

# Physik des Fliegens

- [\[PHY01\] Grundlagen der Aerodynamik](#)
- [\[PHY02\] Grundlagen der Flugmechanik](#)

# [PHY01] Grundlagen der Aerodynamik

Zur Vervollständigung der Seite steht die [Präsentation](#) zur Verfügung.

Dieses Modul aus der [Kategorie: Physik des Fliegens](#) behandelt die Grundlagen der *Aerodynamik*, eines der beiden Teilgebiete der Flugphysik (das zweite Teilgebiet stellt die *Flugmechanik* dar, die im folgenden Modul [Grundlagen der Flugmechanik \(PHY02\)](#) behandelt wird). Dafür werden keine anderen Module vorausgesetzt.

Die Aerodynamik als Teilgebiet der Strömungsmechanik befasst sich ganz allgemein mit Strömungen von Gasen, wobei dieses Modul sich mit der Luftströmung um ein Flugzeug beschäftigt. Wesentliche Aspekte sind dabei die Entstehung der beiden von der Strömung auf das Flugzeug ausgeübten Kräfte *Auftrieb* und *Widerstand* sowie deren Einflussfaktoren. Zunächst werden jedoch einige allgemeine Grundlagen erläutert bevor auf diese beiden Kräfte genauer eingegangen wird. Als Vorbemerkung sei erwähnt, dass zur Entstehung des Auftriebs (und auch zu anderen Aspekten der Flugphysik) einige falsche Theorien sehr weit verbreitet sind. Obwohl diese Theorien die Entstehung des Auftriebs nicht korrekt erklären, sollen hier trotzdem drei typische weit verbreitete falsche Theorien kurz erläutert werden. Dies ist aus zwei Gründen sinnvoll: Erstens kann dadurch Verwirrung vermieden werden, wenn man beim Nachlesen in der Literatur auf eine dieser falschen Theorien stößt; zweitens hilft ein genaueres Verständnis, warum diese Theorien die Entstehung des Auftriebs nicht korrekt erklären, auch zu verstehen, wie sich die Entstehung des Auftriebs denn tatsächlich erklären lässt.

Theorie 1: Wird demnächst hinzugefügt.

Theorie 2: Wird demnächst hinzugefügt.

Theorie 3: Wird demnächst hinzugefügt.

## Allgemeine Grundlagen

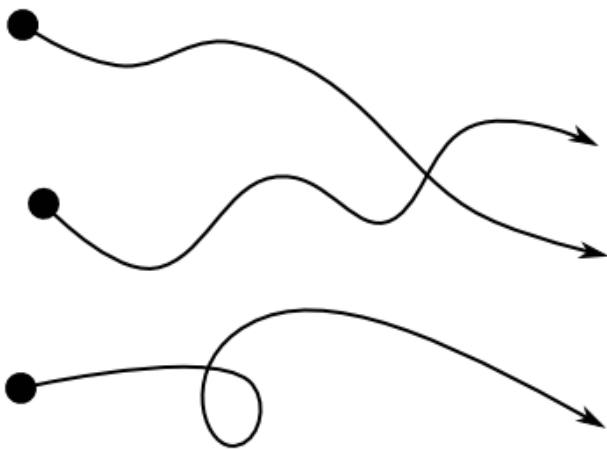
Es folgen zunächst einige ausgewählte Begriffsdefinitionen und andere allgemeine Grundlagen, die für das Verständnis der Inhalte in diesem Modul von besonderer Bedeutung sind. Bei den Definitionen ist hier weniger die exakte (mathematische) Definition relevant, sondern eher das darauf basierende gedankliche Modell, wie man sich das Verhalten von Strömungen vorstellen

kann.

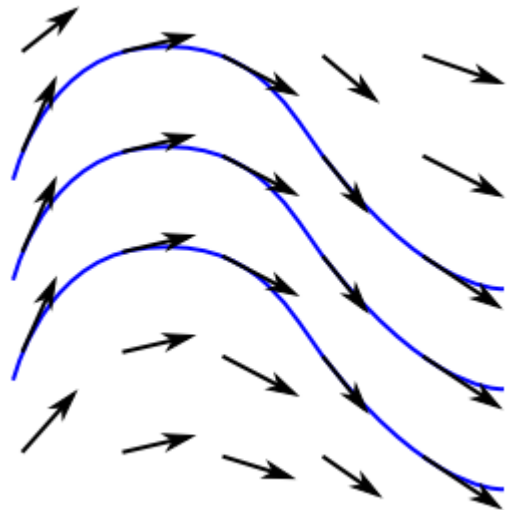
# Bahnlinien und Stromlinien

Strömungen werden oftmals durch verschiedene Arten von charakteristischen Linien bildlich dargestellt, von denen zwei hier näher erläutert werden sollen.

Die Abbildung auf der linken Seite zeigt sogenannte *Bahnlinien* für eine beispielhafte Strömung bestehend aus drei Luftteilchen. Die Bahnlinien stellen dabei die aufgezeichnete Bewegung der einzelnen Teilchen dar, was man sich so vorstellen kann, als würden die Teilchen bei ihrer Bewegung eine sichtbare Spur hinterlassen. Wie im Beispiel gezeigt, können Bahnlinien von verschiedenen Teilchen sich kreuzen - dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die Teilchen sich dort treffen, da sie den Kreuzungspunkt auch zu unterschiedlichen Zeiten erreichen können. Wie anhand des untersten Teilchens verdeutlicht, kann eine Bahnlinie auch sich selbst kreuzen, wenn ein Teilchen sich zum Beispiel im Kreis bewegt und den Kreuzungspunkt zu einem späteren Zeitpunkt wieder passiert. Die Verwendung von Bahnlinien für die bildliche Darstellung einer Strömung rückt also die einzelnen Teilchen in den Fokus - diese Art der Darstellung wird jedoch in der Aerodynamik selten verwendet, da in den üblicherweise betrachteten Luftmassen die Anzahl der Teilchen so enorm groß ist und die Teilchen selbst so enorm klein sind, dass die strömende Luftmasse sich besser wie ein sogenanntes "Kontinuum" beschreiben lässt (also wie eine zusammenhängende "zähe Masse") als wie ein loser Haufen von Teilchen.



Bahnlinien



Stromlinien

Ein Beispiel, bei dem tatsächlich die Darstellung einer Strömung mit Hilfe von Bahnlinien sinnvoll ist, ist ein Raumschiff im Weltall. Dort ist prinzipiell ein Vakuum (also ein luftleerer Raum) vorhanden und nur ganz vereinzelt begegnet das Raumschiff einem Luftteilchen, so dass die Bewegung dieser einzelnen Teilchen sinnvollerweise mit Hilfe von Bahnlinien dargestellt werden kann. Sobald man sich allerdings in der Atmosphäre befindet (und dies gilt auch für die dünnen Luftschichten in der oberen Atmosphäre), findet man so viele Luftteilchen dicht aneinander gedrängt, dass die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen für das Verhalten der Strömung

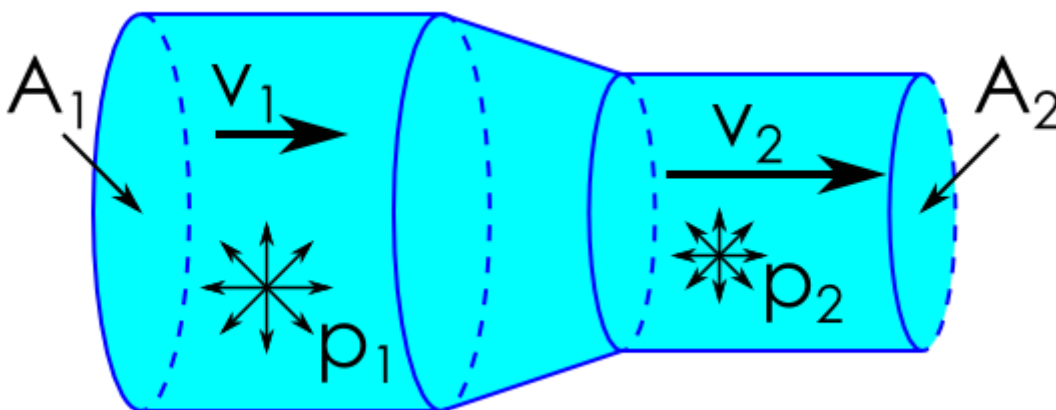
wichtiger sind als die Eigenschaften der Teilchen selbst.

Daher wird in der Flugphysik üblicherweise eine andere Art der Darstellung bevorzugt, um Strömungen zu beschreiben: Die sogenannten *Stromlinien*. Dabei wird die Strömung als ein Vektorfeld dargestellt, wobei die Stromlinien so definiert sind, dass in jedem Punkt des Vektorfeldes der jeweilige Geschwindigkeitsvektor tangential an der Stromlinie anliegt, wie in der Abbildung auf der rechten Seite dargestellt. Diese mathematische Definition steht hier jedoch nicht im Vordergrund, sondern das Verständnis der zugrunde liegenden Modellvorstellung. Der entscheidende Unterschied ist, dass bei der Darstellung einer Strömung mit Hilfe von Stromlinien im Gegensatz zu Bahnlinien nicht die einzelnen Teilchen im Vordergrund stehen, sondern die Strömung als Kontinuum betrachtet wird. Bei der Darstellung einer Strömung durch Bahnlinien ist die Anzahl der Bahnlinien durch die Anzahl der betrachteten Teilchen vorgegeben, da es für jedes Teilchen genau eine zugeordnete Bahnlinie gibt - im Gegensatz dazu kann bei einer Darstellung durch Stromlinien die Anzahl der Stromlinien beliebig festgelegt werden und hängt nur von der gewünschten räumlichen Auflösung ab. In der Abbildung auf der rechten Seite könnte beispielsweise die Strömung mit einer feineren Auflösung dargestellt werden, indem zwischen den Pfeilen und Linien noch weitere Pfeile und Linien eingezeichnet werden. Theoretisch können zwischen zwei Stromlinien unendlich viele weitere Stromlinien eingezeichnet werden; in der Praxis muss also eine sinnvolle Anzahl der Stromlinien selbst gewählt werden. Ein weiterer Unterschied zwischen Stromlinien und Bahnlinien ist, dass Stromlinien sich im Gegensatz zu Bahnlinien per Definition niemals kreuzen können, da ansonsten im Kreuzungspunkt der Geschwindigkeitsvektor nicht eindeutig definiert wäre. Die Bedeutung dieser Eigenschaft wird im folgenden Abschnitt bei der Betrachtung einer sogenannten *Stromröhre* deutlich werden.

Zusammenfassend lässt sich also sagen: Auch wenn Luft bei genauerem Hinsehen tatsächlich aus einer Vielzahl von kleinen Teilchen besteht, so erzielt man mit der Modellvorstellung einer "zähen Masse" in den meisten Anwendungsfällen ein deutlich besseres Verständnis für das Verhalten einer Luftströmung als mit der Modellvorstellung eines losen Haufens von Teilchen.

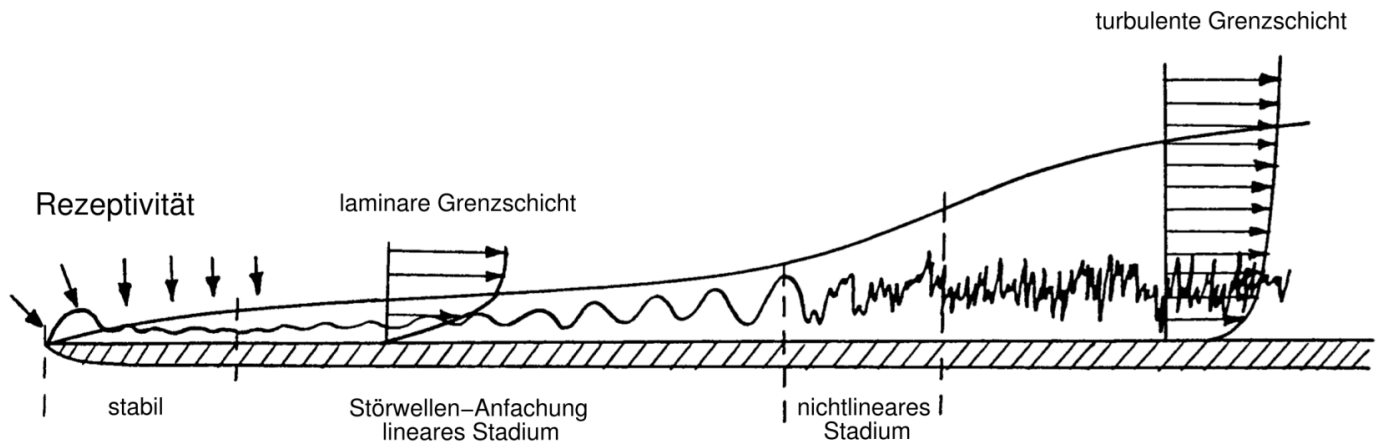
## Stromröhre

Wird demnächst hinzugefügt.



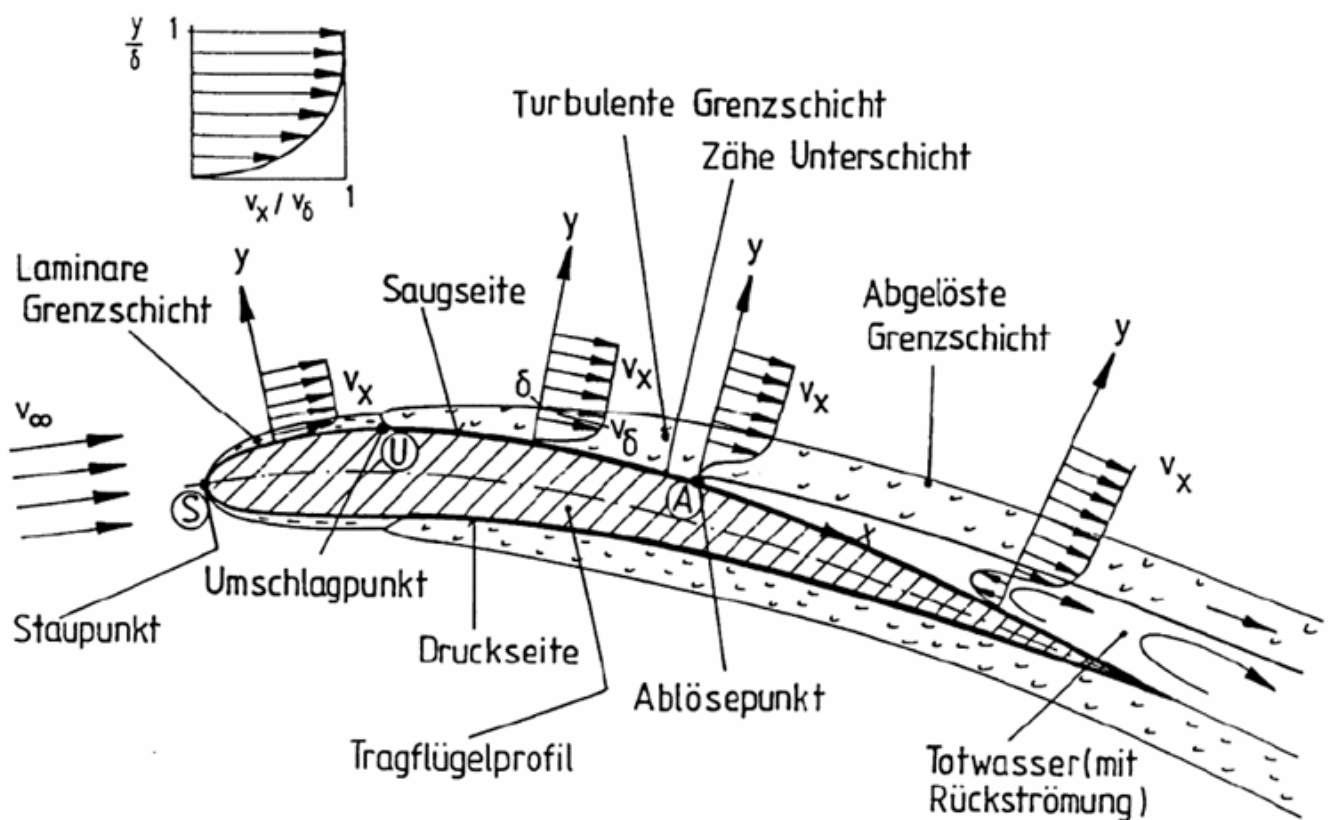
# Grenzschicht und Außenströmung

Wird demnächst hinzugefügt.



[1]

Wird demnächst hinzugefügt.

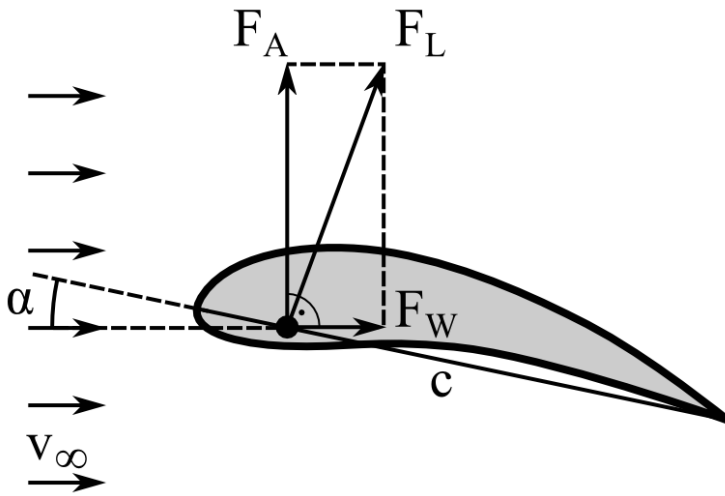


[2]

Wird demnächst hinzugefügt.

# Wichtige Definitionen

Wird demnächst hinzugefügt.



## Auftrieb

In diesem Abschnitt wird genauer auf den Auftrieb an einer Flugzeugtragfläche eingegangen. Dabei wird mit dem Begriff *Auftrieb* hier stets der *dynamische Auftrieb* bezeichnet - in Abgrenzung zum *statischen Auftrieb*, der beispielsweise von Ballonen und Luftschiffen genutzt wird.

## Grundprinzip des dynamischen Auftriebs

Wird demnächst hinzugefügt.

[Druckpunktwanderung kurz erwähnen]

[Anfahrwirbel, Zirkulation und Wirbelschleppen kurz erwähnen]

## Einflussfaktoren des Auftriebs

Wird demnächst hinzugefügt.

## Einflussfaktoren des Auftriebsbeiwertes

Wird demnächst hinzugefügt.

# Strömungsabriss

Wird demnächst hinzugefügt.

# Widerstand

Wird demnächst hinzugefügt.

[Einteilung des Widerstands kurz erwähnen]

# Reibungswiderstand und Druckwiderstand

Wird demnächst hinzugefügt.

# Interferenzwiderstand

Wird demnächst hinzugefügt.

# Induzierter Widerstand und Nullwiderstand

Wird demnächst hinzugefügt.

# Einflussfaktoren des Widerstands

Wird demnächst hinzugefügt.

# Einflussfaktoren des Widerstandsbeiwertes

Wird demnächst hinzugefügt.

[Typische Nullwiderstandsbeiwerte besonders betrachten]

[Induzierten Widerstandsbeiwert besonders betrachten]

# Widerstandspolare

Wird demnächst hinzugefügt.

# Tragflächengeometrie

Wird demnächst hinzugefügt.

# Profilformen

Wird demnächst hinzugefügt.

# Flügelgrundrisse

Wird demnächst hinzugefügt.

# Schränkung

Wird demnächst hinzugefügt.

# Quellenverzeichnis

[1]: Lutz, T.: Skript Profilentwurf, Universität Stuttgart, 2008

[2]: Schlüter, M.: Skript Strömungsmechanik I, TUHH, 2013

[3]: Denker, John S.: See How It Flies. <http://www.av8n.com/how/> (Abruf: 19.04.2017)

[4]: Weinholtz, Fred W. et al.: Der Segelflugzeugführer – Aus- und Weiterbildung, Luftfahrtverlag, 9. Auflage, Juni 2006

[5]: Hahn, K.-U.: Skript Flugmechanik, TUHH, 2014



# [PHY02] Grundlagen der Flugmechanik

Zur Vervollständigung der Seite steht die [Präsentation](#) zur Verfügung.

Dieses Modul aus der [Kategorie: Physik des Fliegens](#) behandelt die Grundlagen der *Flugmechanik*, eines der beiden Teilgebiete der Flugphysik (das zweite Teilgebiet stellt die *Aerodynamik* dar, die im vorigen Modul [Grundlagen der Aerodynamik \(PHY01\)](#) behandelt wird). Dafür wird das Modul [Grundlagen der Aerodynamik \(PHY01\)](#) vorausgesetzt. Das Modul wird als interaktiver Unterricht angeboten - allerdings sind dafür die folgenden Inhalte vorher im Selbststudium durchzuarbeiten, auf denen dann während des Unterrichts weiter aufgebaut werden kann.

Im vorigen Modul wurden ausführlich die Entstehung der beiden Kräfte Auftrieb und Widerstand aufgrund der Umströmung eines Flugzeugs sowie die entsprechenden Einflussfaktoren betrachtet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen der Aerodynamik beschreibt die Flugmechanik dann, wie ein Flugzeug sich im Raum bewegt, wenn diese beiden aerodynamischen Kräfte in Kombination mit weiteren Kräften auf das Flugzeug wirken. In der Aerodynamik lassen sich viele Phänomene in einem Windkanal betrachtet - in der Flugmechanik geht es im Gegensatz dazu also um die tatsächliche Bewegung des Flugzeugs in der Atmosphäre und schließlich insbesondere darum, wie diese Bewegung gesteuert werden kann, so dass die Flugmechanik für die Praxis des Fliegens von etwas größerer Bedeutung ist als die Aerodynamik. Trotzdem stellt die Aerodynamik dafür eine wichtige Grundlage dar, auf der in diesem Modul weiter aufgebaut wird.

Die Bewegung eines Flugzeugs wird in der Flugmechanik in die sogenannte *Längsbewegung* und *Seitenbewegung* unterteilt (diese beiden Begriffe werden später genauer erläutert), die jeweils wiederum in sogenannte *stationäre Flugzustände* und die *Dynamik* unterteilt sind (auch diese beiden Begriffe werden später genauer erläutert). Daraus ergeben sich vier Kapitel in diesem Modul:

- Stationäre Flugzustände der Längsbewegung
- Dynamik der Längsbewegung
- Stationäre Flugzustände der Seitenbewegung
- Dynamik der Seitenbewegung

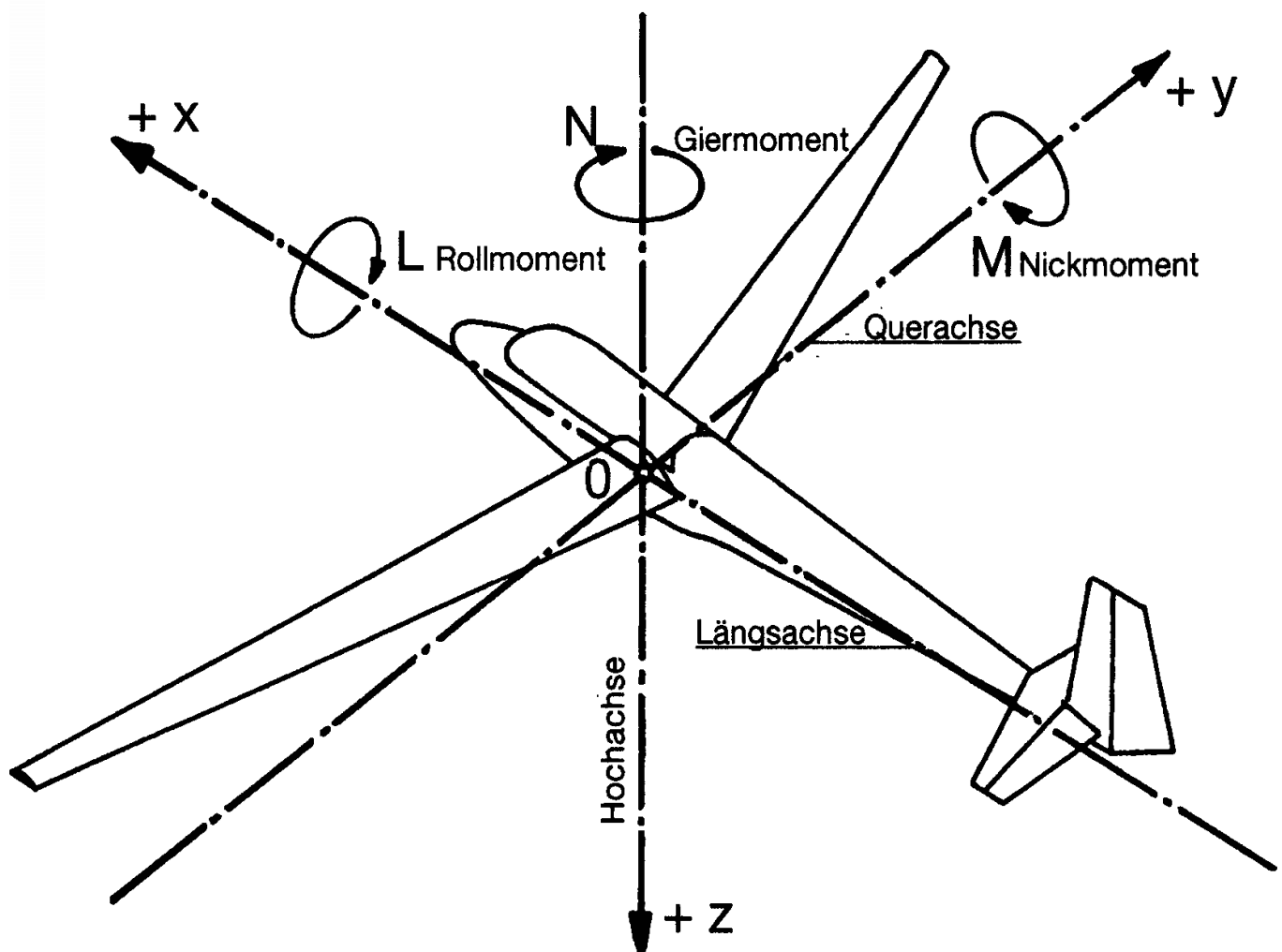
Anschließend werden in einem weiteren Kapitel die Grundlagen der Flugsteuerung betrachtet. Zunächst werden jedoch einige allgemeine Grundlagen erläutert bevor auf diese Aspekte der Flugmechanik genauer eingegangen wird.

# Allgemeine Grundlagen

Es folgen zunächst einige ausgewählte Begriffsdefinitionen und andere allgemeine Grundlagen, die für das Verständnis der Inhalte in diesem Modul von besonderer Bedeutung sind. Bei den Definitionen ist hier weniger die exakte (mathematische) Definition relevant, sondern eher das darauf basierende gedankliche Modell, wie man sich das Verhalten von Strömungen vorstellen kann.

## Achsen des Flugzeugs

Wird demnächst hinzugefügt.



nach [4]

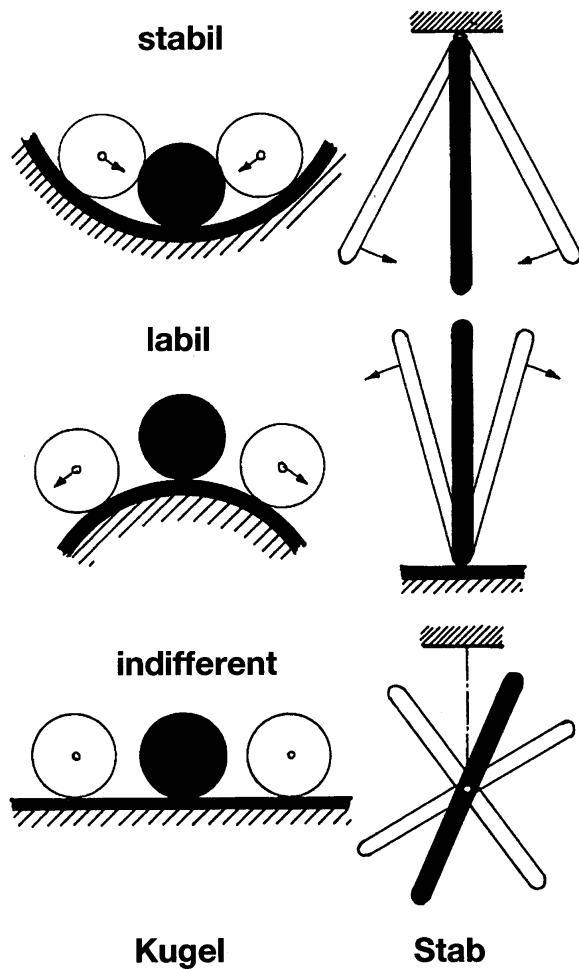
Wird demnächst hinzugefügt.

## Stationäre Flugzustände und Dynamik

Wird demnächst hinzugefügt.

# Statische und dynamische Stabilität

Wird demnächst hinzugefügt.



[4]

Wird demnächst hinzugefügt.

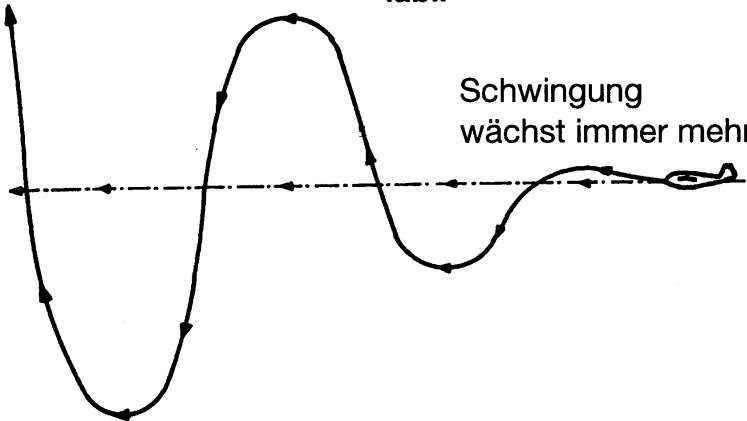
**stabil**

Schwingung hört bald auf



**labil**

Schwingung  
wächst immer mehr



**indifferent**

Schwingung bleibt ewig gleich



[4]

Wird demnächst hinzugefügt.

# Stationäre Flugzustände der Längsbewegung

Wird demnächst hinzugefügt.

## Stationärer Horizontalflug

Wird demnächst hinzugefügt.

[Einfluss der Fluggeschwindigkeit besonders betrachten]

[Bodeneffekt kurz erwähnen]

# Stationärer Steigflug und Sinkflug

Wird demnächst hinzugefügt.

# Stationärer Gleitflug

Wird demnächst hinzugefügt.

# Flugleistungspolare

Wird demnächst hinzugefügt.

# Dynamik der Längsbewegung

Wird demnächst hinzugefügt.

# Abfangbogen

Wird demnächst hinzugefügt.

[Manövergeschwindigkeit kurz erwähnen]

# Längsstabilität und Nickdämpfung

Wird demnächst hinzugefügt.

# Stationäre Flugzustände der Seitenbewegung

Wird demnächst hinzugefügt.

# Quasistationärer Kurvenflug

Wird demnächst hinzugefügt.

[Mindestgeschwindigkeit im Kurvenflug besonders betrachten]

## Seitengleitflug

Wird demnächst hinzugefügt.

## Dynamik der Seitenbewegung

Wird demnächst hinzugefügt.

## Querstabilität und Rolldämpfung

Wird demnächst hinzugefügt.

## Richtungsstabilität und Gierdämpfung

Wird demnächst hinzugefügt.

## Sturzspirale

Wird demnächst hinzugefügt.

## Trudeln

Wird demnächst hinzugefügt.

## Grundlagen der Flugsteuerung

Wird demnächst hinzugefügt.

## Höhenruder und Schubhebel

Wird demnächst hinzugefügt.

# Querruder

Wird demnächst hinzugefügt.

# Seitenruder

Wird demnächst hinzugefügt.

# Trimmung

Wird demnächst hinzugefügt.

# Landeklappen

Wird demnächst hinzugefügt.

# Störklappen

Wird demnächst hinzugefügt.

# Quellenverzeichnis

[1]: Lutz, T.: Skript Profilentwurf, Universität Stuttgart, 2008

[2]: Schlüter, M.: Skript Strömungsmechanik I, TUHH, 2013

[3]: Denker, John S.: See How It Flies. <http://www.av8n.com/how/> (Abruf: 19.04.2017)

[4]: Weinholtz, Fred W. et al.: Der Segelflugzeugführer – Aus- und Weiterbildung, Luftfahrtverlag, 9. Auflage, Juni 2006

[5]: Hahn, K.-U.: Skript Flugmechanik, TUHH, 2014