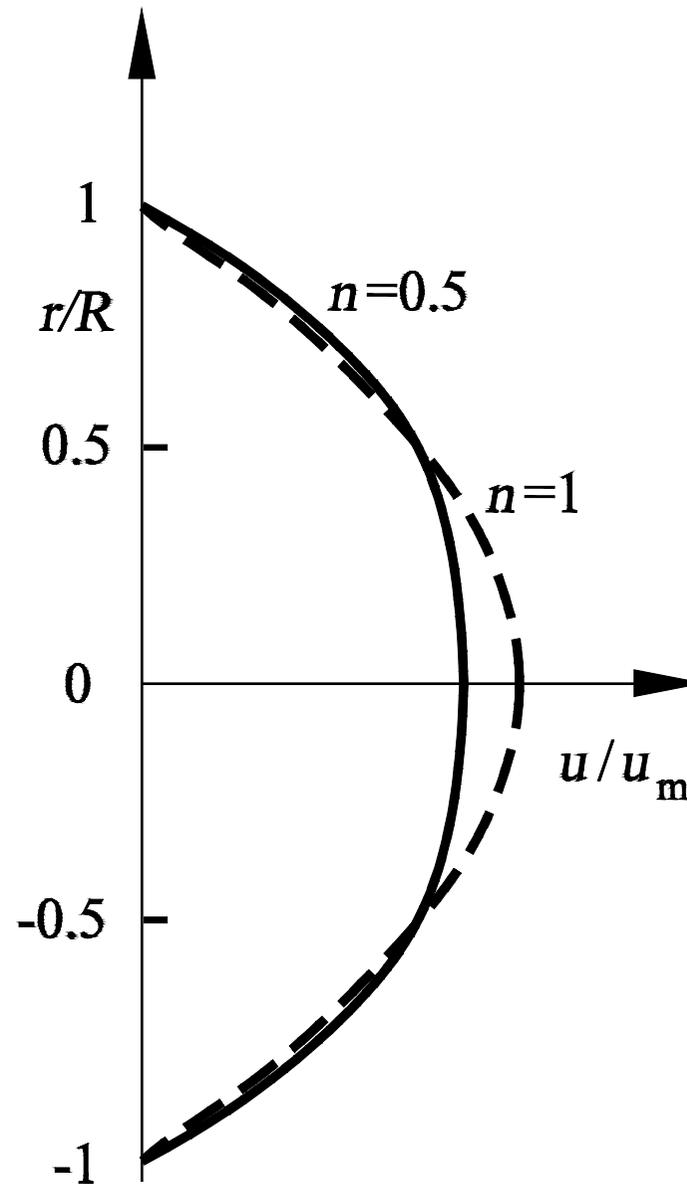
Druckverlust λ_t bei unterschiedlichen Rohrquerschnitten



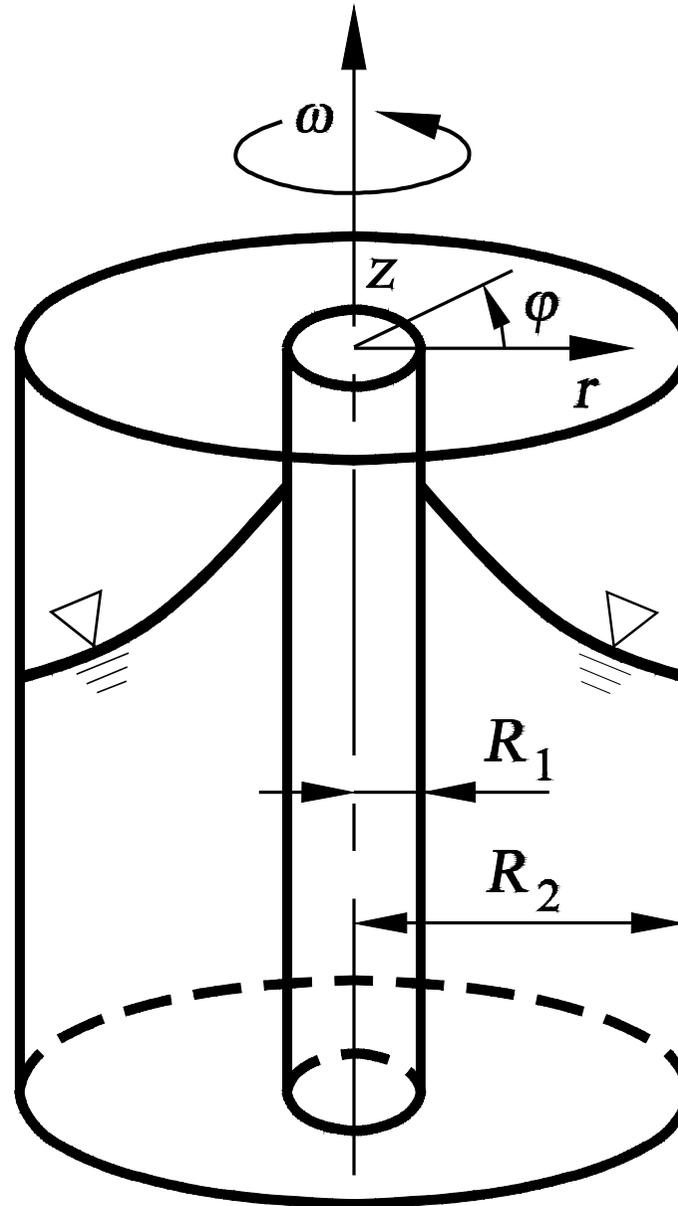
Geschwindigkeitsprofile der laminaren und turbulenten Rohrströmung



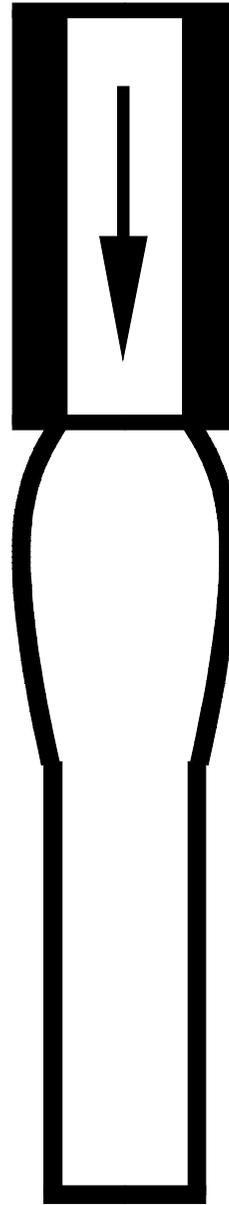
Geschwindigkeitsverteilung einer Nicht-Newton'schen Flüssigkeit



Weissenberg-Effekt



Strahlaufweitung eines Flüssigkeitsstrahls



Strömungsablösung

Strömungsablösung, Kugelumströmung

Grenzschichtablösung

Widerstandsbeiwert, Zylinderumströmung

Experiment: Nachlauf von Zylinder

Film: Strömungsablösung am Zylinder

Film: Simulation laminare Kármánsche Wirbelstraße, ruhend, mitbewegt

Stationäre Zylinderumströmung, Kármánsche Wirbelstraße

Anfahren eines Zylinders

Widerstandsbeiwerte stumpfer Körper

Experiment: Widerstand stumpfer Körper

Widerstandsbeiwerte als Funktion der Reynolds-Zahl

Kármánsche Wirbelstraße Jan Mayen

Nachlauf hinter Kugel

Vergleich Umströmung Golfball - Kugel

Widerstandsbeiwert Golfball und Kugel

Strömungsablösung am Tragflügelprofil

Film: Strömungsablösung am Profil

Sekundärströmung im Rohrkrümmer

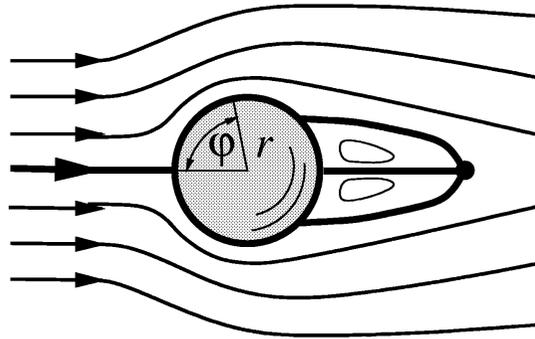
Strömung in menschlicher Aorta

Film: Simulation der Aortenströmung

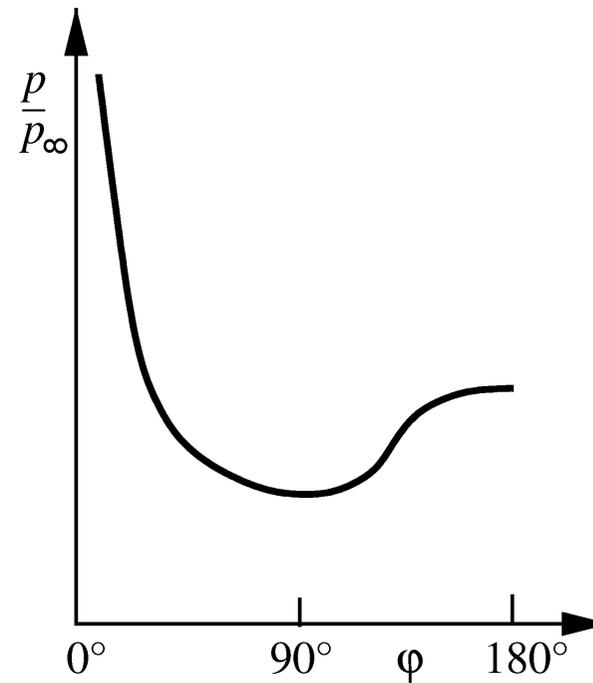
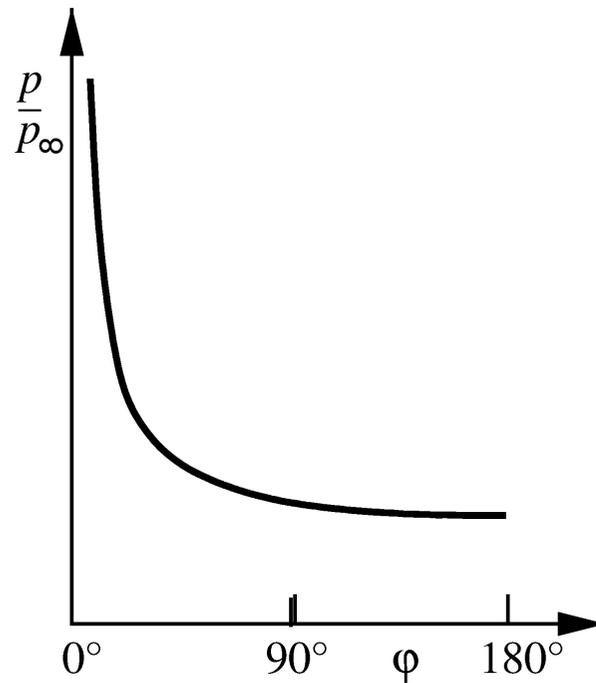
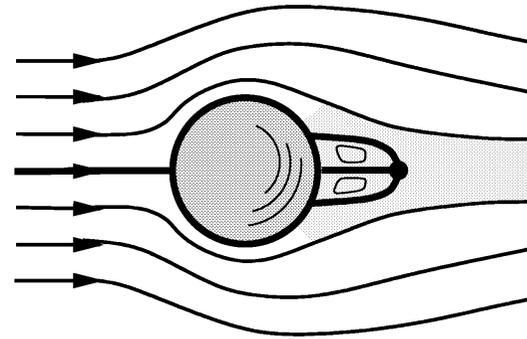


Strömungsablösung und Druckverteilung der Kugelumströmung

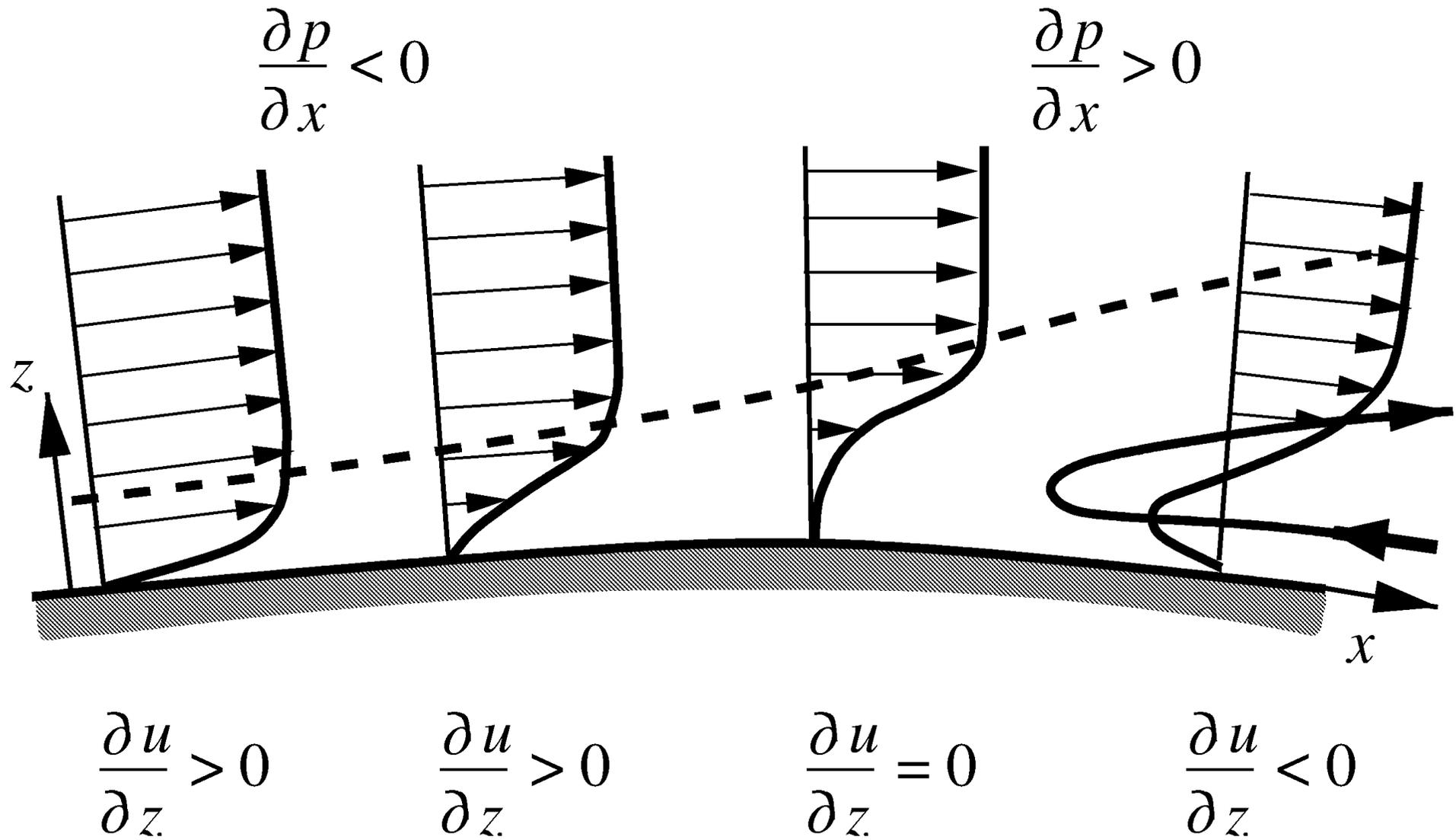
laminar



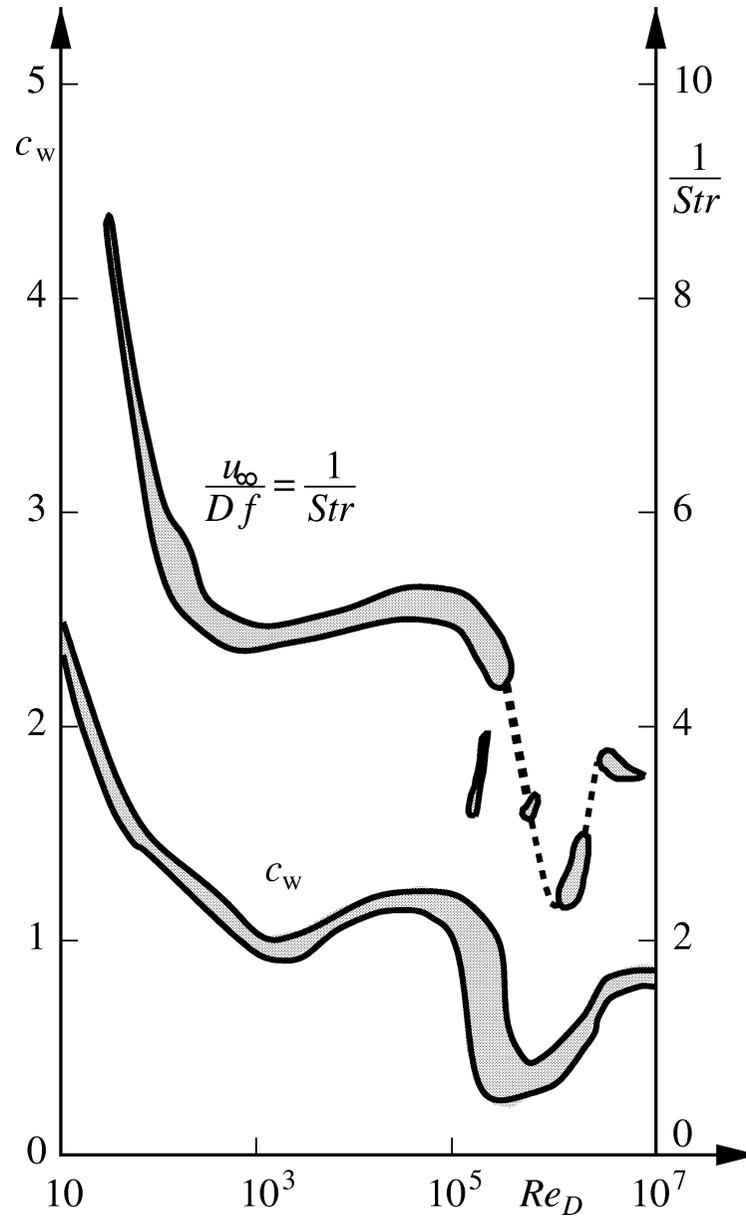
turbulent



Prinzipskizze der Grenzschichtablösung



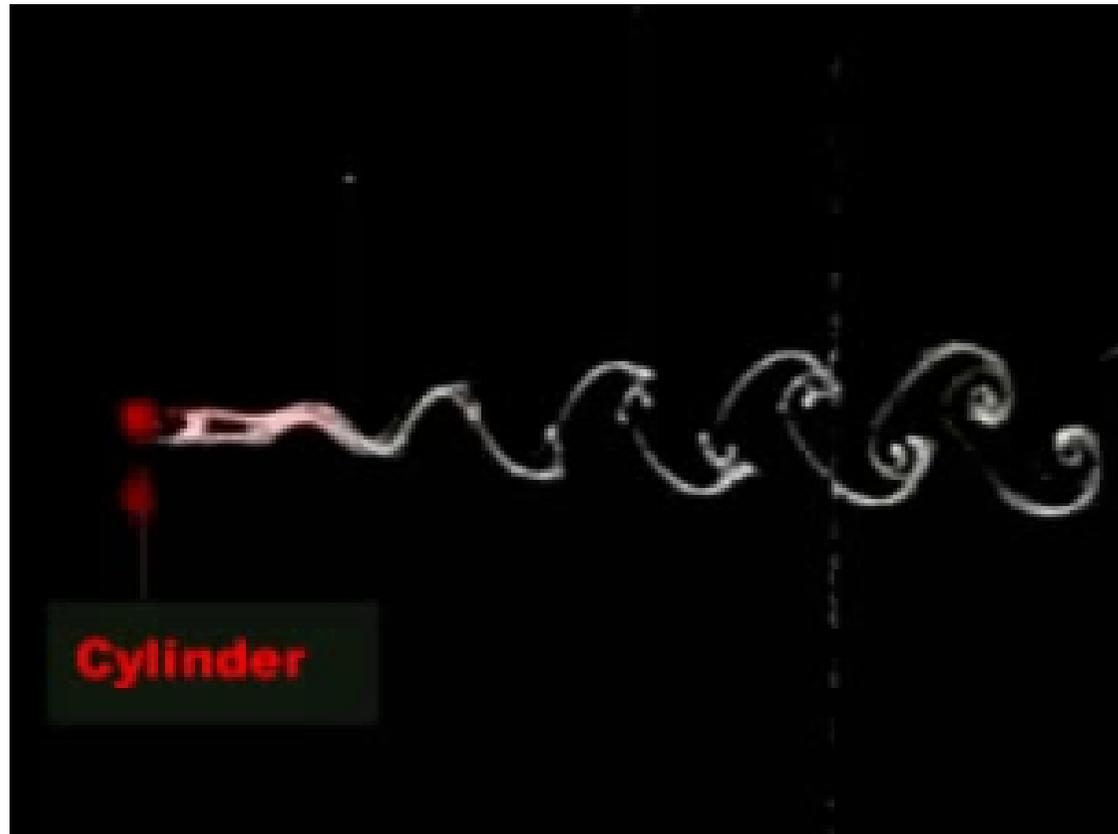
Widerstandsbeiwert und Ablösefrequenz für Zylinderumströmung



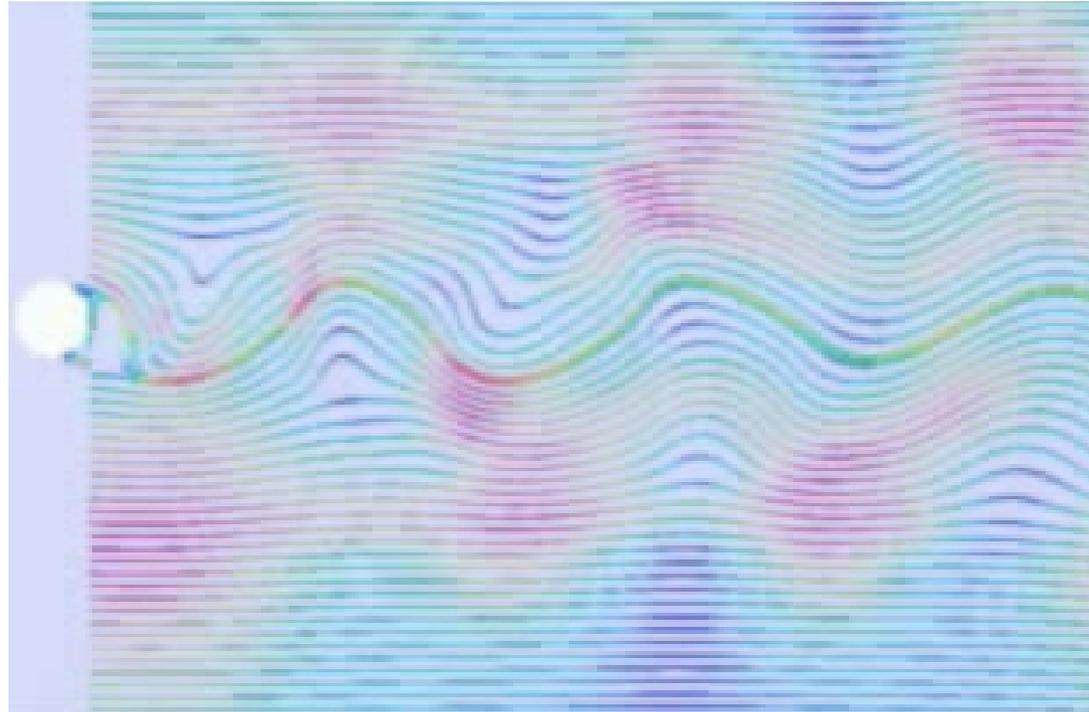
Experiment: Nachlauf eines Zylinders



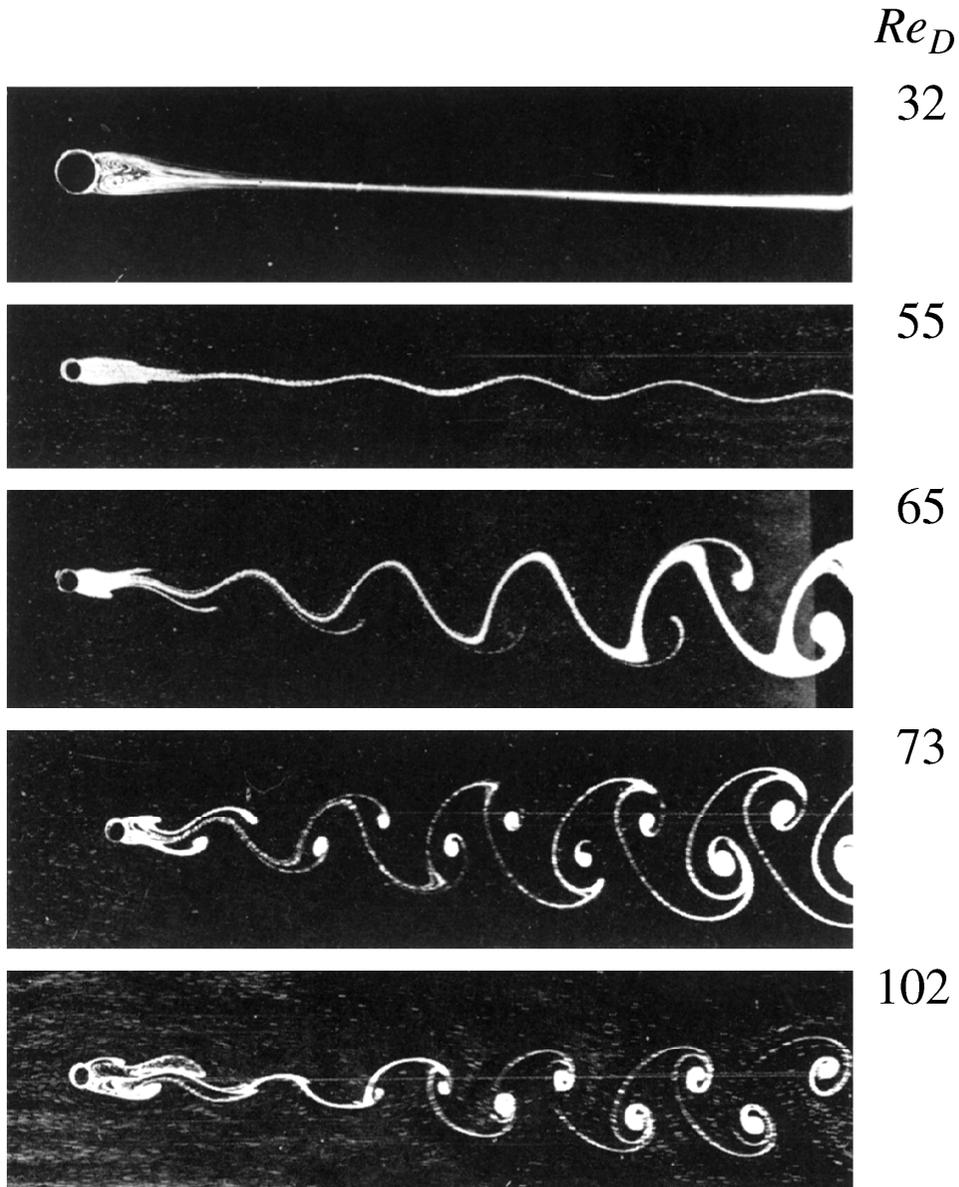
Film: Strömungsablösung am Zylinder



Film: Simulation laminare Kármánsche Wirbelstraße, ruhend, mitbewegt



Stationäre Zylinderumströmung und laminare Kármánsche Wirbelstraße

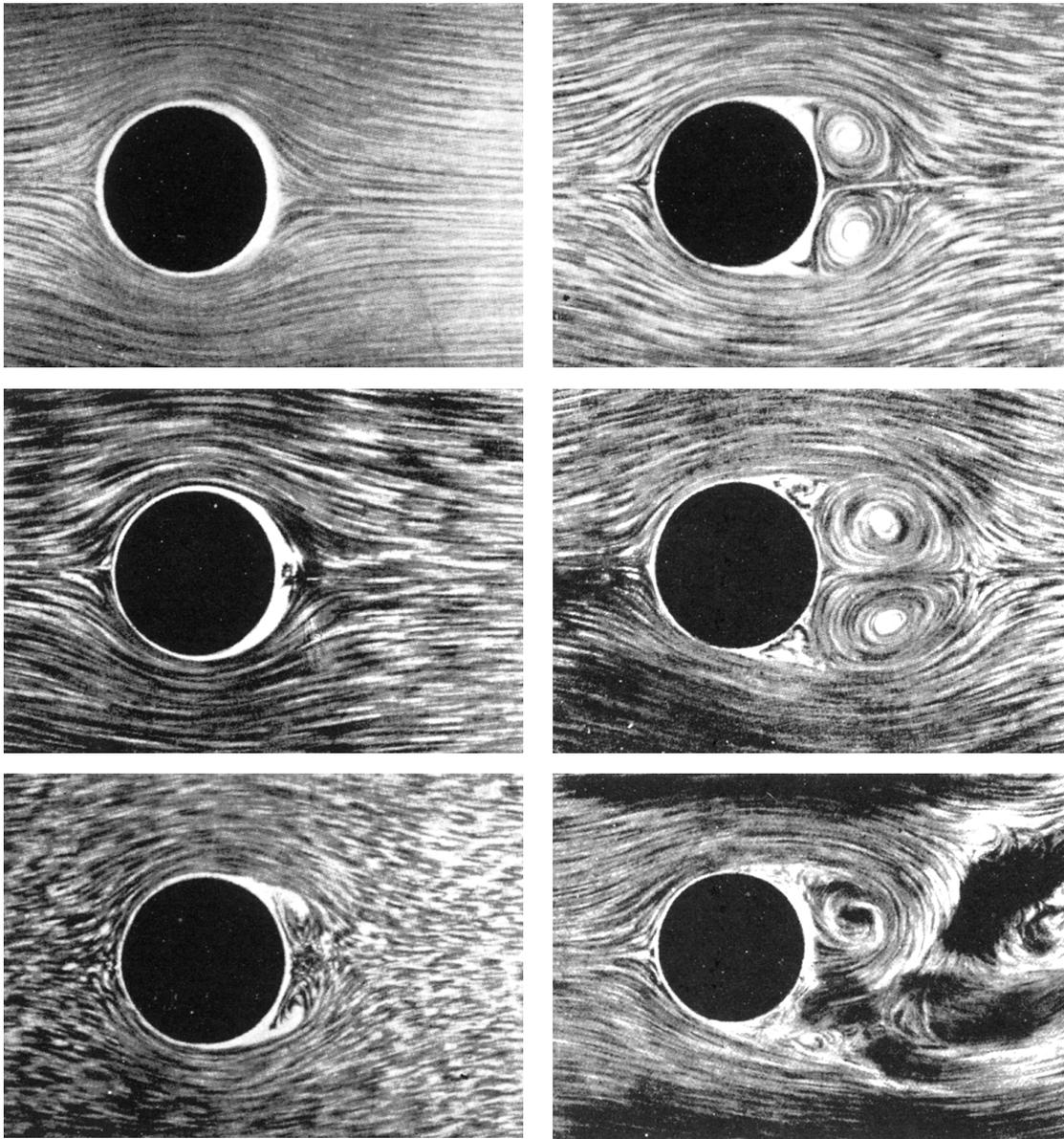


Homann 1936

**Konstante Anströmung
des Zylinders**



Zylinderumströmung und laminare Kármánsche Wirbelstraße beim Anfahren

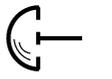


Prandtl 1927

**Anfahren des Zylinders aus
Der Ruhe, Ausbilden der
Kármánschen Wirbelstraße
Über Zwischenzustände**



Widerstandsbeiwert c_w stumpfer Körper

c_w	c_w
 0.47	 1.17
 0.39	 1.20
 0.42	 1.16
 0.59	 1.60
 0.81	 1.50
 0.50	 1.55
 1.17	 1.98
 1.17	 2.00
 1.40	 2.30
 1.38	 2.20
 1.10	 2.00

dreidimensionale
Körper

zweidimensionale
Körper

$$10^4 < Re_D < 10^5$$

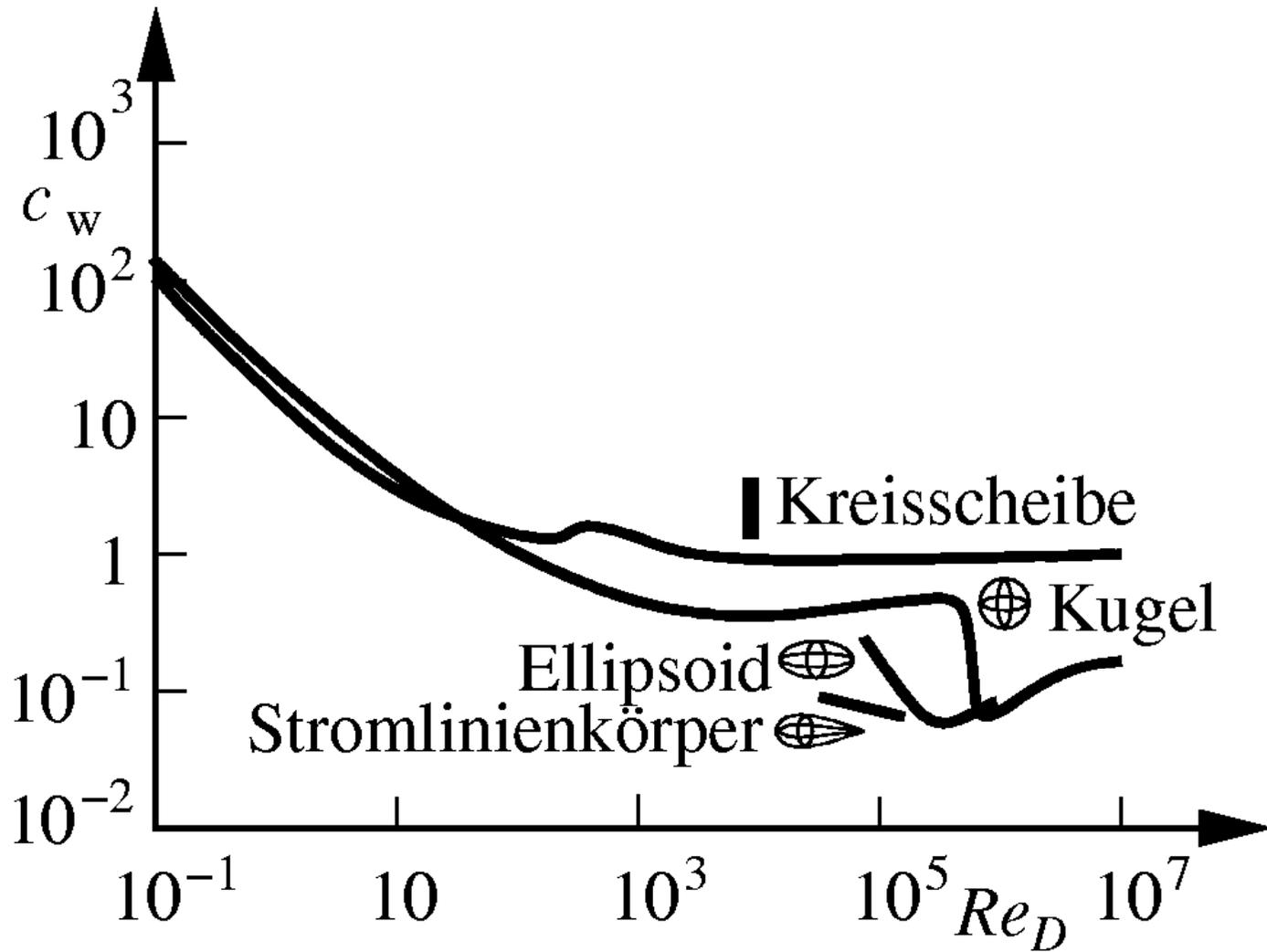
c_w
 0.26
 0.012
 1.20



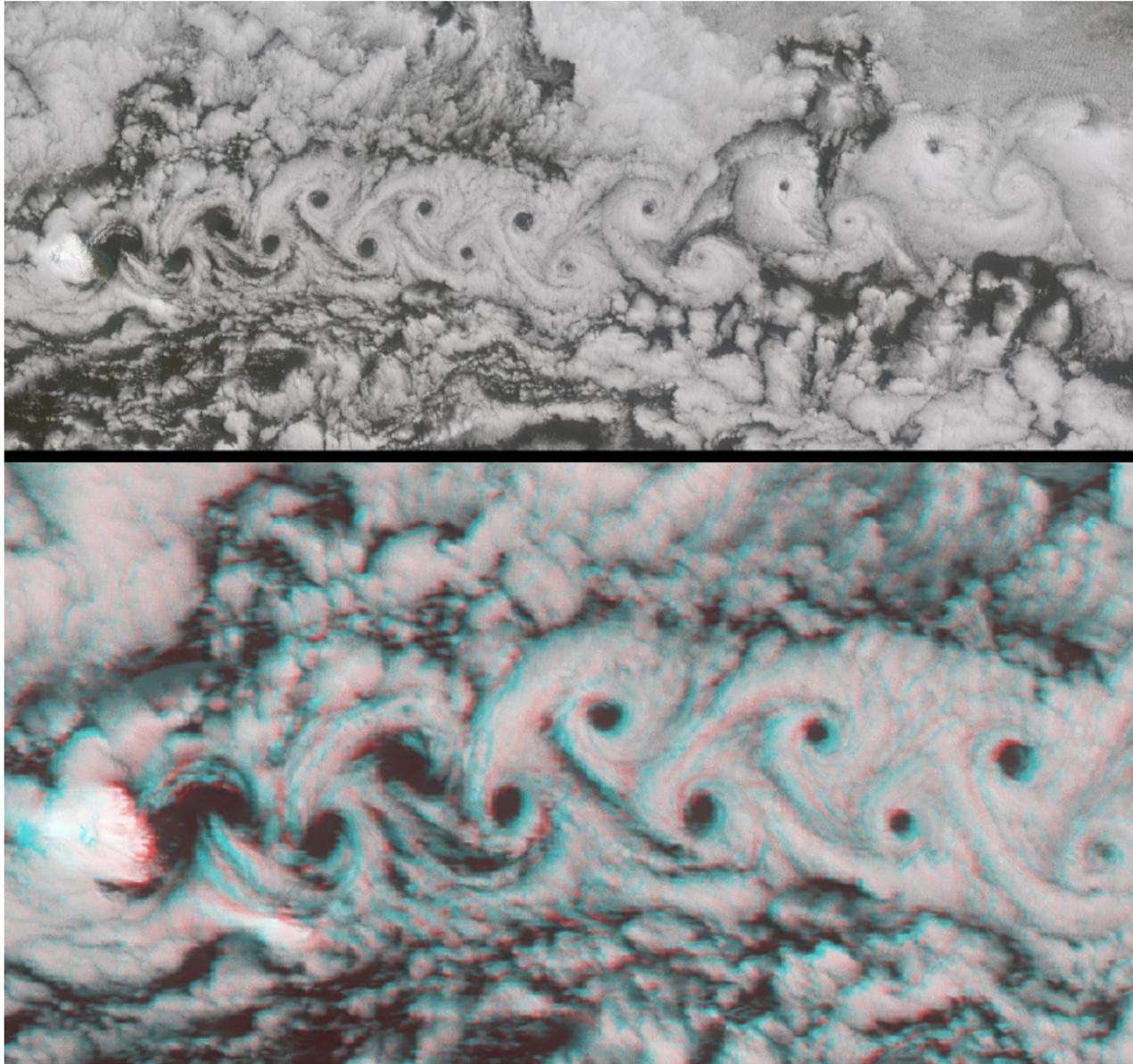
Experiment: Widerstand stumpfer Körper



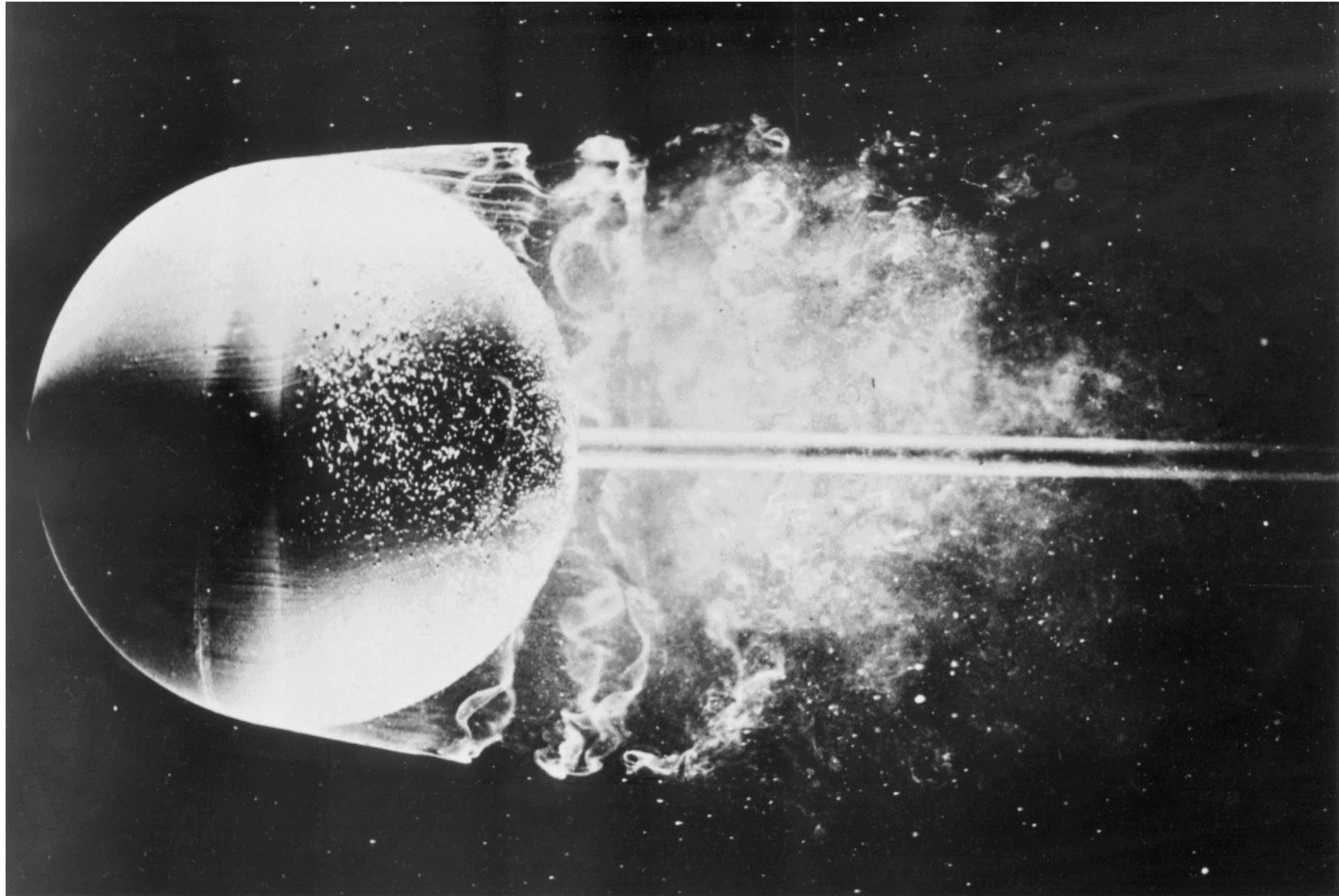
Widerstandsbeiwert c_w stumpfer Körper in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl



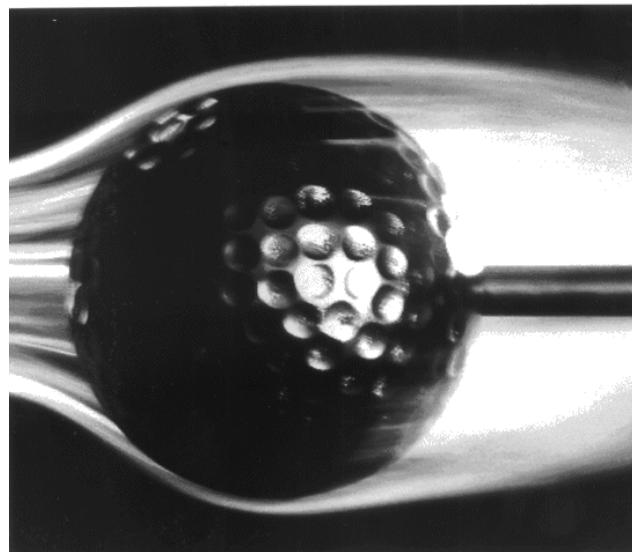
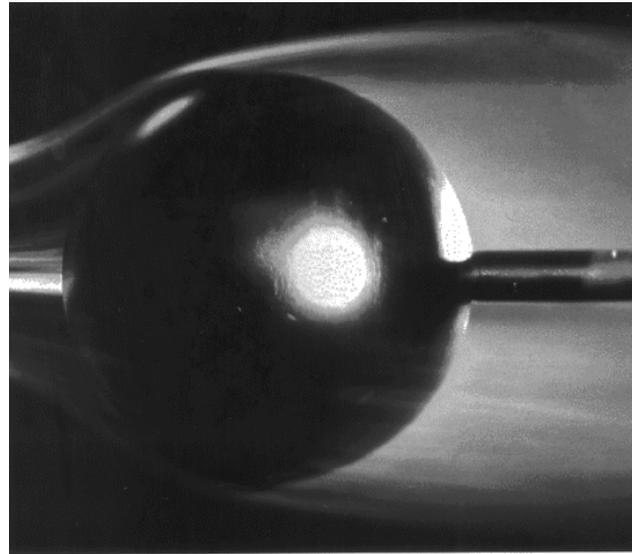
Kármánsche Wirbelstraße Jan Mayen



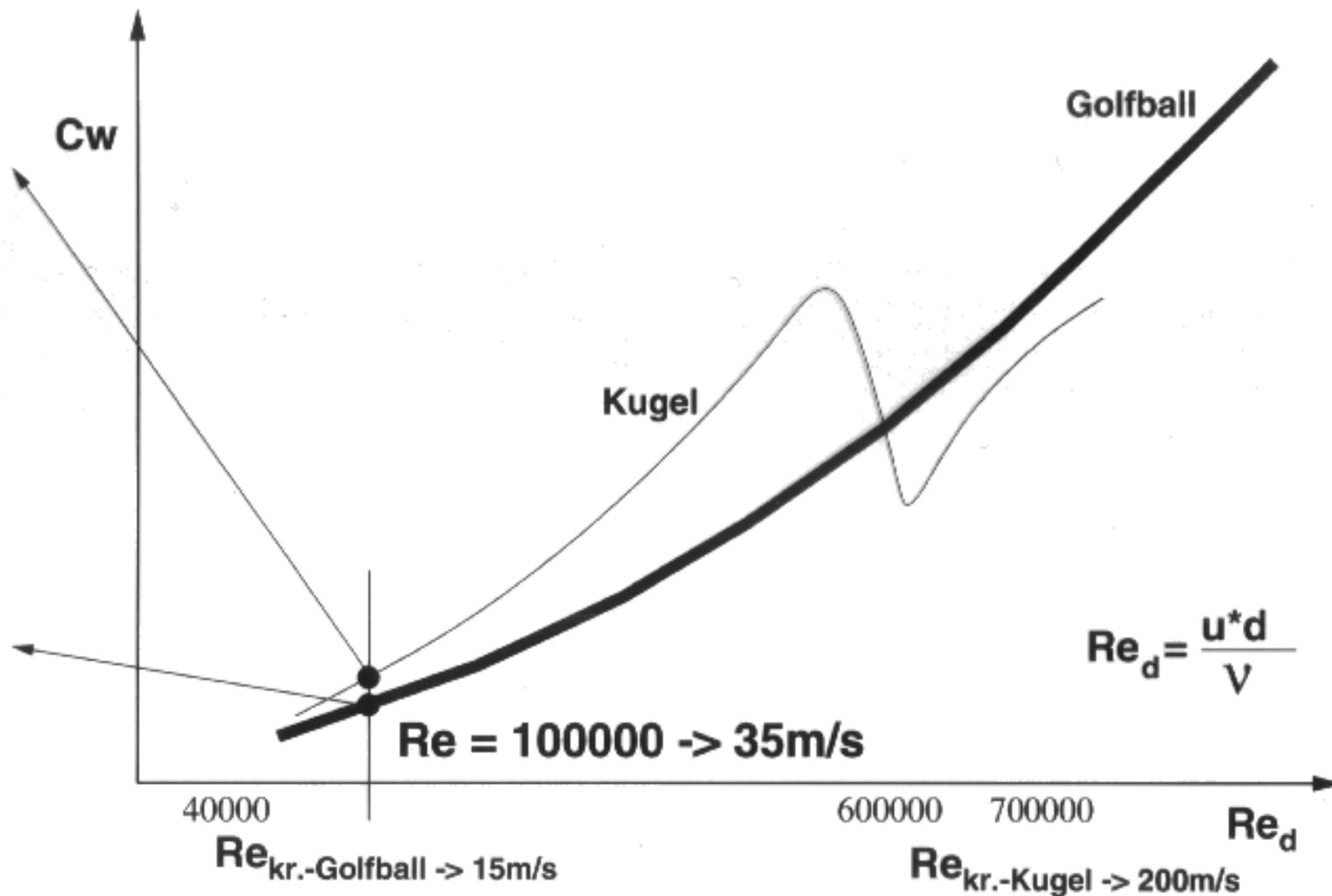
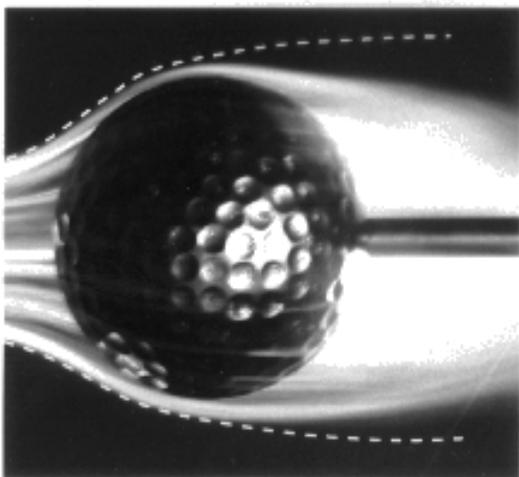
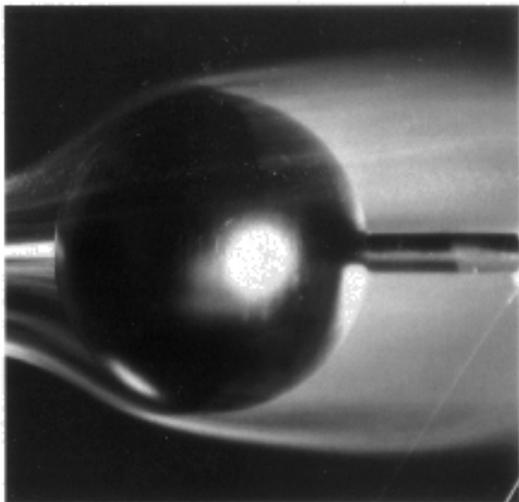
Nachlauf hinter einer Kugel



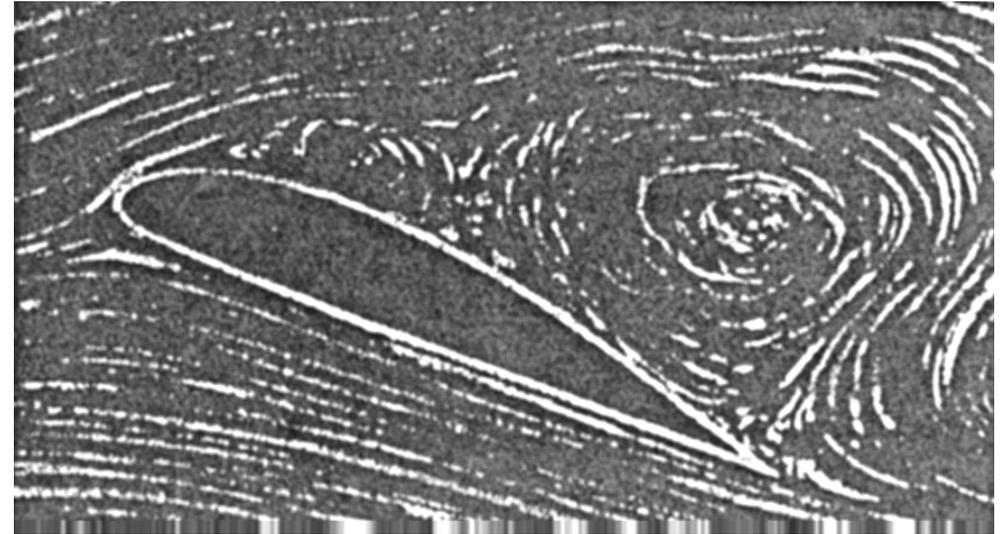
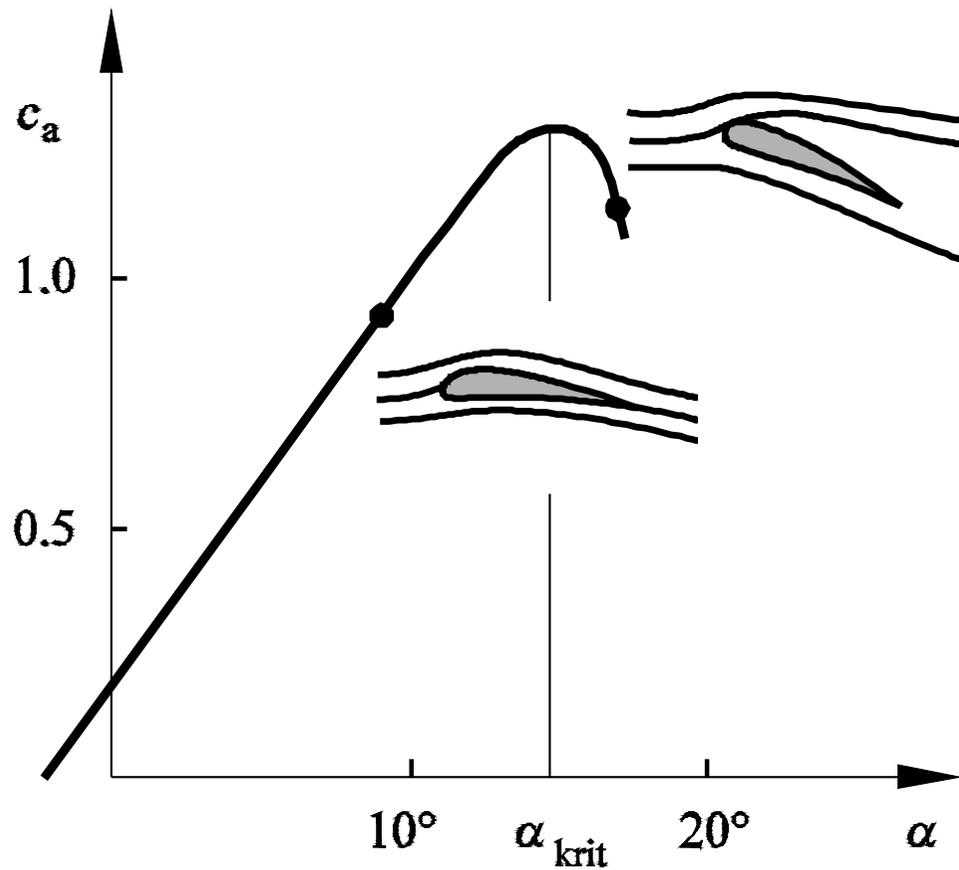
Vergleich der Umströmung einer Kugel und eines Golfballs



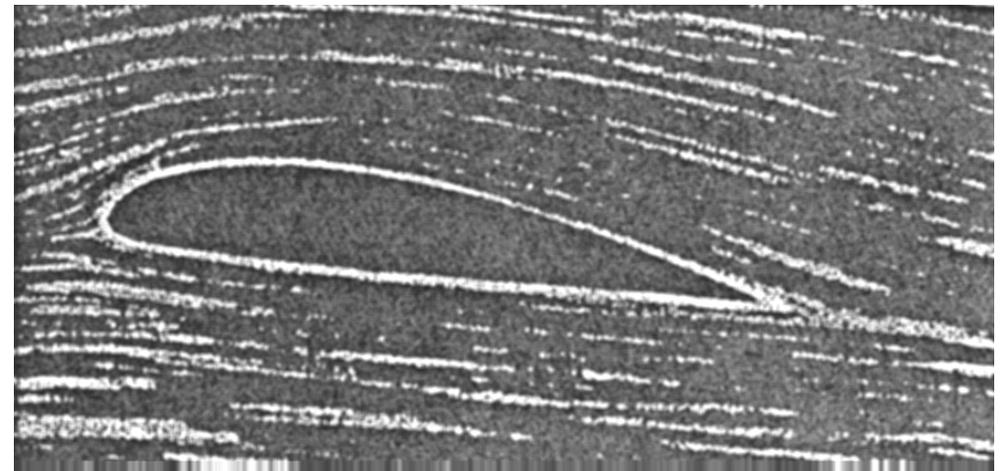
Widerstandsbeiwert c_w eines Golfballs und einer Kugel



Strömungsablösung am Tragflügelprofil



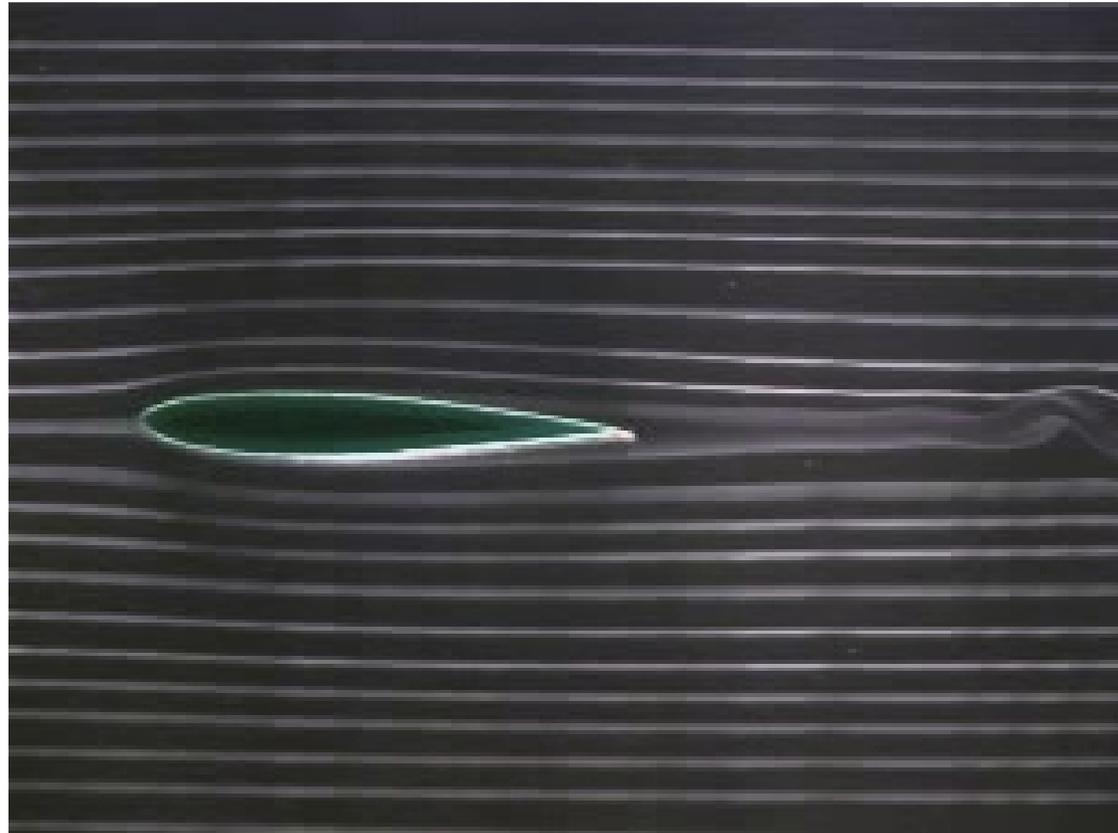
Strömungsablösung



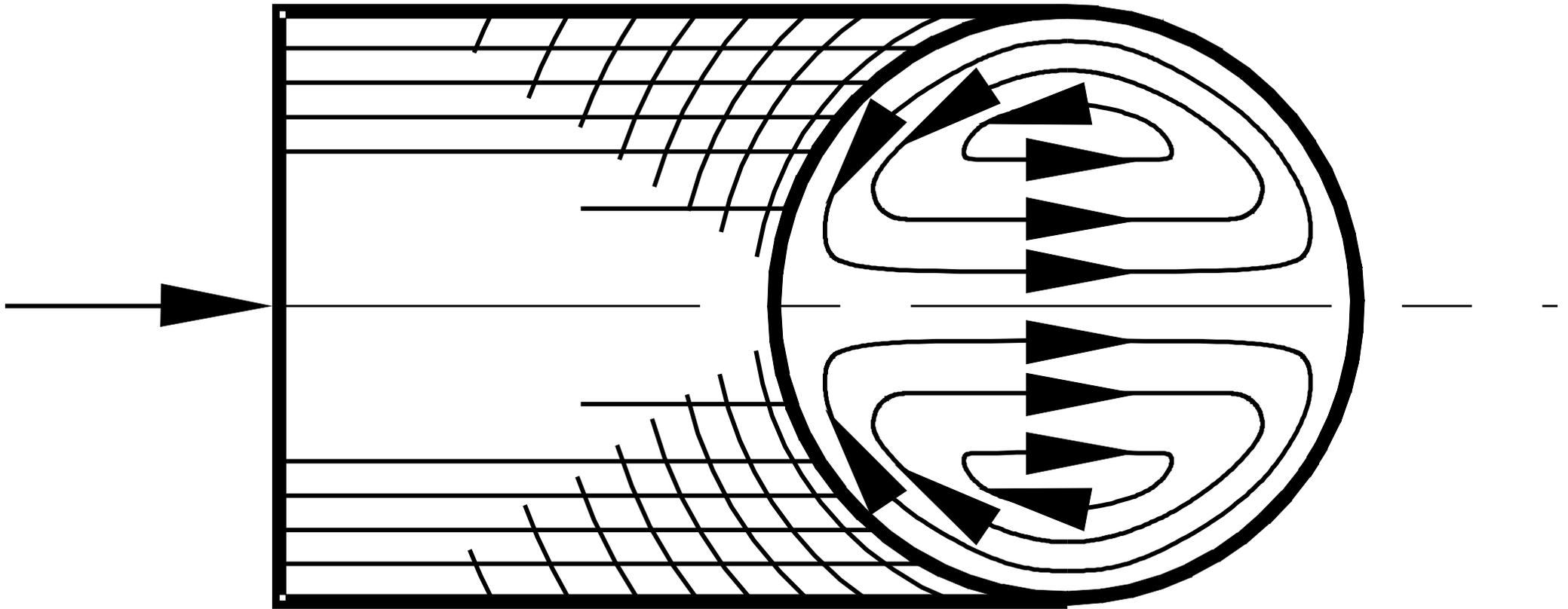
anliegende Strömung



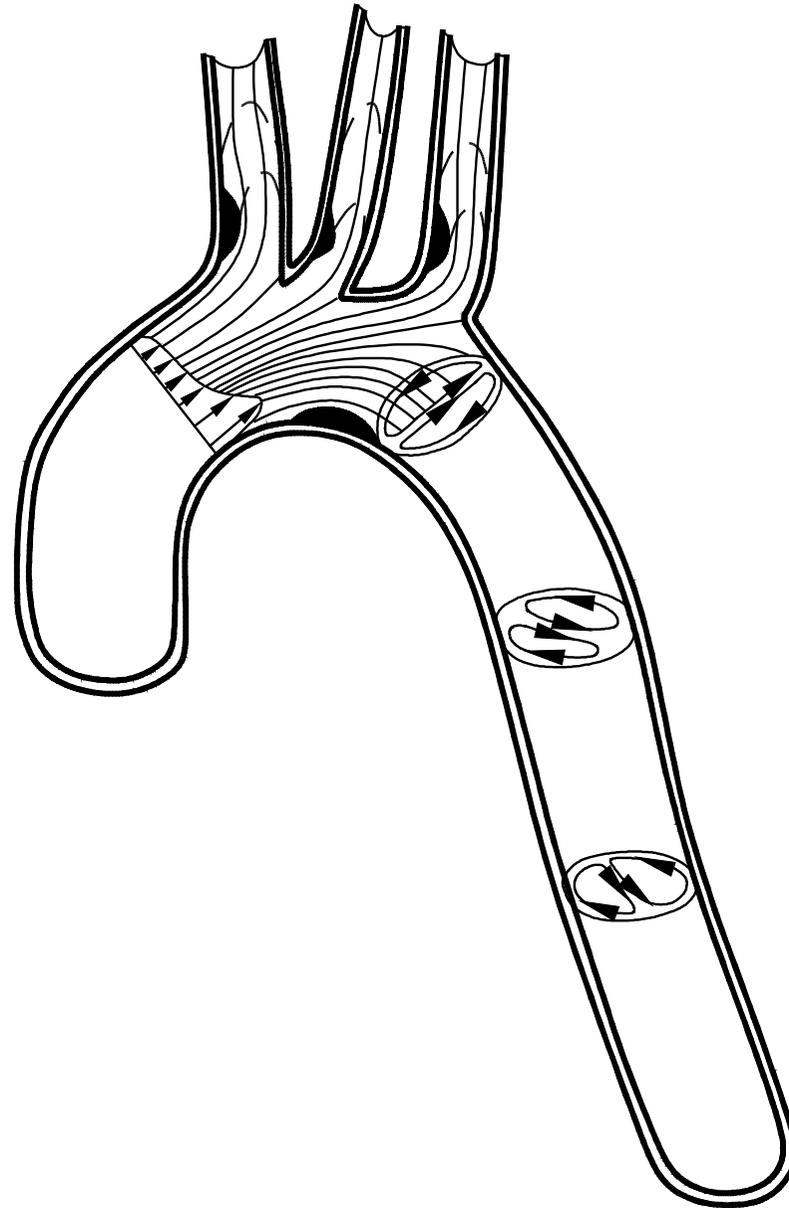
Film: Strömungsablösung am Profil



Sekundärströmung im gekrümmten Rohr



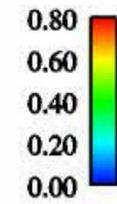
Strömung in der menschlichen Aorta



Film: Herz-Aortenströmung



VEL



Kontinuitätsgleichung

Volumenelement in Strömung

Massenströme am Volumenelement

Navier-Stokes-Gleichungen

Impulsströme am Volumenelement

Normal- und Schubspannungen am Volumenelement

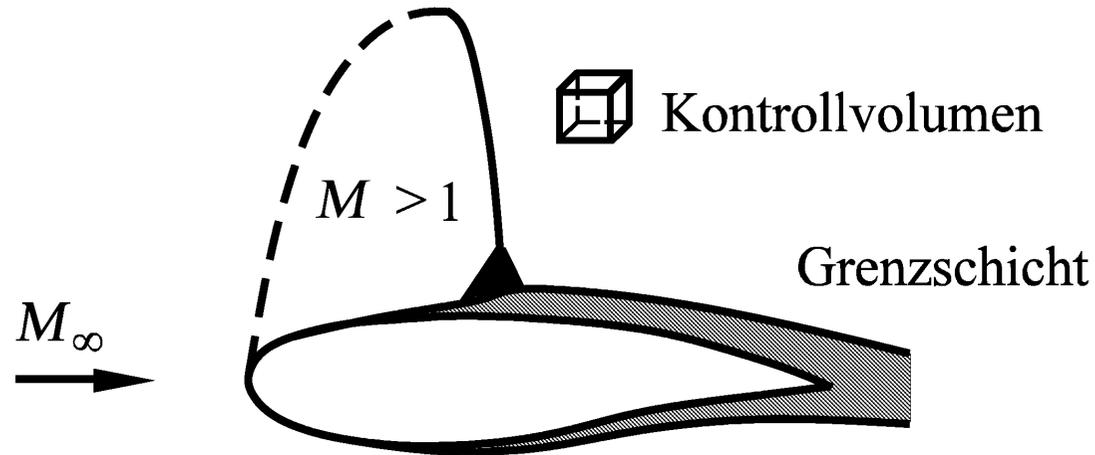
Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen

Film: Navier-Stokes-Gleichung

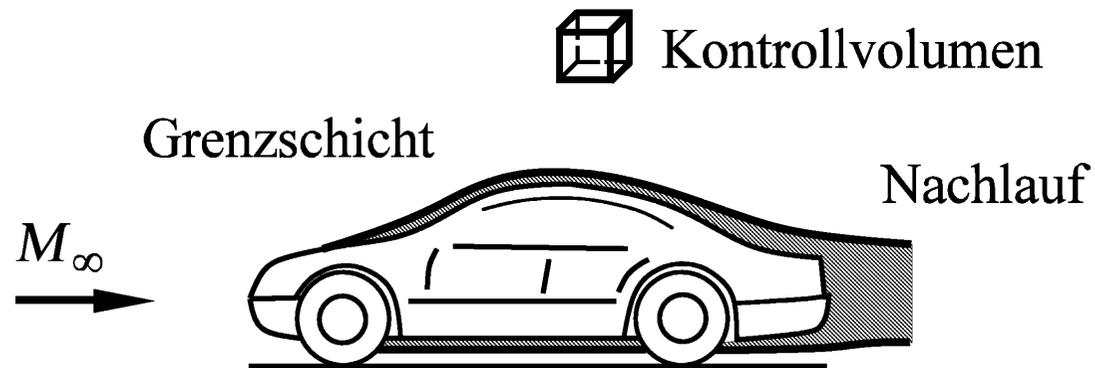


Volumenelement in einer Tragflügel- und Kraftfahrzeugumströmung

kompressible Strömung



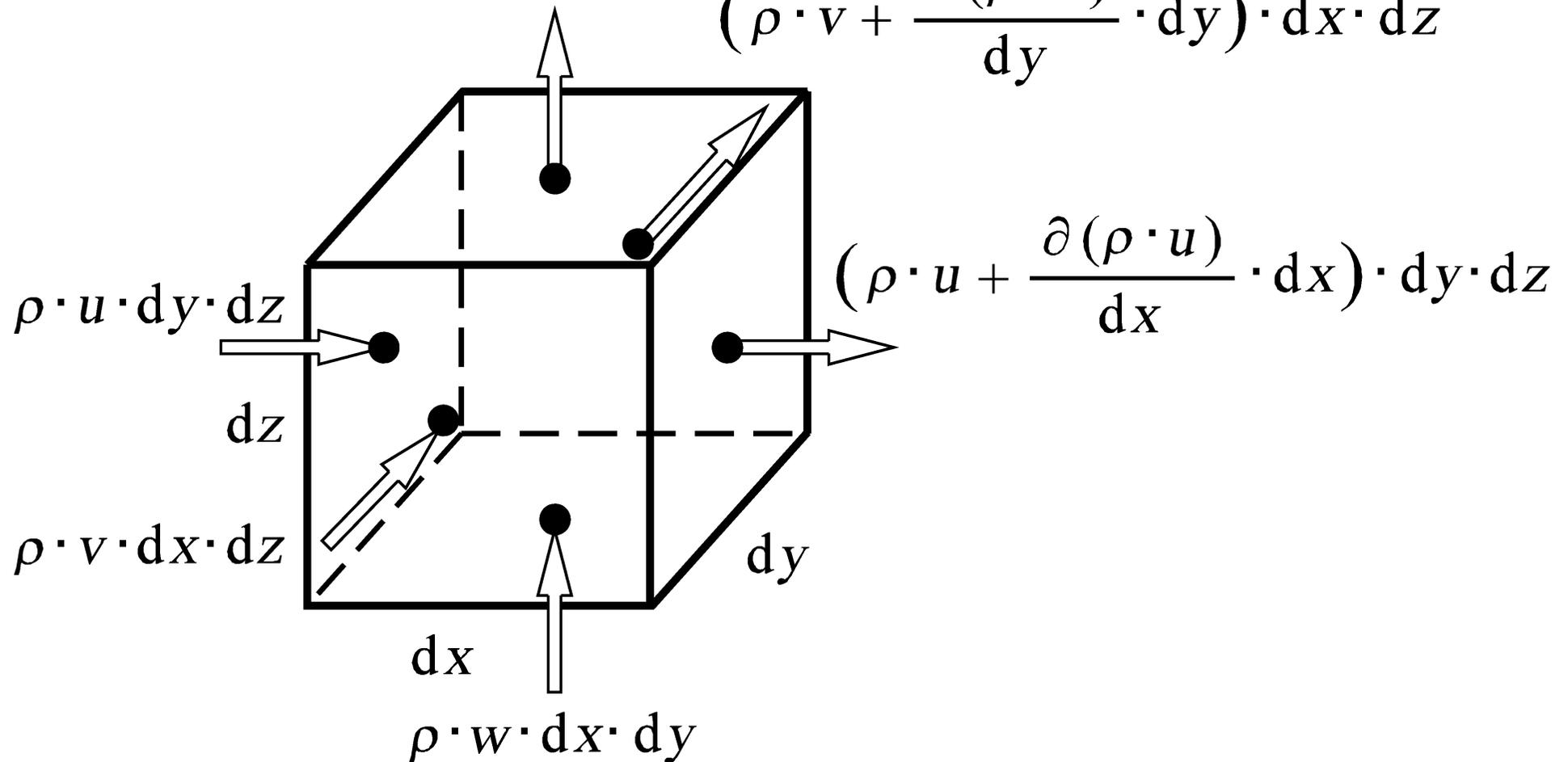
inkompressible Strömung



Ein- und ausströmende Massenströme

$$\left(\rho \cdot w + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot dx \cdot dy$$

$$\left(\rho \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} \cdot dy \right) \cdot dx \cdot dz$$



Ein- und austretende Impulsströme

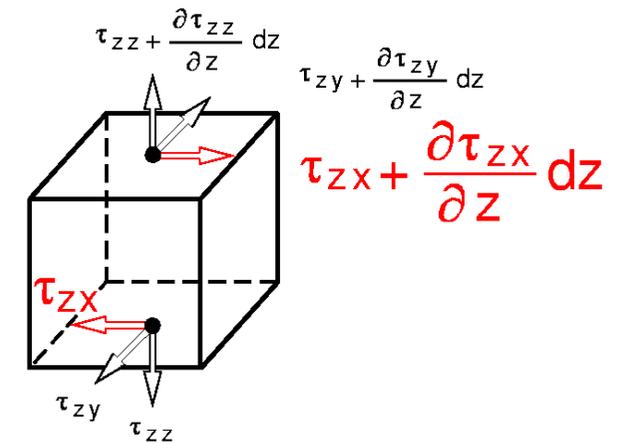
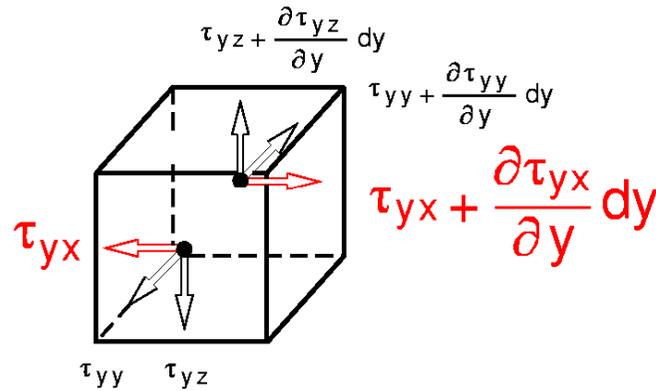
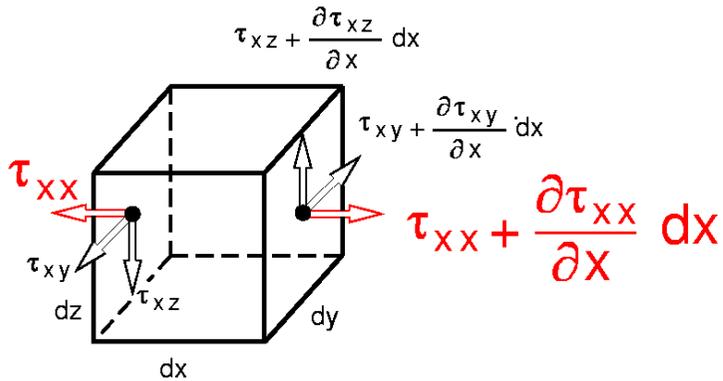
$\rho \cdot w \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot w \cdot u)}{\partial x} dx$
 $\rho \cdot v \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot u)}{\partial x} dx$
 $\rho \cdot u \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot u)}{\partial x} dx$

$\rho \cdot w \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot w \cdot v)}{\partial y} dy$
 $\rho \cdot v \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot v)}{\partial y} dy$
 $\rho \cdot u \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot v)}{\partial y} dy$

$\rho \cdot w \cdot w + \frac{\partial(\rho \cdot w \cdot w)}{\partial z} dz$
 $\rho \cdot v \cdot w + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot w)}{\partial z} dz$
 $\rho \cdot u \cdot w + \frac{\partial(\rho \cdot u \cdot w)}{\partial z} dz$



Normal- und Schubspannungen



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	✓	✓	✓	✓



Film: Navier-Stokes-Gleichungen

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

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



Energiegleichung

Konvektive Energieströme am Volumenelement

Zeitliche Mittelung

Tragflügelströmung

Zeitlich gemittelte Größen

Zusammenfassung

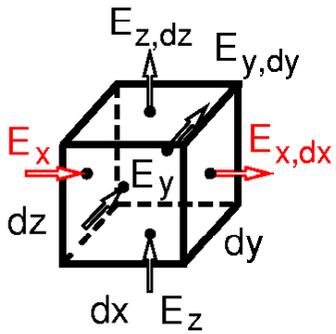
Film: 33 Jahre Strömungsmechanik

Software

Software: Kommerzielle Software
StarCD



Konvektive Energieströme am Volumenelement



$$E_x = \rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot u \cdot dy \cdot dz$$

$$E_y = \rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot v \cdot dx \cdot dz$$

$$E_z = \rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot w \cdot dx \cdot dy$$

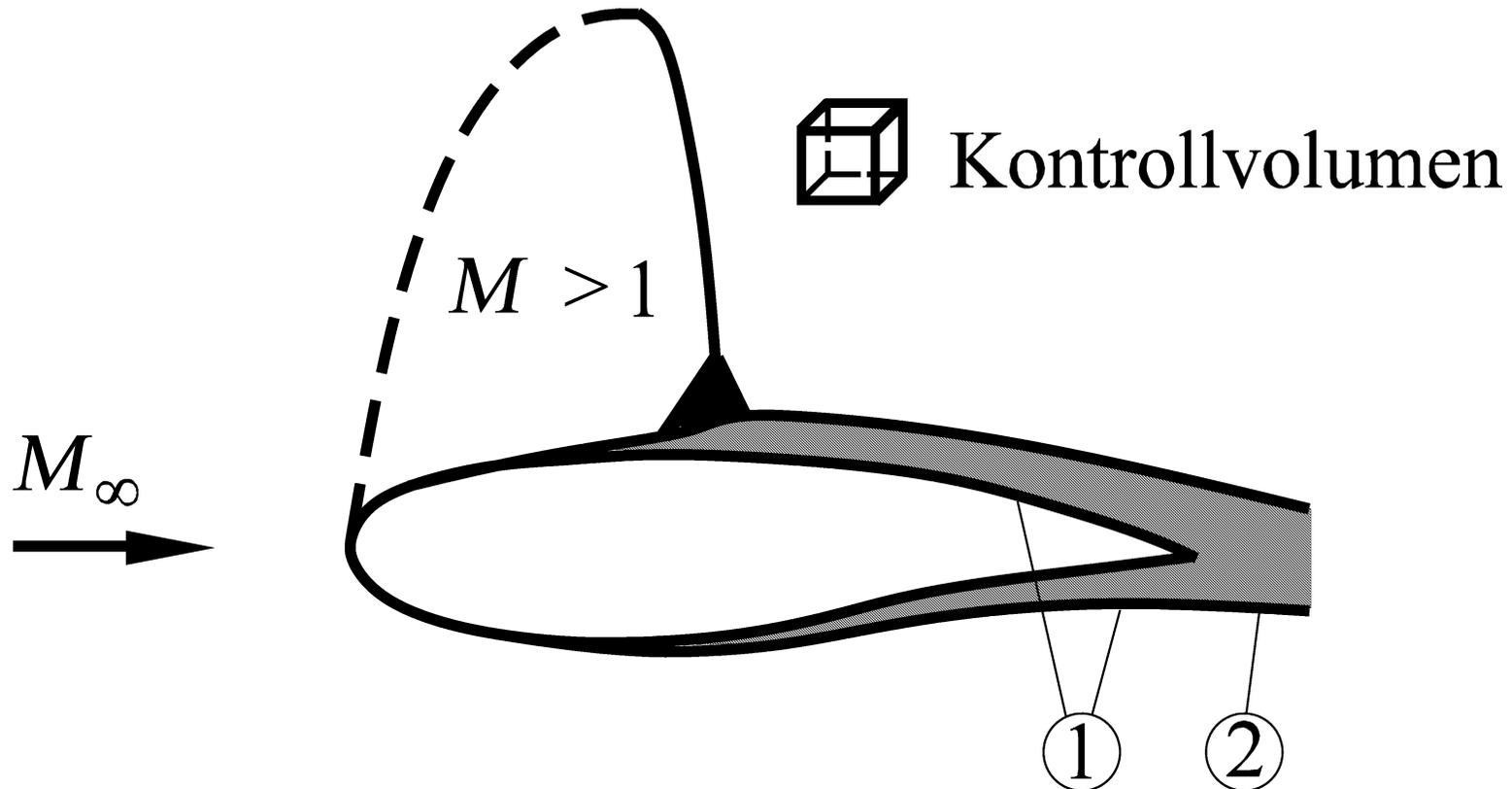
$$E_{x,dx} = \left(\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot u + \frac{\partial \left(\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot u \right)}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dy \cdot dz$$

$$E_{y,dy} = \left(\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot v + \frac{\partial \left(\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot v \right)}{\partial y} \cdot dy \right) \cdot dx \cdot dz$$

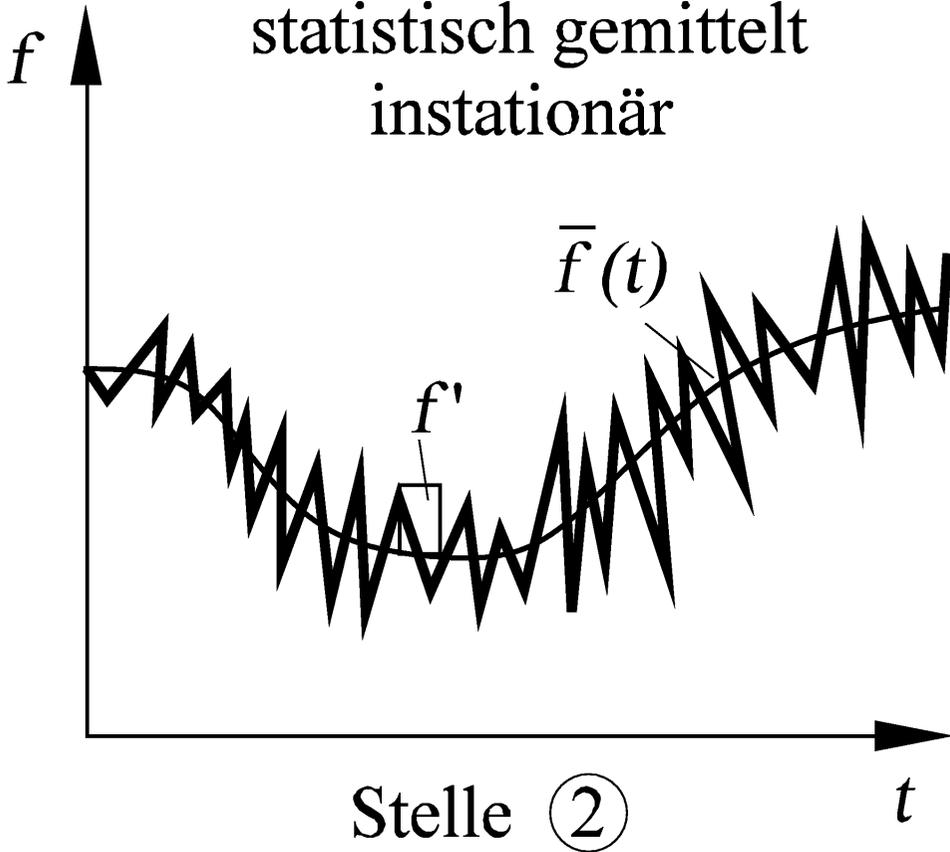
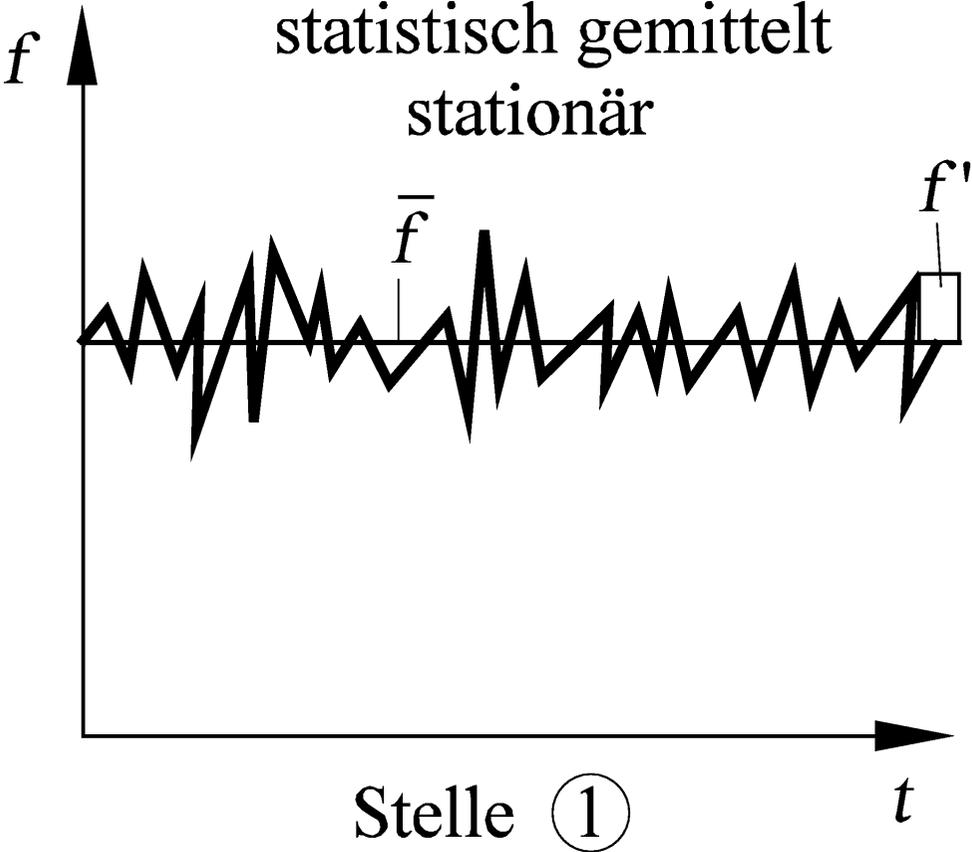
$$E_{z,dz} = \left(\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot w + \frac{\partial \left(\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \cdot w \right)}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot dx \cdot dy$$



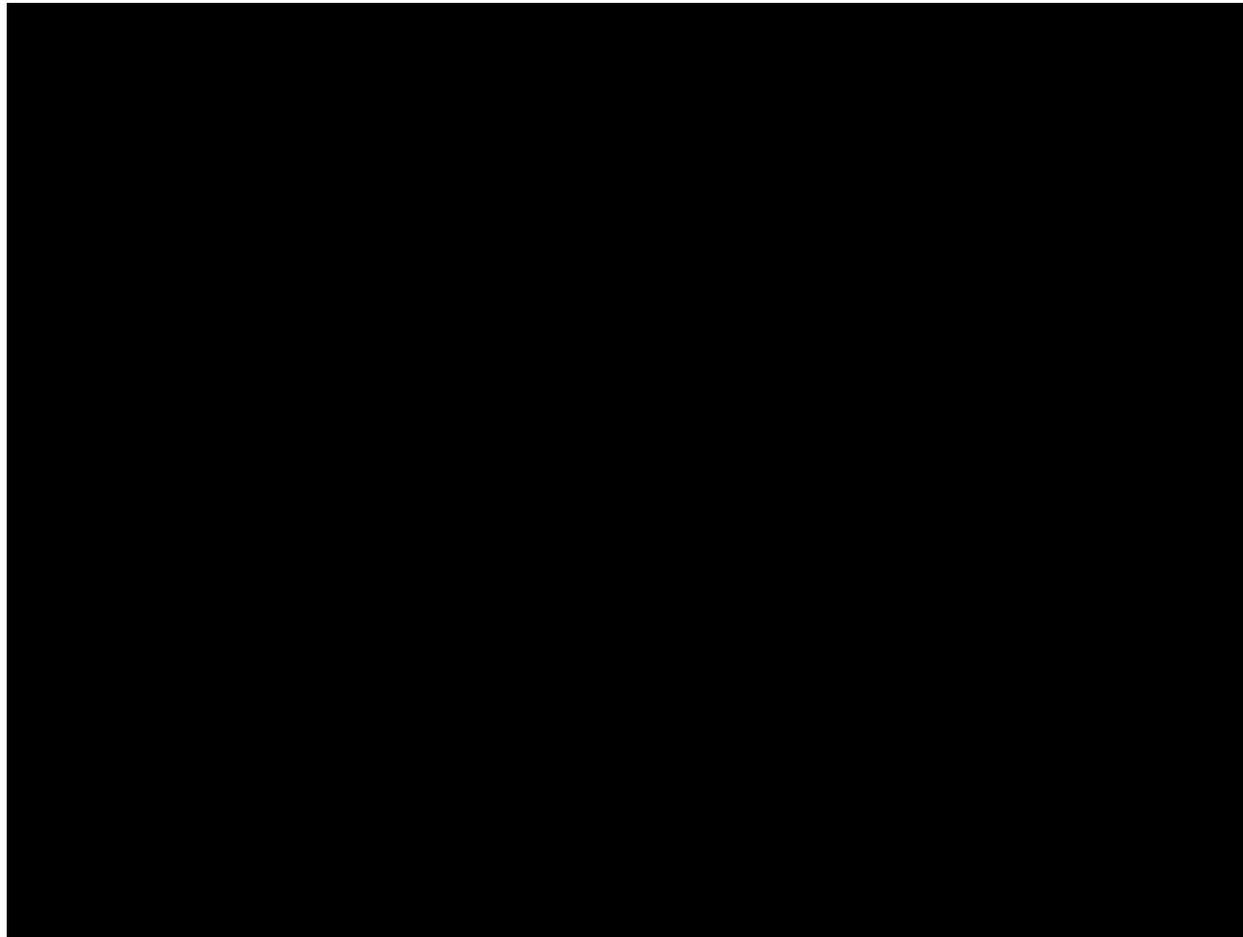
Tragflügelströmung



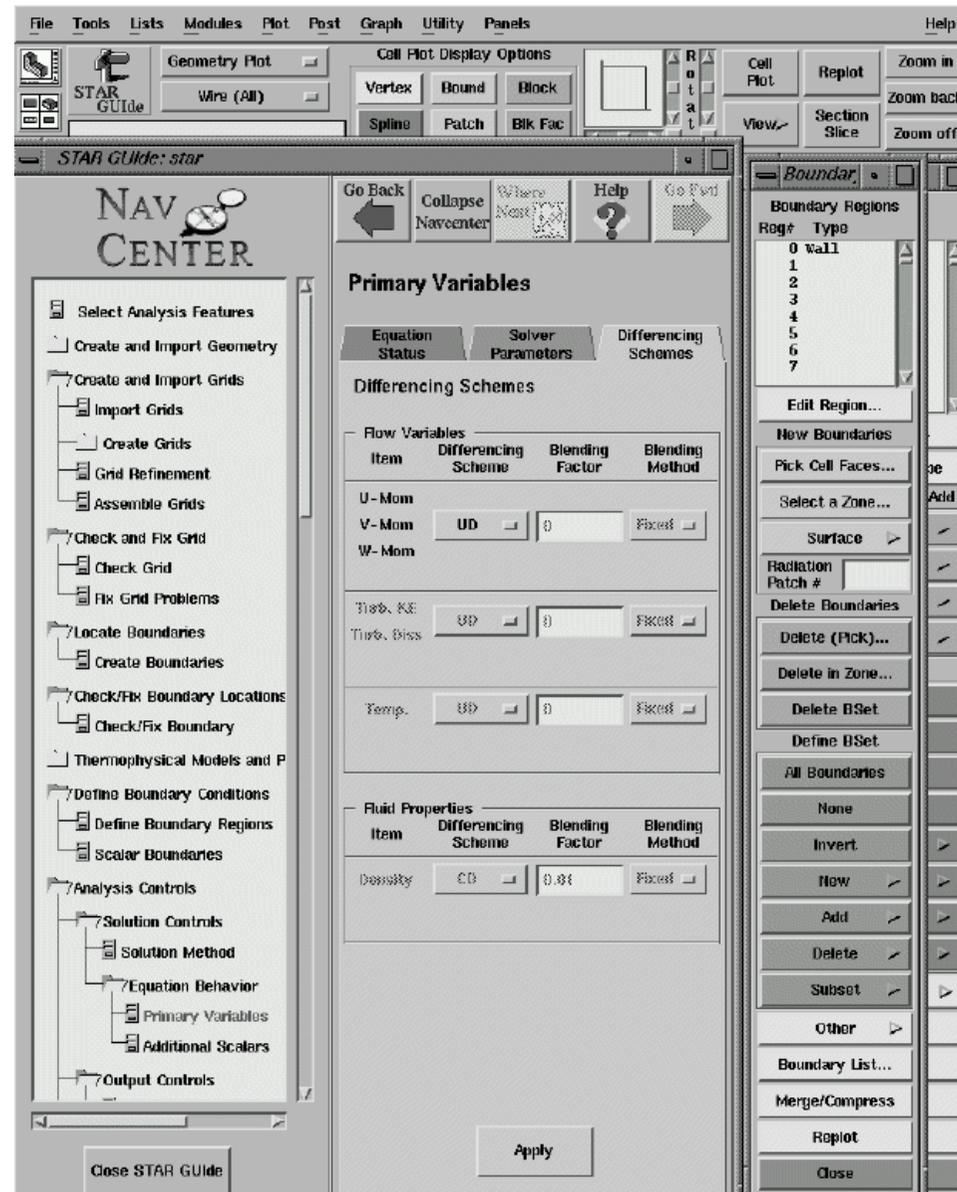
Zeitlich gemittelte Größen



Film: 33 Jahre Strömungsmechanik



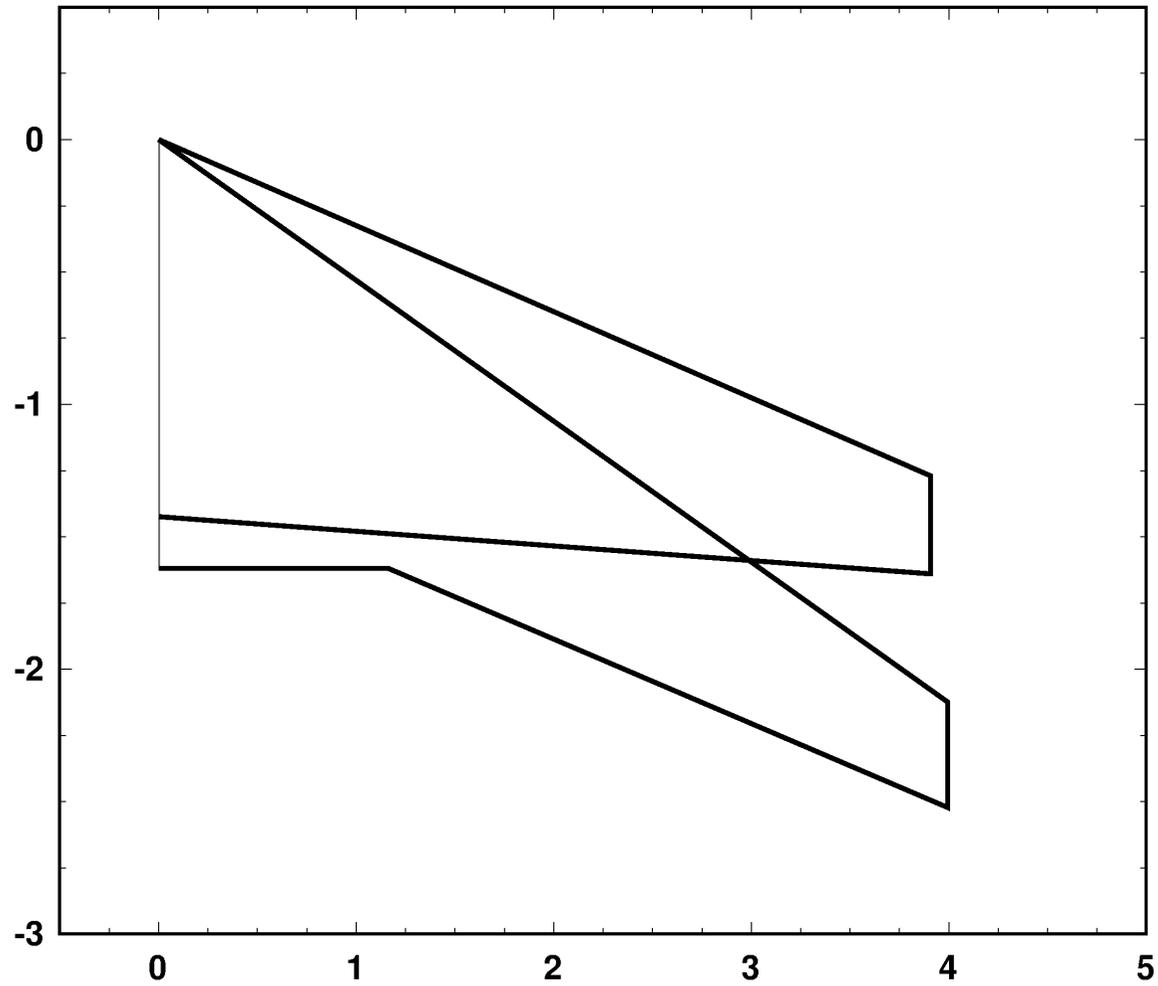
Software: Kommerzielle Software StarCD



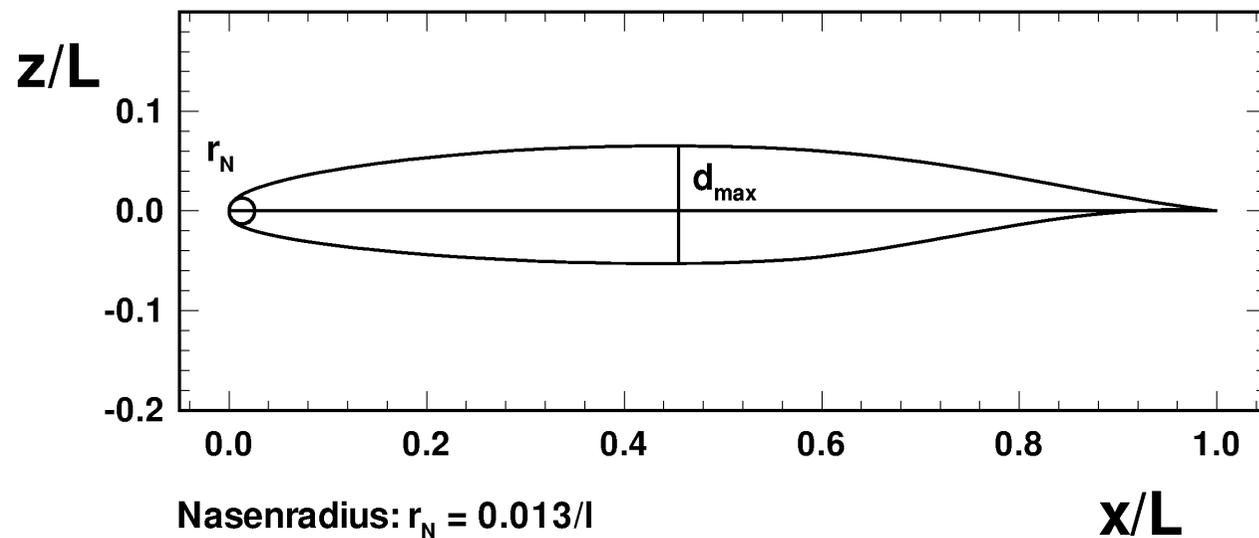
Software



Software



LVA1 - Profil



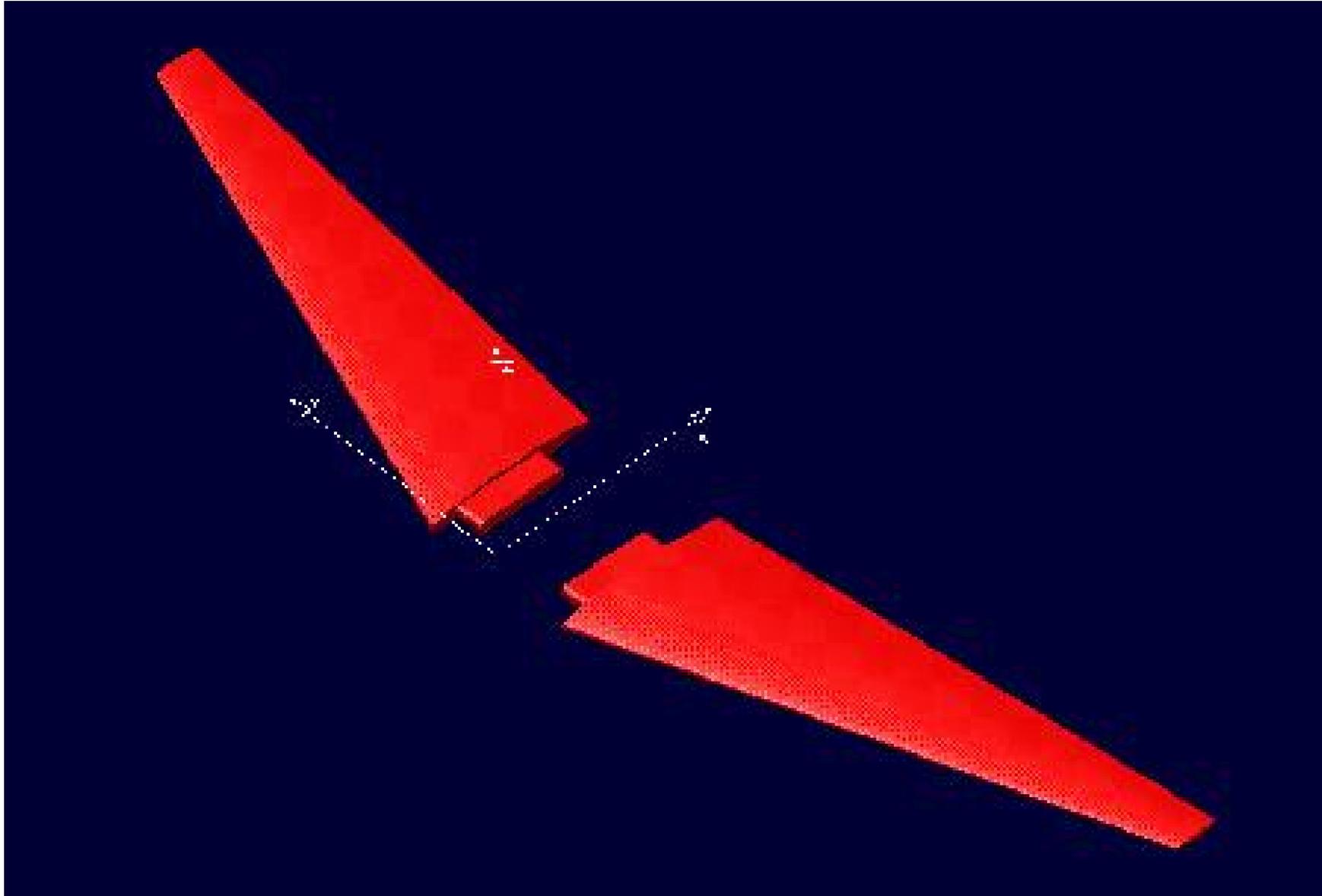
Nasenradius: $r_N = 0.013/l$

Dickenrücklage: $x_d = 0.455$

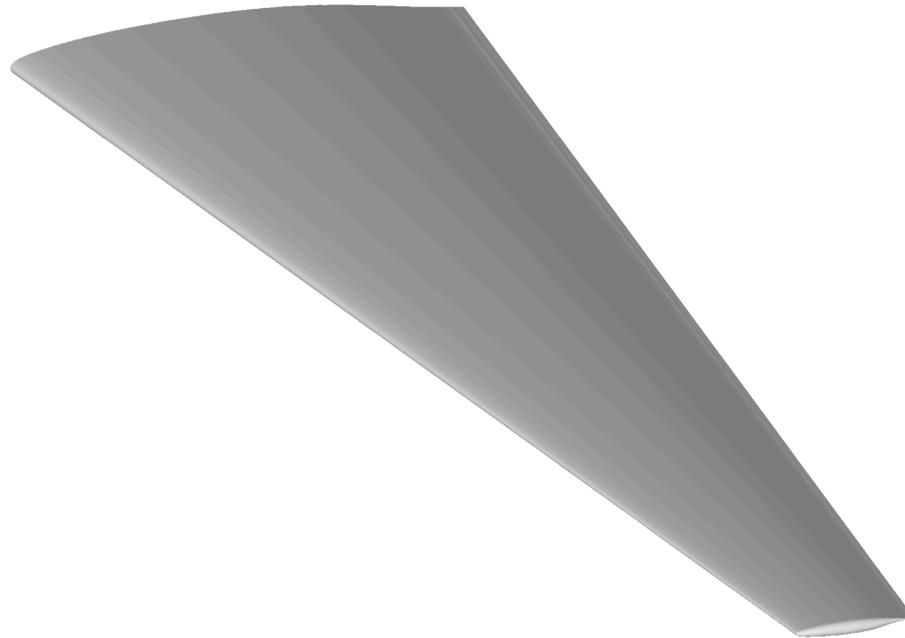
max. Dicke: $d_{max} = 0.116$



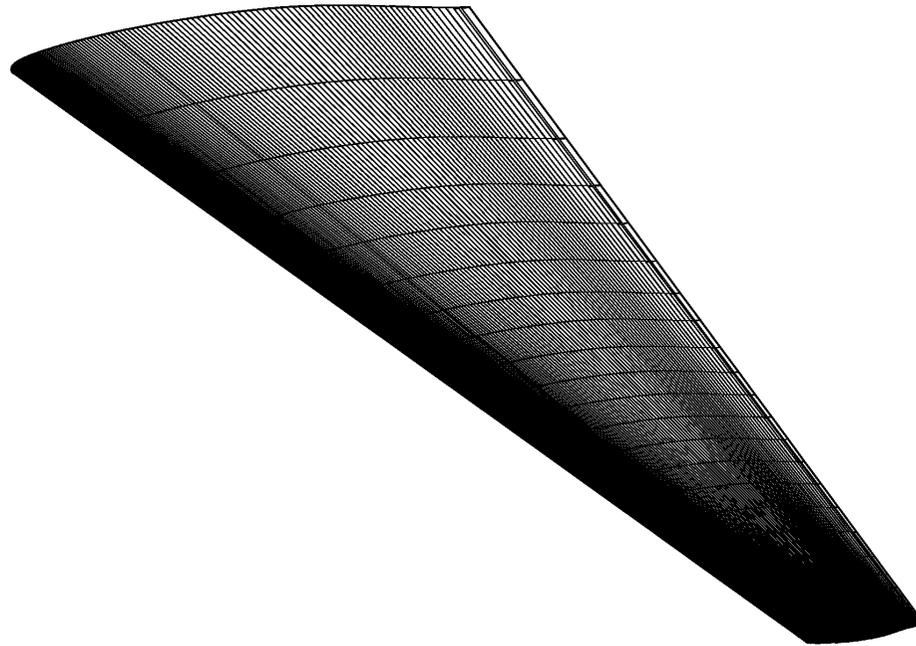
Software



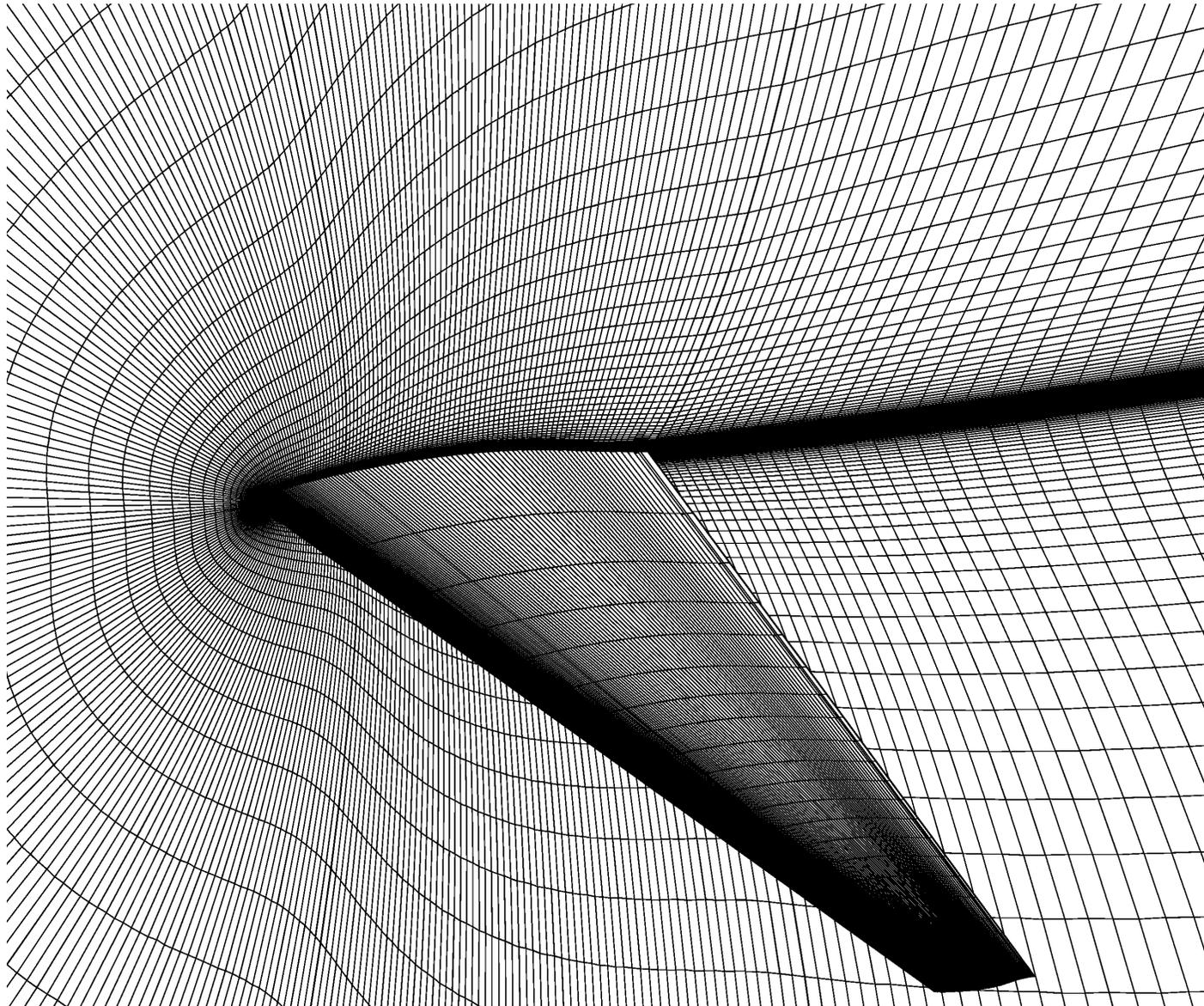
Software



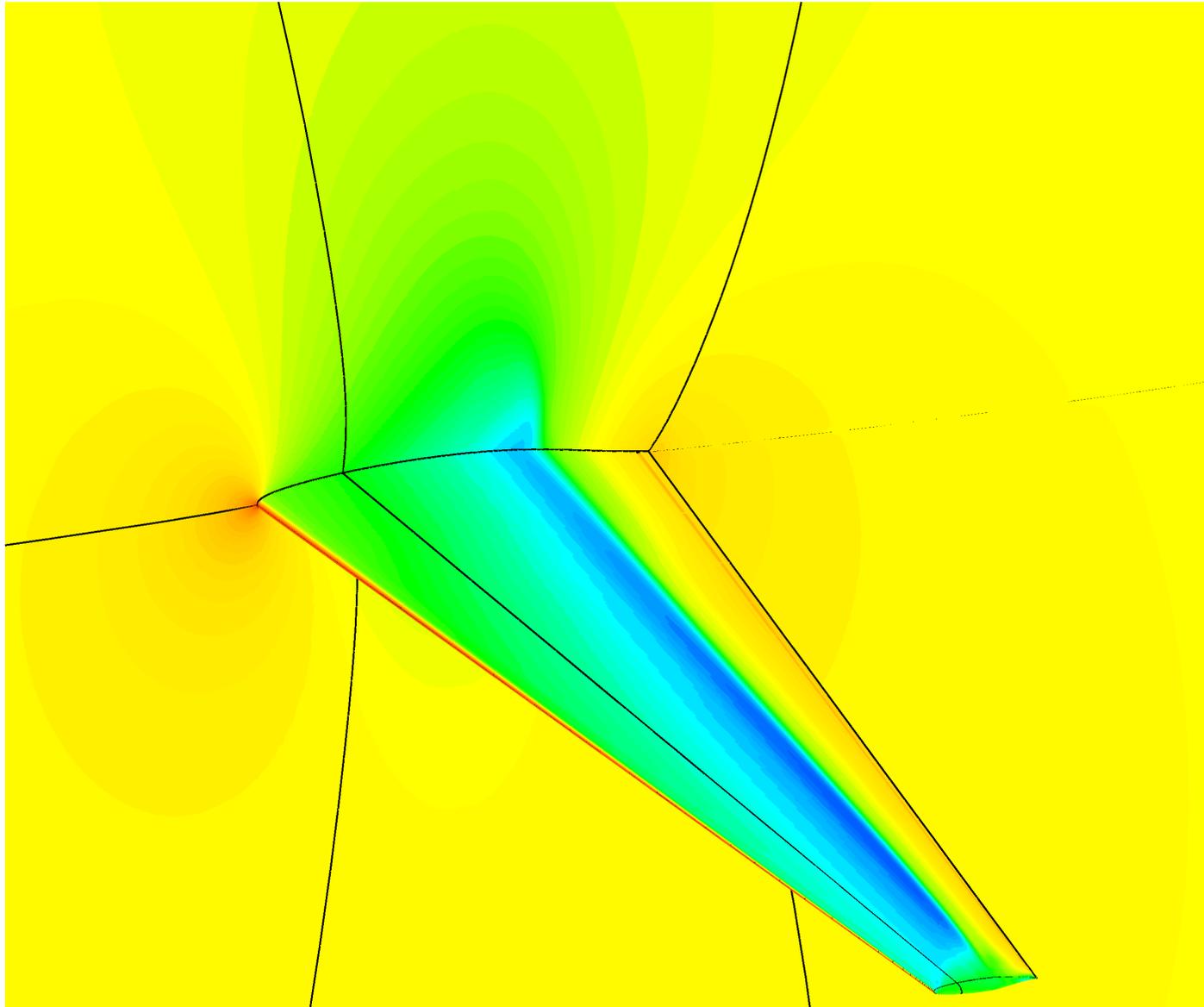
Software



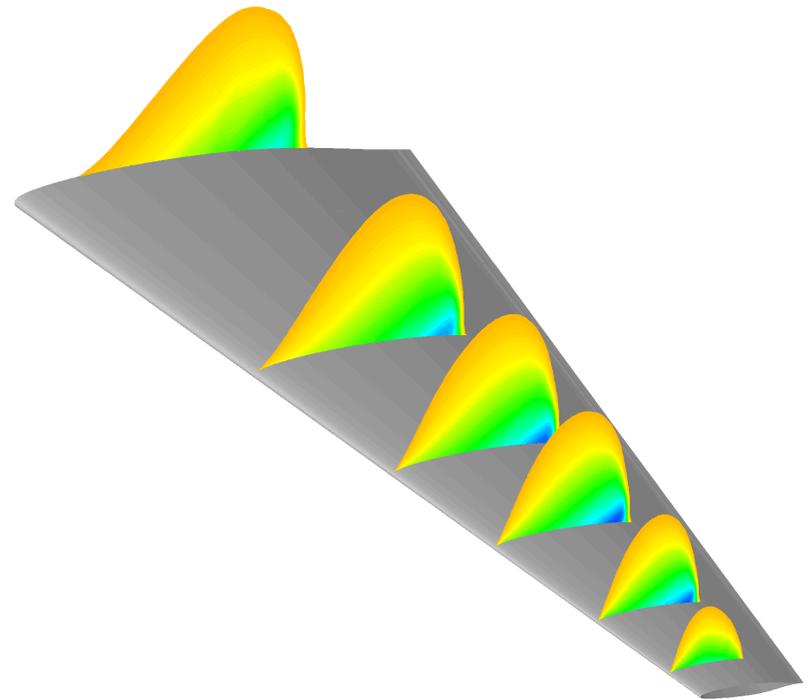
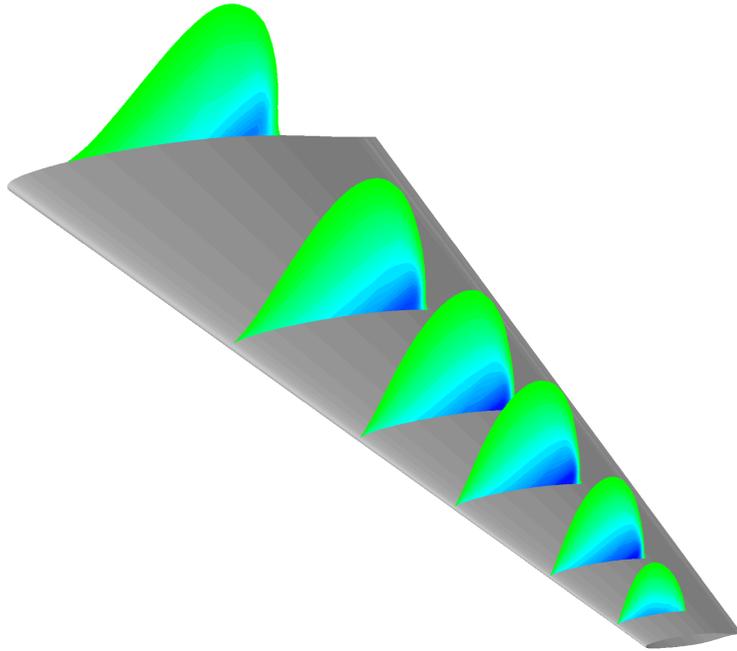
Software



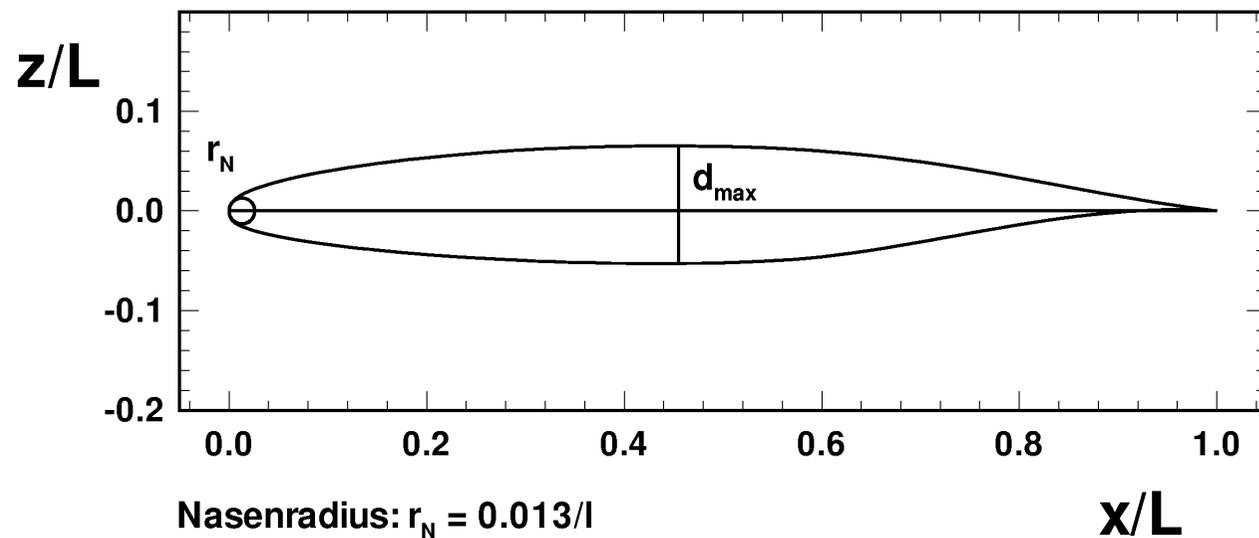
Software



Software



LVA1 - Profil



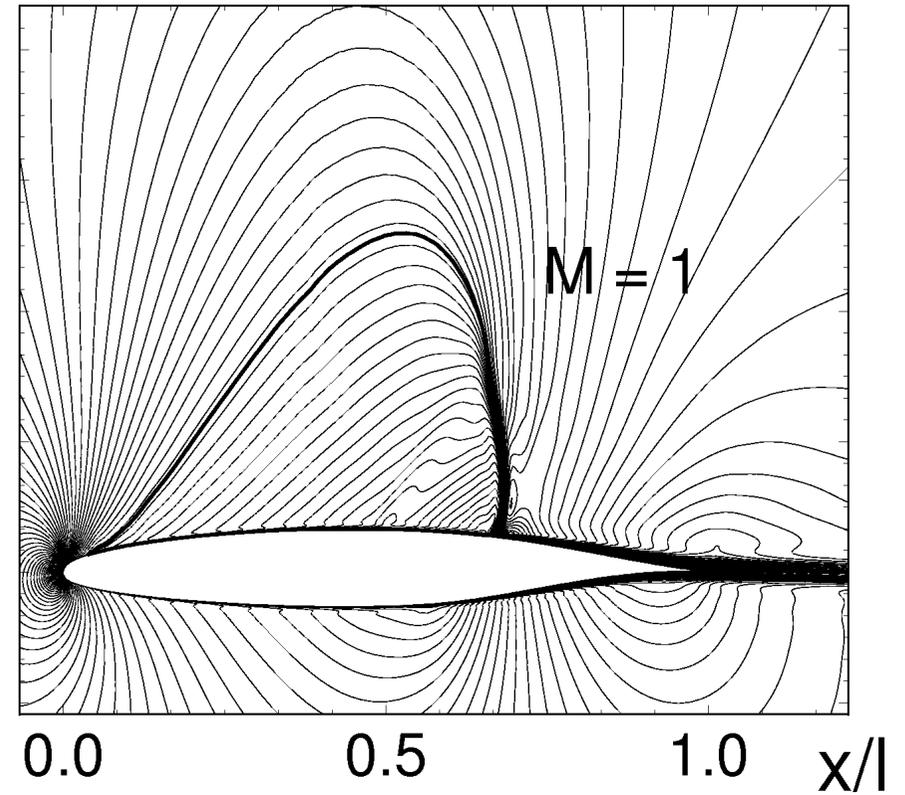
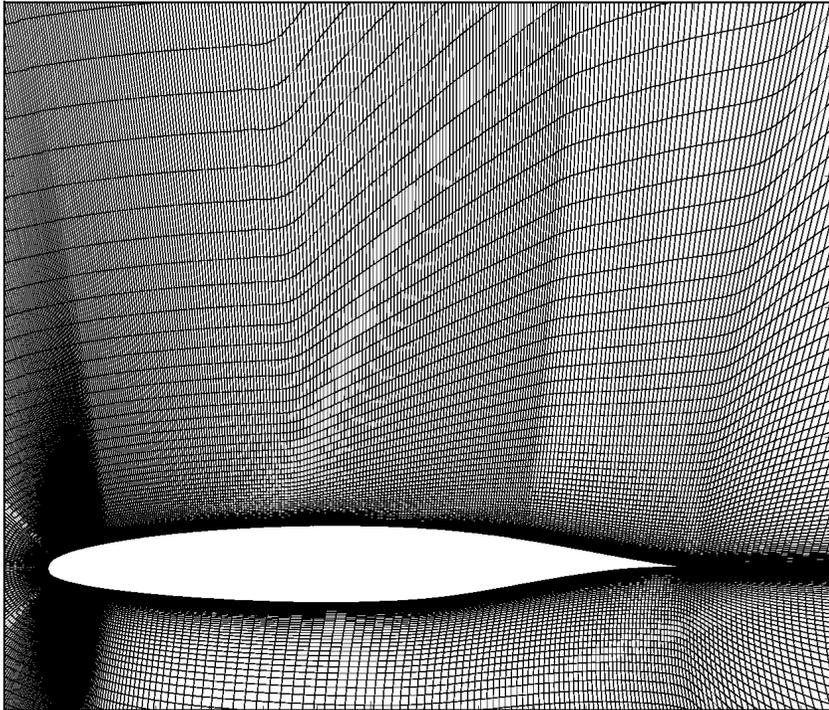
Nasenradius: $r_N = 0.013/l$

Dickenrücklage: $x_d = 0.455$

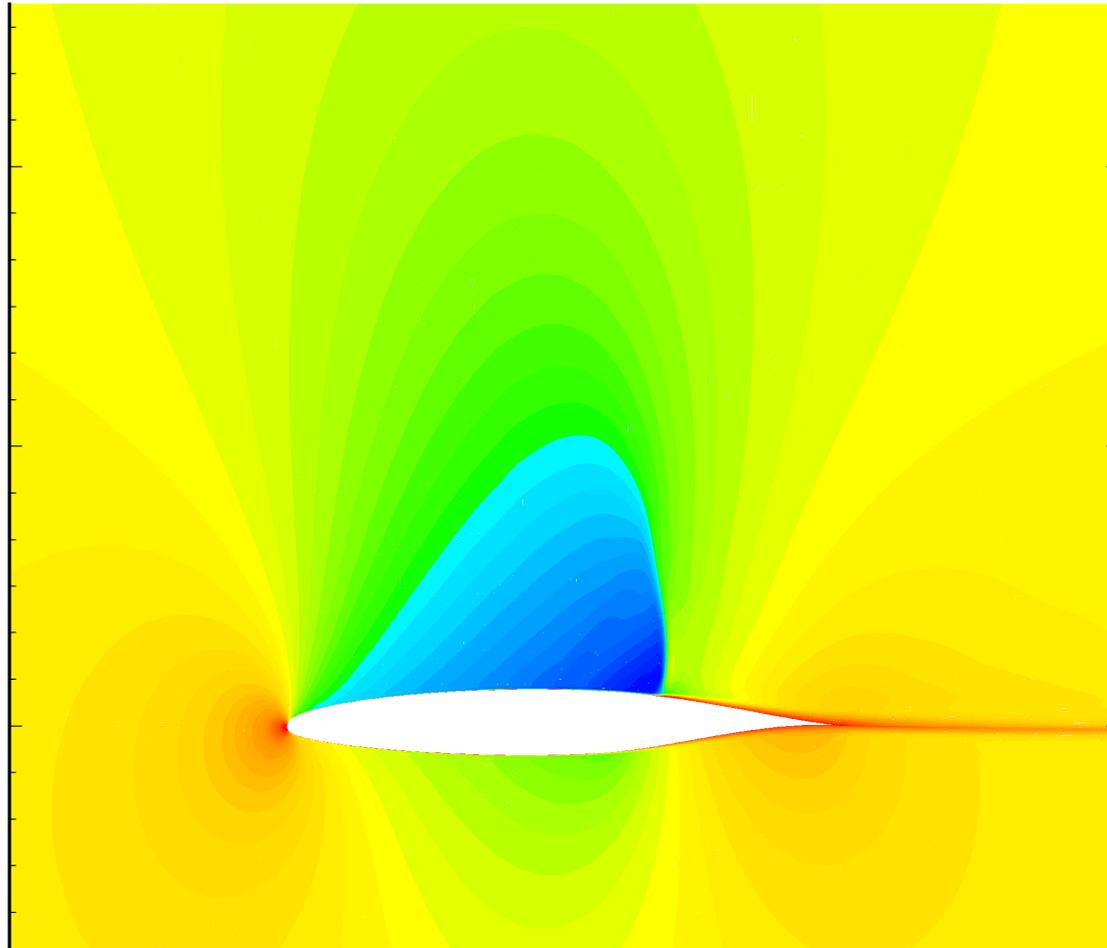
max. Dicke: $d_{max} = 0.116$

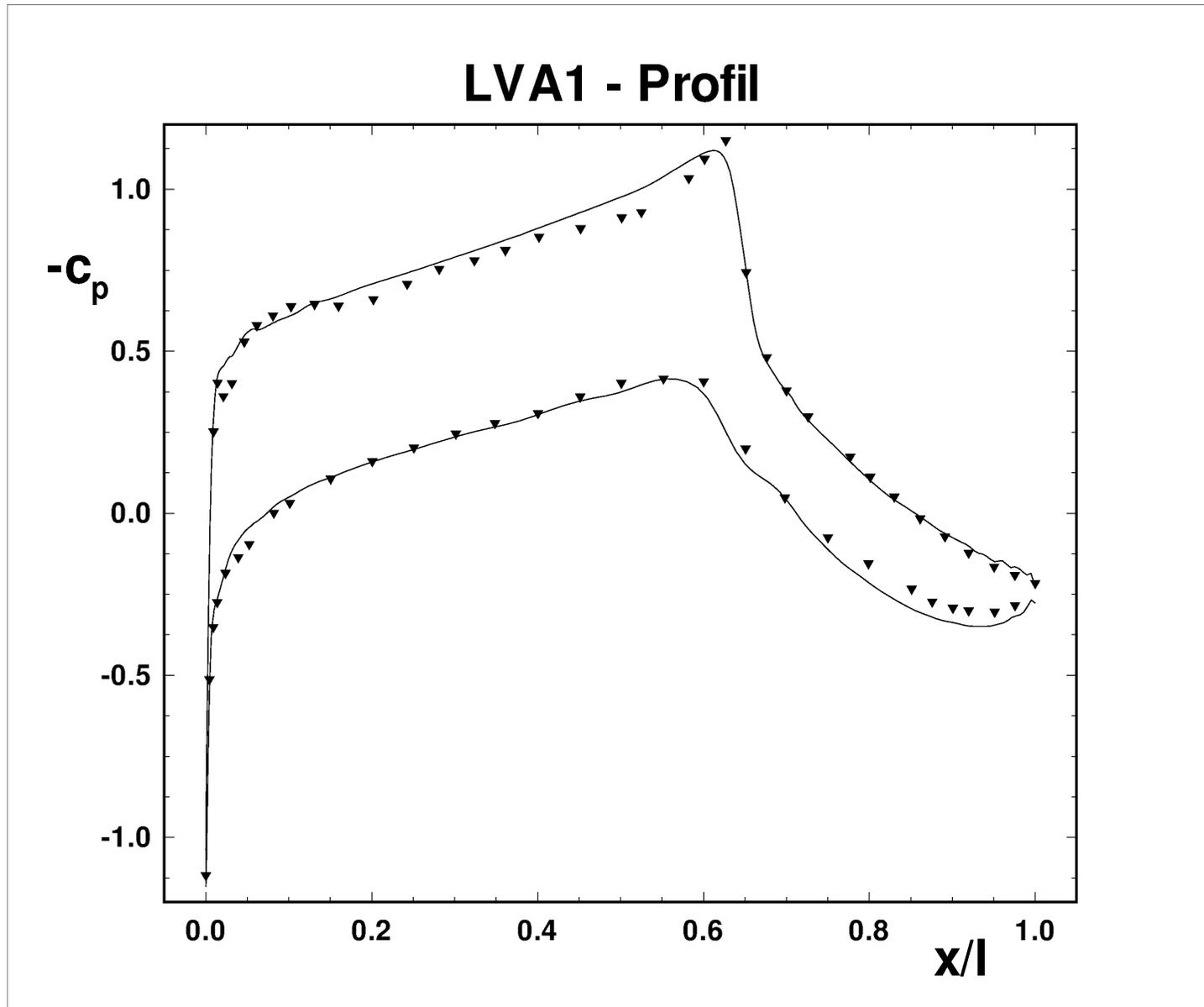


Software

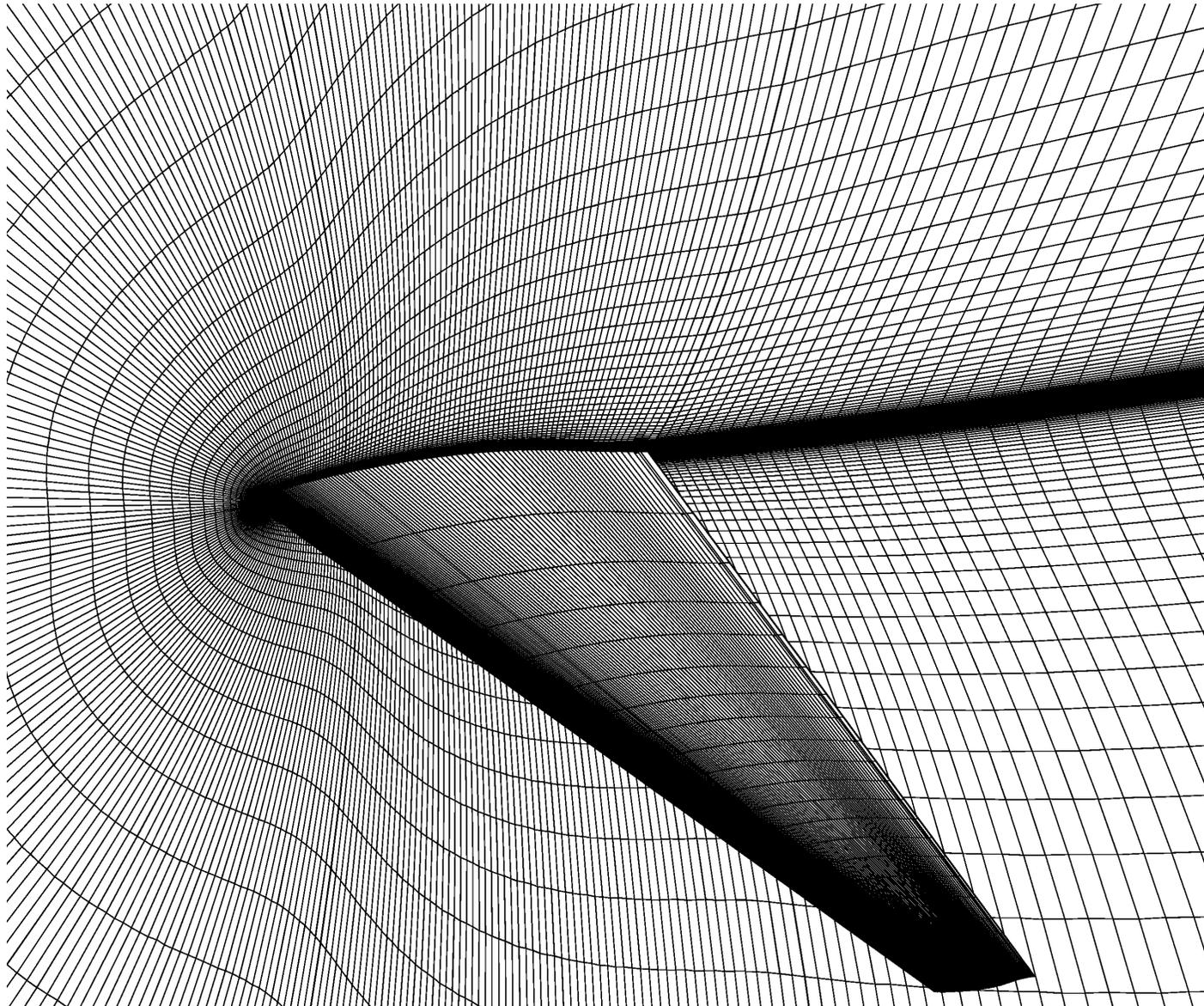


Software

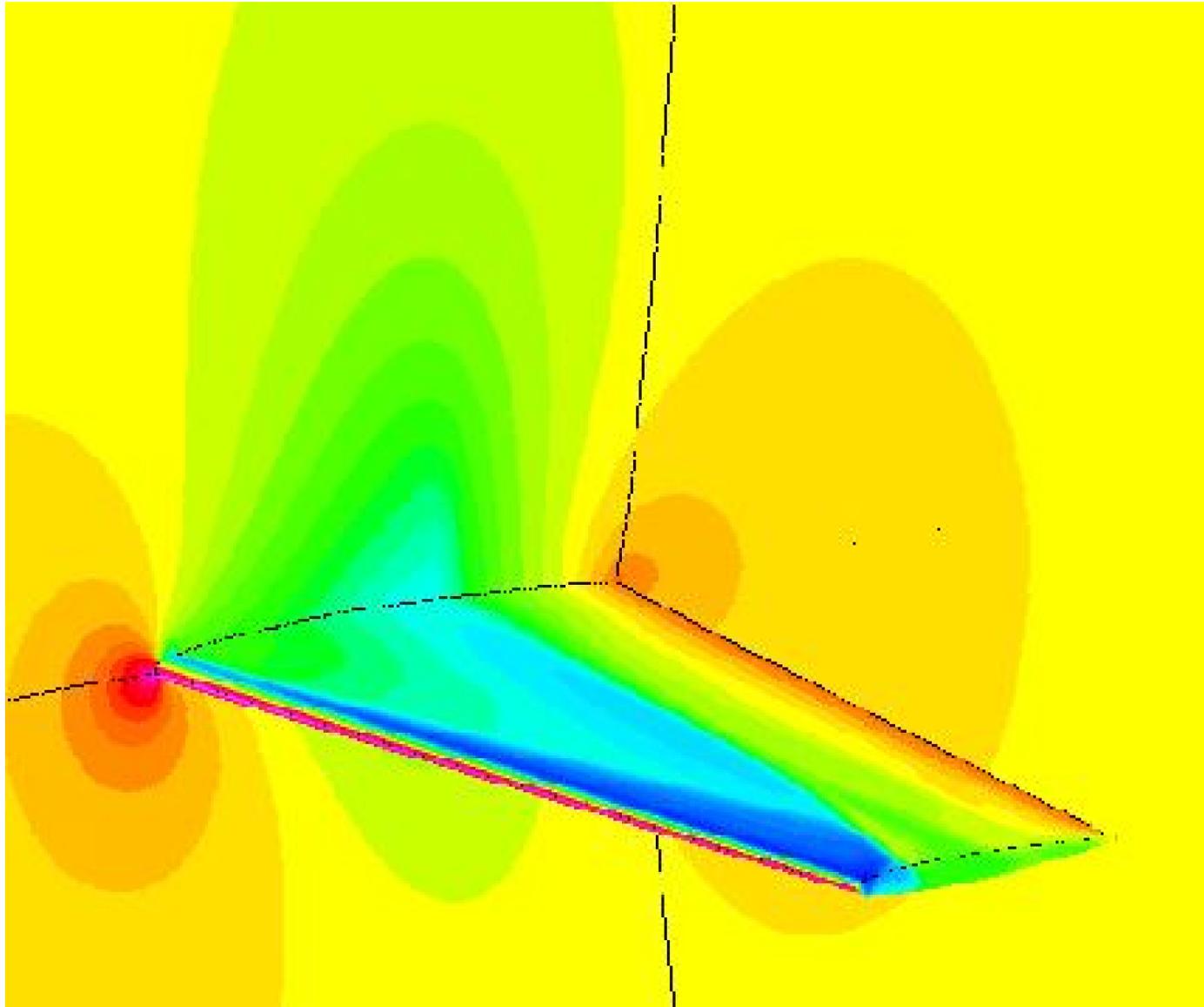




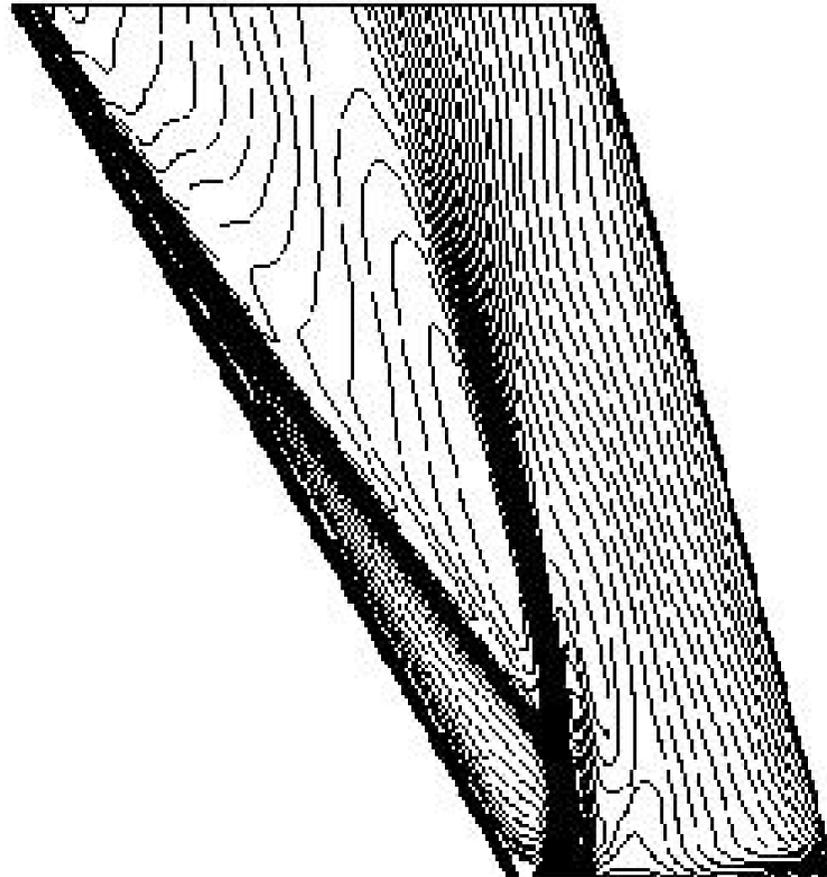
Software



Software



Software



Software

