
1.1 Der Auftrieb – eine einleitende physikalische Deutung

Strahltriebwerke und Propeller erzeugen ihre **Schubkraft**, indem sie eine Luftmasse nach hinten ausblasen. Ein Hubschrauber erzeugt seine **Tragkraft**, indem er eine Luftmasse mittels seines Rotors nach unten bläst, was die Abb. 1.1 veranschaulicht. Die Wirkung des Abwärtswindes (*Downwash*) des Rotors ist auf der Wasseroberfläche durch das dort aufgewirbelte Wasser sehr gut zu erkennen.

Auf dieselbe Art und Weise erzeugen auch ein Flugzeugtragflügel bzw. seine in Spannweitenrichtung „aufgefädelten“ Einzelprofile die **Auftriebskraft** für das Flugzeug; Sie lenken nämlich Luftmasse nach unten um. Die Auftriebskraft ist eine **Reaktionskraft**. Strahltriebwerke, Propeller, Hubschrauberrotoren und Tragflügel funktionieren alle nach demselben physikalischen Prinzip, sie beschleunigen eine Luftmasse in die entgegengesetzte Richtung in die eine gewünschte Kraft wirken soll. Das physikalische Fundament dazu bilden lediglich die drei Newtonschen Axiome.

1.2 Die Newtonschen Axiome

Die wohl effektivsten strömungsmechanischen Werkzeuge zum Verstehen der Flugzeug-aerodynamik sind die von Isaac Newton 1687 in seinem Hauptwerk *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* in lateinischer Sprache veröffentlichten drei Grundgesetze der Bewegung, die als die Newtonschen Axiome, oder als die Grundgesetze der Bewegung, oder als die Newtonsche Prinzipien oder auch als die Newtonsche Gesetze überragende physikalische Bedeutung haben.

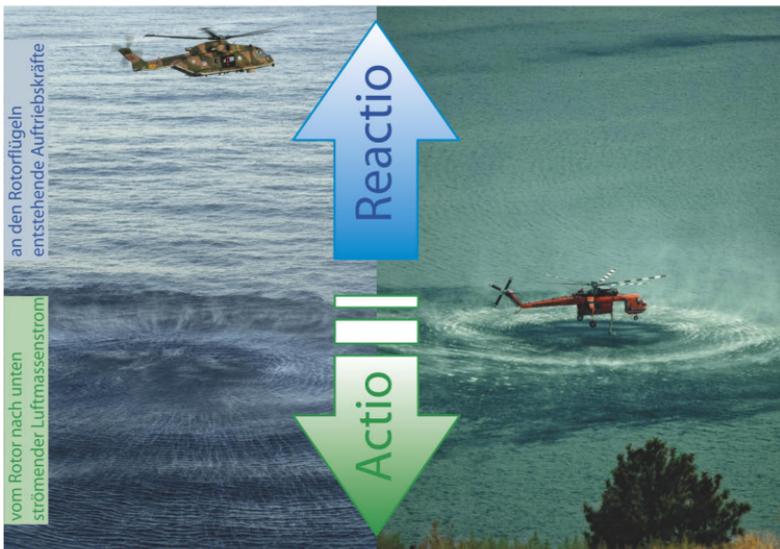


Abb. 1.1 Hubschrauber, die über dem Wasser schweben. Auf dem Wasser ist die Wirkung des senkrecht nach unten gerichteten Luftstroms zu erkennen, den der Hubschrauberrotor für seine Schwebekraft (= Massenkraft) benötigt. Der abwärtsgerichtete Strahl des Hubschraubers ist die ursächliche Aktion und die Auftriebskraft des Rotors die Reaktion darauf – Drittes Newtonsches Axiom (*actio = reactio*). Foto links: © Isaac Gindi – stock.adobe.com (# 336467209), Foto rechts: © jared eygabroad-EyeEm – stock.adobe.com (# 342278244)

Diese Gesetze sind das Fundament der klassischen Mechanik. Obwohl sie im Rahmen moderner physikalischer Theorien, wie der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie, nicht uneingeschränkt gelten, sind mit ihrer Hilfe innerhalb eines weit gefassten Gültigkeitsbereiches zuverlässige Vorhersagen möglich. Zu den letzteren gehören auch die Aerodynamik.

1.2.1 Das Erste Newtonsche Axiom

Die Lex Prima – Das Trägheitsprinzip oder das Trägheitsgesetz:

- Ein kräftefreier Körper bleibt in Ruhe oder bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit.
- Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.
- Wirkt auf einen Körper der Masse m keine Kraft \vec{F} , so ist seine Geschwindigkeit \vec{v} zeitlich konstant, $d\vec{v}/dt = 0$.

- Wenn auf einen Massenpunkt m keine Kraft \vec{F} wirkt, so ist sein Impuls \vec{I} konstant. Der Impuls \vec{I} (Vektor) ist die skalare Multiplikation zwischen einer Masse m (Skalar) und deren Geschwindigkeit \vec{v} (Vektor), $\vec{I} = m\vec{v} = \text{const}$. Das Ergebnis einer solchen **Skalarmultiplikation**, ist der skalierte Vektor des Impulses \vec{I} . Das Ergebnis ist – ähnlich wie beim echten Skalarprodukt – eine mathematische Verknüpfung, die einer Zahl (dem Skalar) zwei Vektoren zuordnet: $m = \vec{I}/\vec{v}$.

Für die Aerodynamik bzw. für das Fliegen bedeutet das, wenn eine Fluidmasse anfänglich stillsteht und dann anfängt, sich zu bewegen, so muss es dazu auch irgendeine Kraft geben, die an dem Massenteilchen wirkt. Und wenn sich die Bahn des so in Bewegung befindlichen Massenteilchens anschließend verändert, so muss dazu eine weitere Kraft existieren, die diese Bahnänderung einleitet. Wenn also ein Luftstrom eine gekrümmte Bahn über die gewölbte Oberfläche eines Profils nimmt, so muss auch eine Initialkraft existieren, die dafür verantwortlich ist. Im Kontext einer zusammenhängenden Masse, so wie sie Luft als ein räumliches Kontinuum darstellt, präsentiert sich diese Kraft als eine Druckdifferenz.

1.2.2 Das Zweite Newtonsche Axiom

Die Lex Secunda – Das Aktionsprinzip oder das Kraftgesetz:

- Kraft ist gleich Masse m mal Beschleunigung \vec{a} , wenn die Masse m dabei zeitlich konstant bleibt, $dm/dt = 0$. Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt. Diese sogenannte **Grundgleichung der Mechanik** wurde in dieser Form 1750 erstmals von **Leonhard Euler** formuliert:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1.1)$$

- Die **Originalfassung von Newton** enthält dagegen bereits eine allgemein gültigere Form. Ausgedrückt mit den heute üblichen Begriffen der Sprache der Physik heißt das: Die zeitliche Änderung des Impulses $\vec{I} = d\vec{I}/dt$ eines Körpers der Masse m entspricht der resultierenden äußeren Kraft \vec{F} , die auf diesen Körper m wirkt. Diese Form ist allgemeingültiger und hat vor allem in der Strömungsmechanik und Aerodynamik eine herausragende Bedeutung:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{I}}{dt} = \vec{I} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \frac{dm}{dt} \quad (1.2)$$

- Diese Gleichung ist eine Verallgemeinerung des Kraftgesetzes nach Euler, da sie nicht nur den Zusammenhang zwischen Kraft und zeitlicher Geschwindigkeitsänderung (Beschleunigung) sondern auch den Zusammenhang zwischen Kraft und zeitlicher Massenänderung (Massenstrom) beschreibt. Wird Gl. (1.2) wie folgt umgestellt, so erhält man daraus die physikalische Größe des sogenannten Kraftstoßes, der auch als Impulsübertragung bezeichnet wird.

$$\vec{F}dt = d\vec{I} \quad (1.3)$$

- Bei der Impulsübertragung erfahren beide Stoßpartner einen Kraftstoß in entgegengesetzten Richtungen. Es gilt dabei zusätzlich das Dritte Newtonsche Axiom, das sogenannte Wechselwirkungsgesetz gemäß Kap. 1.2.3.
- Die Gleichung (1.3) drückt aus, dass eine bestimmte Impulsänderung $d\vec{I}$ erreicht werden kann, indem man eine große Kraft \vec{F} für ein kurzes Zeitintervall dt oder eine kleinere Kraft \vec{F} für ein längeres Zeitintervall dt wirken lässt.
- Der Kraftstoß $\vec{F}dt$ (Impulsübertragung) ist eine vektorielle (gerichtete) Größe, dessen Richtung mit der Richtung der einwirkenden Kraft \vec{F} übereinstimmt.
- Der Impuls $\vec{I} = m\vec{v}$ ist ebenfalls eine vektorielle (gerichtete) Größe, deren Richtung mit derjenigen der Bewegungsrichtung \vec{v} des Körpers übereinstimmt.
- Eine Kraft \vec{F} kann folglich als Ursache für die zeitliche Änderung des Impulses $d\vec{I}/dt$ angesehen werden. Der Betrag des Impulses $|\vec{I}| = m|\vec{v}|$ ändert sich dabei nur durch Kräfte \vec{F} , die in Richtung der Bewegung \vec{v} des Körpers wirken, während die Richtung des Impulses \vec{I} nur durch Kräfte \vec{F} geändert werden, die senkrecht auf der Bewegung \vec{v} des Körpers stehen.
- In Strömungen mit konstanter Geschwindigkeit, $\vec{v} = \text{const}$ bzw. $d\vec{v}/dt = 0$, wird aus Gl. (1.2) eine Beziehung, die in der Fliegerei typisch für Impulsantriebe ist, wie Strahltriebwerke und Propeller, aber auch für Hubschrauber, Tragflügel und deren Profile:

$$\vec{F} = \dot{\vec{I}} = \frac{d\vec{I}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v}\frac{dm}{dt} = \vec{v}\frac{dm}{dt} = \vec{v}\dot{m} \quad (1.4)$$

Das Zweite Newtonsche Axiom lehrt uns, dass Strömungen, die Kräften \vec{F} infolge einer zeitlichen Impulsänderung $\dot{\vec{I}}$ (Impulsstrom) unterliegen, von der strömenden Fluidmasse, dem sogenannten Massenstrom \dot{m} , abhängen und von dessen Strömungsgeschwindigkeit \vec{v} . Um beispielsweise eine solche Kraft \vec{F} (Schubkraft beim Strahltriebwerk) zu verdoppeln, ist es erforderlich, entweder den Massenstrom \dot{m} zu verdoppeln oder die Geschwindigkeit \vec{v} zu verdoppeln oder aber eine entsprechende Kombination aus beiden Größen. Der Kraftstoß (die Impulsübertragung) in Strömungen auf Basis der Gl. (1.3) ist also: $\vec{F}dt = \vec{v}dm$.

1.2.3 Das Dritte Newtonsche Axiom

Die Lex Tertia – Das Reaktionsprinzip oder das Wechselwirkungsgesetz:

- Kraft ist gleich Gegenkraft (actio = reactio).
- Eine Kraft von einem Körper **Ⓐ** auf einen Körper **Ⓑ** geht immer mit einer gleich großen, aber entgegen gerichteten Kraft von Körper **Ⓑ** auf Körper **Ⓐ** einher.
- Kräfte treten immer paarweise auf.
- Übt ein Körper **Ⓐ** auf einen anderen Körper **Ⓑ** eine Kraft aus (*actio*), so wirkt eine gleich große, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper **Ⓑ** auf Körper **Ⓐ** (*reactio*):

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = \vec{F}_{B \rightarrow A} \quad (1.5)$$

Steht also ein Flugzeug im Hangar, so übt es eine Gewichtskraft auf den Hallenboden aus, der das Gewicht aushalten muss und deswegen mit einer entgegengesetzt gerichteten gleich großen Kraft – aufgrund der Festigkeit des Bodens – das Flugzeug trägt. Die Flugzeuggewichtskraft ist die Aktion und die Tragfähigkeit des Bodens, die das Flugzeug kräftemäßig aushalten muss, ist die Reaktion darauf.

Schauen wir uns nun in diesem Zusammenhang die umlenkende Strömung über die gewölbte Oberseite eines Profils an. Nach dem *Ersten Newtonschen Axiom* kann eine entsprechende Bahnänderung nur dann erfolgen, wenn es dafür auch eine verantwortliche Kraft gibt. Gemäß des *Dritten Newtonschen Axioms* muss die strömende Luft dann eine gleich große und entgegengesetzte Kraft auf das haben, was sie umlenkt, in diesem Falle also die gewölbte Flügeloberseite. Wird die strömende Luft nach unten umgelenkt, wird eine abwärts gerichtete Kraft existieren, die sich schließlich aus dem *Zweiten Newtonschen Axiom* (Aktionsprinzip, Kraft- oder Wechselwirkungsgesetz) ergibt. Die Strömungsumlenkung auf dem Profil ist also die ursächliche Aktion und die Auftriebskraft am Profil ist die Reaktion darauf – *Drittes Newtonsches Axiom (actio = reactio)*.

Diese und die nachfolgenden Diskussionen zur weitergehenden Interpretation der Newtonschen Axiome hinsichtlich des Fliegens und der jetzt noch einzuführenden Bernoulli-Gleichung, die in diesem Zusammenhang auch gerne und häufig – und besonders häufig auch immer noch falsch – herangezogen wird, bauen auf den Ausführungen von Andersson und Eberhardt (2009) und insbesondere auf denen von Weltner (1978), Weltner (1990), Weltner (1991), Weltner (1997), Weltner (2002), Weltner (2011) und Weltner (2016).

1.3 Die Auftriebskraft und wie sie entsteht

1.3.1 Impulsstrom und Bernoulli-Gleichung

Die Abb. 1.2 soll die bisherige Diskussion zu den Newtonschen Axiomen grafisch ein wenig unterstützend veranschaulichen. Abb. 1.2 Ⓐ zeigt dazu erst einmal zwei Profile, die so zueinander angeordnet sind, dass sie eine Düse bilden. Zwischen den Profilen beschleunigt die Strömung, sodass die Austrittsgeschwindigkeit größer als die Eintrittsgeschwindigkeit ist. Selbiges gilt für die Ein- und Austrittsimpulsströme \vec{I} gemäß der Gl. (1.4) beim *Zweiten Newtonschen Axiom*. Aufgrund der Änderung der Impulsströme zwischen Aus- und Eintritt der Düse entsteht eine effektiv wirkende Reaktionskraft, die man bei einem Strahltriebwerk als dessen Schub bezeichnen würde.

An den umströmten, festen Seitenwänden, die in Abb. 1.2 Ⓐ die beiden Profile bilden, verringert sich der statische Druck p proportional zum lokalen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten v . Ein Zusammenhang, der als Bernoulli-Gleichung wohlbekannt ist:

$$p_{ges} = p_t = p + \frac{\rho}{2} v^2 = \text{const} \quad (1.6)$$

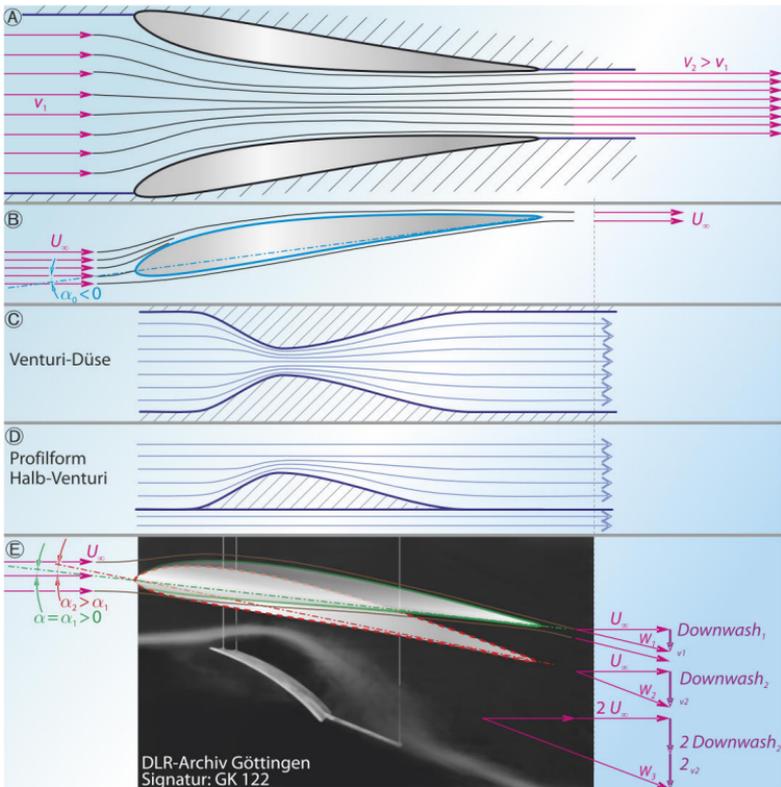


Abb. 1.2 Grafische Zusammenfassung der Diskussion zu den Newtonschen Axiomen hinsichtlich der Umströmung von Profilen und Flügeln. Foto unten Eckert (2017), Seite 84, mit Genehmigung des Autors

Der statische Druck p wird senkrecht zur Strömung auf bzw. in der Seitenwandoberfläche gemessen. Der Term $(\rho/2)v^2 = q$ wird als dynamischer Druck bezeichnet und per Definition mit dem Buchstaben q abgekürzt. In Gl. (1.6) ist ρ die Dichte des strömenden Gases und v dessen Geschwindigkeit. Die Summe aus statischem und dynamischem Druck wird als Total- oder Gesamtdruck $p_{ges} = p_t = p + q$ bezeichnet. Der Total- oder Gesamtdruck p_t kann leicht mit einer sogenannten Pitot-Sonde in der Strömung gemessen werden. Flugzeuge sind mit solchen Sonden, die zudem auch noch relativ unempfindlich gegen Fehlansströmungen sind, ausgestattet, um damit die Fluggeschwindigkeit bestimmen zu können. Dass dies mittels der Bernoulli-Gleichung (1.6) umsetzbar ist, sollte leicht zu erkennen sein, vorausgesetzt es gibt eine zusätzliche Messstelle für den Druck p , die sich an einem Flugzeug am vorderen Teil des Rumpfes befindet, Abb. 1.3. Der dynamische Druck q ist ein Maß für die kinetische Energie in der Strömung, wie noch gezeigt werden wird.

1.3.2 Die Bernoulli-Gleichung in Strömungen mit Energiezufuhr

In einem Strömungskanal mit festen Begrenzungswänden, Abb. 1.2 Ⓐ, ist die Summe aus statischem und dynamischem Druck q konstant, $p + q = \text{const} = p_t = p_{\text{ges}}$ und für gasförmige Fluide gilt die Gl. (1.6) uneingeschränkt. Ist die Konstante, $p_t = \text{const}$, bekannt, so kann bei Kenntnis des statischen Druckes p die Geschwindigkeit v oder bei Kenntnis der Geschwindigkeit v der statische Druck p berechnet werden.

Insbesondere letzteres trifft nicht mehr zu, wenn der Luft örtlich eine zusätzliche Energie zugeführt wurde, was z. B. durch einen Rotor (Propeller) oder durch Ein- oder Ausblasen von Luft geschehen könnte. Die Strömung ist dann keine Potenzialströmung mehr und in der Bernoulli-Gleichung ist in einem solchen Fall lokal die Konstante p_t in der Gleichung a priori nicht mehr bekannt, Landau und Lifshitz (1987), Seite 17, Gl. (9.4), die sie vor und hinter dem Ort der Energiezufuhr einen unterschiedlichen Betrag aufweist. Mit der Verwendung der Ableitung der Gl. (1.6), $dp + \rho v dv = 0$, könnte man zwar die Konstante mehr oder weniger „akademisch“ geschickt ausblenden, würde aber durch einen solchen „Trick 17 mit Selbstüberlistung“ zu einem speziös raffinierten Lösungsansatz gelangen, der schlussendlich auf originelle Art und Weise mehr oder minder zum Scheitern verurteilt ist.

Geht man nun einmal davon aus, dass einem atmosphärischen Luftstrom durch einen Propeller kinetische Energie zugeführt wurde, so wird sich dadurch der dynamische Druck q erhöhen, aber der statische Druck p sich deswegen nicht verringern, da in einem Freistrahler der statische Druck praktisch immer gleich dem Umgebungsdruck $p = p_{\infty}$ ist. Ausnahmen existieren unmittelbar hinter dem Propeller oder an der Mündung einer Düse, aus der ein Strahl ins Freie austritt. Die Tatsache, dass sich die Luft schneller bewegt, bedeutet also generell nicht, dass sich der statische Druck p dabei auch zu verringern hat. Ein Beispiel dafür ist die Messstelle für den statischen Druck (*Static Port*) an einem Flugzeug, die sich seitlich am Rumpf befindet. Die Abb. 1.3 zeigt diese Situation bei einem zweimotorigen Passagierflugzeug vom Typ Boeing 737. Der markierte Port für den statischen Druck p dient u. a. auch dazu, dem Höhenmesser (*Altimeter*) des Flugzeuges Informationen zum Umgebungsdruck p_{Baro} (barometrischer Druck) in der Atmosphäre zu geben, aus der in einem Reiseflug die jeweilige Flughöhe bestimmt werden kann. Am Boden, wenn das Flugzeug sich nicht bewegt, zeigt das Instrument die Höhe über Normalnull (NN oder *MSN Mean Sea Level*) des Flugfeldes an, auf dem sich das Flugzeug befindet. Der statische Druck p ist dann der Barometerdruck der Umgebung, $p = p_{\text{Baro}}$. Beginnt das Flugzeug sich auf dem Rollfeld zu bewegen und beginnt seinen Startlauf auf dem Boden, so strömt die Umgebungsluft längs des Rumpfes entlang und damit auch über die statischen Druckmessstellen. Der Höhenmesser verändert seine Anzeige dabei aber nicht, obwohl man doch mutmaßen könnte, dass, nach der scheinbar „landläufigen Interpretation“ der Bernoulli-Gleichung, eine höhere Geschwindigkeit Strömungsgeschwindigkeit auch einen niedrigeren statischen Druck p bedeuten müsste. Das ist aber, wie hier erklärt, nicht (immer) der Fall, denn der Höhenmesser müsste gemäß der „landläufigen Interpretation“ eine größere Höhe als die Flugfeldhöhe anzeigen, da mit der Höhe der atmosphärische Druck ja sinkt. Zwischen der Strömung auf der Rumpfoberfläche und der Umgebung existiert keine trennende Barriere und damit auch keine Druckdifferenz. Wäre es anders und der Strahl hätte einen geringeren Druck als die Umgebung, so würde – abstrakter und irrationaler



Abb. 1.3 Messstellen für den statischen Druck (engl.: Static Port) eines Passagierflugzeuges des Typs Boeing 737. Bild oben links: © Stefano Garau – stock.adobe.com (# 71338630), Bild oben rechts: © Stephen – stock.adobe.com (# 164883125), Bild unten: © h368k742 – stock.adobe.com (# 84083976)

Weise – der höhere Umgebungsdruck den Strahl niedrigeren Drucks solange zusammendrücken, bis die Drücke wieder gleich sind, was selbstverständlich vollkommen absurd wäre. Im hier beschriebenen Fall steigen – infolge der relativen Energiezufuhr¹ – aufgrund der kinetischen Energie des sich im Strömungsfeld bewegenden Flugzeuges nur der Totaldruck p_t und der dynamische Druck q an. Der statische Druck p verändert sich nicht. In Kap. 4.8.5.7, Abb. 4.24, wird dieses Thema noch einmal wiederaufgenommen und ausführlicher physikalisch-mathematisch untermauert werden.

Man sollte also keinesfalls vergessen, dass die **Bernoulli-Gleichung auch einen Energieerhaltungssatz für Strömungen** darstellt und deswegen auch nicht in der Form der Gl. (1.6) für Strömungen gelten kann, die einem äußeren Energieaustausch unterliegen – Zu-

¹ Relative Energiezufuhr: Eigentlich ist das zu betrachtende Fluid, die Umgebungsluft, ein mehr oder weniger ruhendes, dreidimensionales Strömungsfeld, durch das sich das Flugzeug bewegt. Eine physikalisch vergleichbare Situation kann aber auch dadurch hergestellt werden, indem ein ruhendes Flugzeug betrachtet und dessen Umströmung mittels eines Gebläses bereitgestellt wird, was einem Windkanalversuch entspricht. In diesem letzten Fall ist es leicht einzusehen, dass dem Gebläse von außen Energie zugeführt werden muss, mittels der es eine kontinuierliche Bewegung des Fluides (Strömung) aufrechterhält. Das Bezugssystem, aus dem heraus man die physikalischen Vorgänge betrachtet, dreht sich dabei nur um. Es wird relativ, also energetisch lediglich in ein umgekehrtes Verhältnis gesetzt. Wie auch immer, der Vorgang des startenden Flugzeuges wird nur durch Energiezufuhr möglich; Entweder, indem die Energie dazu aufgewandt wird, das Flugzeug zu bewegen, oder aber, indem die Energie dazu aufgewandt wird, das Strömungsfeld in Bewegung zu versetzenbringen.

fuhr von Energie von außen in die Strömung hinein (von einem Motor angetriebener Propeller oder Gebläse) oder aber Abgabe von Energie aus der Strömung heraus nach außen (Windrad, das Windenergie an einen Generator zur Stromerzeugung abgibt).

Noch einmal: Die Tatsache, dass sich die Luft schneller bewegt, bedeutet generell nicht (immer), dass sich der statische Druck p dabei auch zu verringern hat. In Strömungen zwischen festen Wänden ist das anders, hier gilt die Bernoulli-Gleichung wie gehabt in der Form der Gl. (1.6), es sei denn, der Strömung würde von außen Energie zugeführt oder aus der Strömung würde Energie nach außen abgegeben werden, wie es z. B. bei Strömungsmaschinen der Fall ist. Wie im vorhergehenden Absatz bereits geschrieben, kann in einem solchen Fall die Bernoulli-Gleichung in der Form der Gl. (1.6) **natürlich nicht** zwischen Zulaufkanal zur Strömungsmaschine und deren Ablaufkanal angesetzt werden, vgl. hierzu auch Becker (1993), Seiten 53–54.

1.3.3 Bernoulli-Gleichung und Profilmströmungen. Eine Geschichte der Missinterpretationen

Nun aber wieder zurück zu der Abb. 1.2. In Abb. 1.2 ⓑ wurde die obere Hälfte der darüber gezeichneten Düse entfernt und es ist nun nur noch die elementare Stromlinienführung um das verbleibende Einzelprofil zu sehen. Die Zuströmung teilt sich vor dem Profil in eine Unter- und eine Oberseitenströmung auf, umströmt es und nimmt ein kurzes Wegstück hinter dem Profil wieder dieselbe Richtung und denselben Betrag auf, wie die Strömung sie vor dem Profil hatte. Eine Beschleunigung der Strömung tritt nicht mehr auf. Die gekrümmte Profilmform hat insgesamt keine Umlenkung der Strömung bewirkt und folglich wirkt am Profil nach dem Dritten Newtonschen Axiom auch keine Auftriebskraft. Diese Winkellage wird als Nullauftriebsrichtung des Profils bezeichnet und mit dem Nullauftriebswinkel $\alpha_0 < 0$ gekennzeichnet, der zwischen der Zuströmrichtung und der Lage der Profilschne (gedachte Verbindungslinie zwischen der Profilmnase oder Profilverderrkante und der Profilhinterkante) gemessen wird. An diesem Beispiel wird deutlich, dass es weder die Profilmform noch die sich auf ihr ausbildenden Druckverteilung sein können, die primär den Auftrieb erzeugen, sondern viel mehr die Profillage im Strömungsfeld, d. h., sein Anstellwinkel α . Gibt es hinter dem Profil keinen Abwind (*Downwash*), so gibt es auch keine Auftriebskraft am Profil. Das Profil in Abb. 1.2 ⓑ hat zwar die potenzielle Energie (Lageenergie) der Strömung zwischen Profilmnase und Profilhinterkante verändert (angehoben), dies aber zum einen nur sehr wenig und zum anderen spielt in Gasen, wie z. B. Luft, die Änderung der potenziellen Energie ohnehin keine Rolle, da sie hier – insbesondere bei den in der Aerodynamik vorkommenden vertikalen Lageänderungen – vollkommen unbedeutend und deswegen vernachlässigbar gering sind.

Alles zuvor Gesagte, gilt auch für die Teilbilder © und Ⓓ Abb. 1.2. Das Teilbild © zeigt ein sogenanntes Venturirohr. Es dient der Messung von Volumenströmen in Flüssigkeiten und Gasen. Der Venturi-Effekt wurde von Giovanni Battista Venturi (italienischer Physiker: *1746 †1822) entdeckt und von Daniel Bernoulli (schweizer Mathematiker: *1700 †1782) mathematisch beschrieben. Entsprechend der Bernoulli-Gleichung beschleunigt die Strömung in dem kanalförmigen Gebilde mit festen Wänden und erreicht an der Stelle des engsten Querschnitts ihre höchste Geschwindigkeit und damit auch ihren geringsten

Sachwortverzeichnis

Symbole

$\ell/4$ -Position 64, 66, 67, 85, 86, 87, 93, 103, 104, 105, 108, 109, 110, 111, 118, 833, 839
II-Theorem 137

Zahlen

1. Newtonsches Axiom 2
2. Newtonsches Axiom 39
3. Newtonsches Axiom 2, 5

A

Abbildung, affine 731, 732
Abbildungsmatrix 265, 266, 267, 363, 364, 517, 565
Abbildungsverfahren, grafische 745
Abbildung, umkehrbar und eindeutig 748, 761, 762
Abflussbedingung nach Kutta 43, 816
Ackeret, Jacob IX, 50, 59, 60, 178, 189
aerodynamische Beiwerte 75, 180
aerodynamisches Moment 65, 66, 67, 78, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 94, 108, 109, 172, 638, 833
aerodynamisches Zentrum 103, 105, 107, 109, 110, 111
Affine Abbildung 731, 732
Ähnlichkeit 58, 76, 119, 121, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 177, 179, 180, 183, 184, 204, 225, 265, 389, 490, 545, 547, 557, 611, 617, 723, 730, 732, 733, 775
Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln 166
Ähnlichkeit, unvollständige 169, 172
Ähnlichkeit, vollständige 169, 172, 184
Ähnlichkeit von Strömungen 76, 166, 167, 169, 172, 177, 179, 183
Algebraische Gleichungen im Komplexen 542, 549
Analysis, komplexe 370, 519, 520, 557, 633, 663, 747
Änderung, konvektive 223
Änderung, lokale 223

Änderung, substantielle 223, 320
 Anstellwinkel, Langstreckenflug 102
 arctan2 und arctan 663, 673, 802
 Argument 529, 530, 531, 533, 535, 537, 550, 552, 563, 584, 587, 673, 697, 780, 842
 ATAN2-Funktion 663, 675
 aufgelöste Polare 88, 115
 Auftrieb VII, XI, XII, XVI, XXXV, 1, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 19, 20, 33, 35, 36, 37, 38, 40, 42, 43, 44, 47, 51, 61, 63, 64, 66, 68, 89, 91, 92, 94, 95, 97, 111, 119, 185, 331, 332, 369, 370, 614, 631, 632, 633, 638, 837, 859
 Auftriebsbeiwert 44, 46, 47, 78, 88, 91, 93, 94, 95, 96, 104, 105, 112, 114, 115, 121, 124, 125, 131, 132, 370, 835
 Auftriebskraft XI, XII, 1, 2, 5, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 46, 52, 57, 63, 65, 67, 68, 75, 81, 84, 92, 97, 102, 103, 119, 121, 129, 278, 285, 331, 332, 369, 613, 632, 729, 747, 822, 833, 834, 835, 836

B

Bahnlinie 205, 206, 216, 218, 219, 246, 249, 296
 Banach, Stefan 659, 660, 663, 664
 Basisgesetze von Potenzialströmungen 762
 Beiwerte, aerodynamische 75, 180, 863
 Bernoulli-Gleichung XI, XII, XIII, XIV, XXXII, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 30, 31, 32, 33, 37, 50, 53, 54, 117, 238, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 256, 257, 264, 268, 271, 272, 273, 277, 278, 283, 284, 285, 287, 290, 292, 293, 295, 296, 299, 301, 302, 303, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 330, 350, 357, 358, 359, 366, 367, 375, 408, 419, 452, 470, 483, 503, 600, 609, 626, 651, 688
 Bernoulli-Gleichung mit lokalem Energieaustausch 301
 Bernoulli-Integration der Eulerschen-Bewegungsgleichungen 246, 254, 358
 Bernoulli-Konstante XIV, 245, 247, 248, 249, 251, 252, 253, 254, 256, 259, 271, 278, 279, 280, 301, 303, 311, 358, 366, 375
 Betz, Albert IX, 114, 567, 727
 Bezugsflügeltiefe 76, 77
 Blasius, Heinrich XVI, XVIII, XXX, XXXI, XXXII, 355, 370, 631, 633, 634, 635, 638, 641, 643, 644, 725
 Blasius-Tschaplygin-Momentengleichung 641
 Buckingham'sches II-Theorem 137

C

Cauchy-Riemannschen Differenzialgleichungen 392, 564, 575, 579, 747, 748, 765, 780
 Cauchy-Riemannschen partiellen Differenzialgleichungen 391, 392, 394, 517, 562, 564, 565, 567, 573, 574, 579, 583, 764, 765, 774, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 791
 Cauchysche Integralsatz für Elementargebiete 643
 CFD, Computational Fluid Dynamics 23, 153, 278
 Coanda-Effekt 23, 24, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 61, 62

c_p -Verteilung XXXIII, 32, 33, 601, 617, 619, 651, 693, 694, 723, 747, 831, 833

D

d'Alembert, Jean-Baptiste le Rond XXIII, 21, 34, 60, 226, 274

Definitionslücke 117, 413, 465, 471, 643, 654, 696, 761, 797, 803, 805, 839

Definitionslücke, einpunktige 643, 761, 797, 803, 805

Deformation XXVIII, 223, 234, 236, 276

Deformationsbewegung 237, 359

Deformationsgeschwindigkeit 237

Dimensionsanalyse XVI, 85, 137, 154, 156, 157, 159, 160, 184, 190

Dimensionsymbol 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 361, 670, 672, 865

Dipolströmung, räumliche 455, 471, 479, 480

Doppeldecker 125, 126

Downwash 1, 9, 10, 19, 32, 37, 39, 40, 41, 89, 118, 119

Drehstreckung 531, 578

drehsymmetrisch 394, 459, 467, 471, 474, 493, 495, 749

drehsymmetrischer Halbkörper 493

drehungsfrei XXIX, XXX, XXXI, 35, 234, 239, 259, 267, 302, 358, 359, 360, 380, 383, 384, 385, 387, 388, 395, 433, 644, 865, 868

Drehungsfreiheit XXIX, XXX, 239, 240, 259, 260, 261, 264, 279, 358, 359, 361, 364, 374, 380, 381, 391, 394, 397, 414, 415, 433, 434, 437, 484, 518, 632, 765, 767, 779

Drehvektor eines Geschwindigkeitsfeldes 233

Drela, Mark 281

Drittes Newtonsches Axiom 4, 343

Druckänderung 23, 277, 281

Druckbeiwert 25, 27, 73, 75, 162, 420, 453, 483, 503, 504, 651, 688, 719

Druckdifferenz 3, 7, 33, 162, 193, 229, 246, 250, 470, 610, 831

Druckkraft XXVI, XXVII, XXXIII, XXXIV, 21, 22, 29, 36, 50, 179, 193, 194, 213, 226, 227, 228, 234, 275, 276, 281, 290, 294, 304, 315, 317, 322, 324, 325, 335, 337, 338, 339, 340, 342, 345, 353, 422, 505, 506, 507, 601, 606, 609, 620, 623, 626, 627, 634, 635, 636, 638, 639, 640, 815, 821, 822, 823, 833, 839, 855, 859, 860, 865

Druckkräfte XXXIV, 179, 213, 226, 227, 228, 317, 322, 325, 337, 338, 339, 340, 342, 345, 353, 505, 506, 507, 620, 623, 626, 822

Druck, piezometrischer 250, 277

Druckpunkt 64, 65, 66, 67, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 94, 105, 638

Druckpunktverschiebung 84

Druckschlag 295, 312

Druckverteilung XVI, XXXI, XXXII, 9, 16, 19, 27, 28, 32, 35, 36, 63, 64, 65, 66, 68, 72, 75, 87, 191, 192, 193, 194, 200, 205, 213, 223, 249, 272, 281, 286, 287, 288, 289, 327, 330, 332, 346, 359, 367, 368, 370, 375, 422, 454, 480, 484, 490, 507, 601, 610, 634, 644, 686, 687, 729, 815, 831

Druckverteilungen XVI, XXXI, XXXII, 19, 27, 28, 32, 36, 63, 64, 65, 66, 68, 75, 87, 205, 249, 281, 330, 346, 359, 370, 484, 490, 634, 686, 815

Druckwiderstand 34, 35, 36, 72, 326, 327, 332, 507

Durchflussmenge 397, 398, 399, 400, 408, 409, 413, 465, 501, 695
dynamischer Druck XIV, 6, 7, 8, 25, 75, 121, 132, 250, 309, 311, 335, 609, 835

E

ebene Platte 587, 729, 768, 773, 775, 777, 778, 791, 792, 794, 799, 802, 803, 808, 810, 811,
815, 820, 821, 823, 828, 830, 854, 856, 858, 860
ebene Platte mit Zirkulation 815
Ebener Halbkörper 415
Ebenes Quellen-Senken-Paar 423, 654
Einheitensystem, internationales 138
Einheitsbreite 38, 40, 42, 46, 47, 64, 72, 74, 76, 156, 157, 189, 331, 352, 398, 416, 422, 438,
457, 458, 471, 635, 638, 639, 641, 643, 644, 645, 651, 834, 835, 855, 856, 857
Einheitskreis 540, 597, 608, 612, 655, 697, 750, 751, 768, 769, 778, 792, 793, 794, 795, 796,
799, 807, 811, 818, 841, 842, 847, 852
Elementararbeit 244, 248, 365
elliptische Auftriebsverteilung 113, 122
Energieerhaltung XIII, 120, 251
Energieerhaltungssatz XIII, 8, 37, 250, 271, 302, 304
Energiegleichung 34, 243, 244, 246
Energiezufuhr 7, 8, 302
Erforderlicher Schub 131, 133
Ergiebigkeit 413, 414, 416, 421, 423, 424, 425, 427, 428, 429, 433, 434, 465, 466, 474, 495,
496, 497, 499, 501, 510, 646, 647, 654, 655, 658, 667, 668, 669, 676, 692, 695, 696, 700
Erstes Newtonsches Axiom 2
Eulersche Bewegungsgleichung 213, 214, 218, 219, 257, 462
Eulersche Bewegungsgleichung, eindimensional 209
Eulersche Bewegungsgleichungen, dreidimensional 225, 462
Eulersche Formel 552, 554, 802
Euler-Zahl 25, 75, 162
Exponentialform der komplexen Zahl 553

F

Fangstromröhre 323, 343, 346
Finsterwalder, Sebastian 859, 861
Fixpunktsatz von Banach 659, 660, 663
Flaps (Klappen) 346
Flügel/Rumpf-Kombination 346
Flügelstreckung 95, 96, 99, 101, 111, 121, 124, 125
Fluidteilchen XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXXII, XXXIII, XXXV, 23, 24, 193,
201, 203, 204, 205, 206, 209, 211, 213, 215, 216, 222, 223, 226, 227, 228, 234, 235, 236,
237, 246, 259, 260, 264, 274, 275, 276, 286, 290, 292, 294, 295, 296, 316, 317, 358, 359,
380, 381, 382, 383, 384, 385, 388, 395, 433, 442, 443
Fluidteilchendeformation, laterale 237

- Fluidvolumen XXIX, XXXIII, XXXIV, 262, 304, 321, 328, 359, 361, 371, 387, 399, 456, 646, 648, 669
- flüssige Oberfläche 317
- FORTRAN 73, 281, 355, 512, 660, 675, 725
- Fractional Analysis 160
- freie Wirbel 118
- Freistrahl 7, 49, 50, 309, 349, 352, 353, 354
- Freistrahl, schräger 352, 353
- Freistrahlturbine 349
- Froude-Zahl 162, 163, 177, 180
- Funktionentheorie XIV, XVI, XXII, XXX, XXXI, 38, 39, 46, 331, 370, 392, 445, 516, 519, 549, 557, 560, 561, 562, 567, 568, 582, 588, 602, 613, 633, 643, 644, 645, 651, 725, 726, 727, 728, 747, 749, 765, 766, 768
- Funktionentheorie, komplexe XIV, XVI, XXII, XXX, XXXI, 38, 39, 46, 331, 370, 392, 445, 516, 519, 549, 557, 560, 561, 562, 567, 568, 582, 588, 602, 613, 633, 643, 644, 645, 651, 725, 726, 727, 728, 747, 749, 765, 766, 768

G

- Gaußsche Zahlenebene 519, 525, 792, 795
- gebundener Wirbel 118
- gekrümmte Oberflächen 19
- geometrisch ähnlich 179
- geometrische Konstruktion 531, 533
- geometrische Operationen 527, 529, 571
- Gesamtimpuls 313, 315
- Geschwindigkeitsbeträge 792, 854
- Geschwindigkeitsfeld 119, 201, 204, 214, 251, 270, 367, 368, 374, 396, 441, 469, 489, 618, 649, 790, 792, 797, 803, 823
- Geschwindigkeitspotenzial XXVIII, XXX, 240, 241, 242, 261, 262, 263, 267, 268, 269, 357, 360, 364, 372, 373, 374, 376, 380, 391, 396, 400, 402, 404, 405, 406, 408, 410, 413, 414, 415, 417, 423, 424, 428, 429, 434, 443, 445, 465, 472, 473, 474, 480, 482, 493, 767
- Geschwindigkeitsstabilität 131, 133, 135
- Geschwindigkeitsverteilungen 279, 328, 332, 801, 804, 805, 806, 816, 821, 828, 829, 832, 833, 853, 854, 855
- Gleitverhältnis 97, 98, 99, 129
- Gleiten, Nose-Down 97
- Gleiten, Nose-Up 97
- Gleitwinkel 97, 98, 99, 100, 101, 130
- Gleitzahl 92, 98, 99, 102, 128, 129
- Goniometrie 528
- goniometrisch 529
- goniometrische Form 529
- Goniometrische Form komplexer Zahlen 528
- Gradientenbildung 242, 264, 361, 362, 363, 364, 377, 388, 392, 765, 792, 798, 824

grafische Abbildungsverfahren 745
 Grenzschrift VIII, 32, 190, 253, 254, 280, 281, 310, 336, 356, 455, 492
 Grenzschriftströmung 278

H

Halbkörper 368, 415, 416, 418, 422, 423, 426, 493, 494, 495, 500, 501, 505, 510, 511, 555,
 645, 646, 647, 649, 655
 Halbkörper, drehsymmetrischer 493
 Halbkörper, räumlicher 493
 Hesse-Matrix 195, 265, 363
 Hesse, Otto 195, 265
 holomorphe Funktion 516
 Hufeisenwirbel 116, 118
 hydrostatischer Druck 200, 272

I

imaginäre Einheit XXXI, 520, 522, 524, 525, 540, 588, 597, 671, 786
 imaginäre Zahl 524, 525, 527, 533, 550
 Imaginärteil Im der komplexen Zahl 525, 534
 Impulsfluss 321, 333
 Impulssatz der Mechanik XXXIV, 315, 316
 Impulsstrom 4, 5, 18, 119, 321, 330, 334, 337, 339, 342, 343, 354
 Impulsübertragung 3, 4, 312, 313, 314, 343, 350, 609
 Impulsverlustdicke 336
 induzierter Widerstand 114, 115, 120, 121, 122, 123, 126, 132, 133
 inkompressible Fluide 245, 246, 248, 250, 267, 283, 295, 364, 368, 374
 installierte Schub 346
 instationär XIV, XXIV, XXV, 203, 209, 212, 217, 223, 224, 294, 808
 instationäre Strömungen 181, 203, 214, 216, 245, 293, 295, 296, 321, 374
 irrotational (drehungsfrei) XXX, 34, 35, 36, 238, 360, 385, 413, 515, 644

J

Joukowski, Nikolai XVI, XVII, XVIII, XXX, XXXI, XXXII, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 46, 58,
 331, 332, 356, 370, 611, 614, 620, 621, 631, 632, 633, 638, 643, 644, 726, 834, 859, 862

K

Kantenwinkeldeformation, rotatorisch 237
 Kavitation 311, 312
 Kavitationsfraß 312
 Klappen 50, 54, 55, 346
 Knudsen-Zahl 164, 174
 komplex differenzierbar XXXI, 516, 561, 568, 572, 785
 komplexe Analysis 370, 519, 520, 557, 633, 663, 747

- komplexe Differenzierbarkeit XXXI, 516, 561, 568, 572, 785
- komplexe n -te Wurzel 535
- komplexen Zahlen XIV, XVI, XXII, XXXI, 370, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 533, 534, 535, 538, 540, 542, 548, 549, 550, 552, 555, 556, 557, 559, 560, 571, 572, 584, 588, 589, 596, 634, 673, 728, 762, 771, 778, 791
- kompressibel 162, 222, 230, 231, 246, 248, 312
- Kompressibilität 177, 178, 179, 183
- Konforme Abbildung 578, 725, 727, 743, 750, 768, 773, 820, 861
- Konformität 729, 733
- konjugiert komplexe Geschwindigkeit 580, 692
- konjugiert komplexe Zahl 525, 532, 580, 584, 780
- konservatives Kraftfeld 197, 262, 264, 286, 364, 365, 376, 517
- Kontinuität XXIX, 207, 219, 225, 241, 262, 353, 357, 374, 391, 394, 397, 414, 415, 437, 438, 459, 518, 764, 767, 779
- Kontinuitätsgleichung 208, 210, 219, 222, 225, 231, 266, 267, 269, 270, 293, 300, 305, 309, 329, 330, 333, 334, 352, 357, 363, 364, 368, 374, 390, 396, 400, 438, 457, 462, 463, 466, 468, 470, 480, 518, 519, 767, 779, 868
- Kontrollfläche 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 332, 333, 334, 335, 337, 338, 339, 340, 342, 343, 344, 345, 349, 633
- konvektiv XXV, 223
- konvektive Änderung 223
- kopflastig 83
- Körpergeometrie 280, 281, 664, 667
- Körperoberfläche 35, 253, 269, 280, 492, 506, 627, 635
- Kraftfeld 196, 197, 262, 263, 264, 286, 364, 365, 367, 376, 389, 517
- Kraftfeld, konservatives 197, 262, 264, 286, 287, 364, 365, 376, 517
- Kreisbogenprofil 822, 839, 848, 854, 855, 856, 858, 860, 869
- Kreiszyylinder 442, 443, 444, 454, 455, 457, 480, 481, 483, 487, 595, 596, 597, 598, 600, 601, 604, 605, 606, 608, 612, 613, 614, 616, 620, 621, 631, 641, 655, 729, 747, 750, 751, 770, 777, 778, 812, 816, 834, 840, 842
- Kreiszyylinder mit Zirkulation 58, 601, 604, 605, 606, 611, 613, 614, 616, 619, 620, 621, 631, 633, 634, 638, 641, 643, 729, 747, 816, 840, 848
- Kreuzprodukt XXX, 22, 196, 204, 258, 360, 392, 489, 765
- Krümmungskreis 277
- Krümmungsradius 23, 275, 276, 277, 278
- Kugel XXXIII, 142, 179, 183, 368, 394, 445, 453, 455, 463, 465, 467, 471, 472, 480, 481, 482, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 510, 634, 732, 738, 740, 742
- kugelsymmetrisch 191, 459
- Kugelumströmung 445, 455, 488, 492, 510, 634
- Kutta-Joukowski-Theorem 39, 40, 41, 46, 58, 331, 332, 370, 611, 620, 643, 834
- Kuttasche-Abflussbedingung 43, 816
- Kutta, Wilhelm XVI, XVIII, XXX, XXXI, XXXII, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 46, 58, 62, 331, 332, 355, 369, 370, 611, 613, 614, 620, 621, 631, 632, 633, 634, 643, 644, 725, 726, 822, 834, 840, 841, 855, 857, 860, 861

Kutta-Žukovskij XVI, XVIII, XXXI, 39, 40, 41, 42, 46, 58, 331, 332, 370, 611, 620, 621, 631, 632, 633, 643, 644, 834

L

Lagrangesche Gleichung 245

Lamb, Horace 239

Lanchester, Frederick 38, 614, 631, 858, 859

Längskraft 68, 74, 82, 634, 644

Längskraftbeiwert 78, 80

Langstreckenflug 102

Laplace-Operator 267, 364, 519, 767, 779

Laplacesche Gleichung 368, 516, 518, 519, 592, 779, 784, 786, 789, 790

Laplaceschen Gleichung, homogene 368, 779

Lastverteilung 118, 119, 839

Laufzeitmissverständnis 13

Lilienthal, Otto XI, XII, 14, 16, 20, 285, 858

Lilienthalpolare 88, 96

Linienintegral XXXI, 38, 45, 266, 363, 371, 372, 375, 377, 614, 631, 644, 837

lokale Änderung XXV, 223

Loxodrome 741, 742, 862

M

Machsches Ähnlichkeitsgesetz 177

Machzahl 162, 163, 164, 174, 175, 177, 178, 184

Magnus-Effekt 52, 53, 55, 56, 57, 60, 610

Magnus, Gustav 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 610, 611, 870

Massenmittelpunkt 313

Massenpunkt 3, 226, 315, 365

Massenstrom 3, 4, 10, 18, 40, 41, 207, 208, 331, 334, 339, 344, 347, 348, 350, 374, 438

Matrix 147, 148, 157, 186, 194, 195, 196, 265, 363, 565, 573, 574, 576, 577, 578

mechanisch ähnlich 179

Mercatorprojektion 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745

Methode der Differenzialgleichungen 184

Methode der Kräfteverhältnisse 184

Methode der Maßstäbe 166, 184

Minimum Drag Speed 128, 129, 130, 132, 133, 134, 135

Modul 529, 566, 589, 590, 599, 689, 692, 720

Momentenbeiwert 78, 80, 92, 93, 94, 104, 105, 109, 172, 836, 839

Momentengleichung nach Blasius-Tschaplygin 641

N

Nabla-Operator XXVII, 389

Navier-Stokes XIV, XXIII, XXXII, 182, 191, 244, 490

Neutralpunkt 64, 65, 66, 67, 81, 85, 86, 87, 93, 103, 104, 105, 870
Newton-Raphson-Verfahren 281
Newtonsche Axiome XIV, 1, 5
Newton-Verfahren 281
Normalkraft, Normalkraftbeiwert 77, 453, 454
Nose-Down-Gleiten 97
Nose-Up-Gleiten 97
Nullauftrieb 9, 18, 67, 85, 92, 99, 111, 127
Nullmoment 65, 66, 67, 93, 94, 645
Nullmomentenbeiwert 93, 104
Nullwiderstand 370

O

Oberseitenströmung 9
Orthodrome 742
orthogonal 21, 24, 32, 36, 206, 213, 264, 270, 275, 278, 325, 338, 339, 373, 377, 388, 390,
391, 392, 393, 408, 413, 440, 441, 447, 452, 456, 479, 488, 489, 505, 581, 606, 729, 738,
745, 746, 748, 749, 750, 756, 763, 765, 769, 774, 776, 777, 790, 815, 822
Oswald-Faktor 123, 127

P

parabolische Widerstandspolare 126, 127, 128, 870
Parallelströmung 254, 278, 279, 280, 310, 402, 449, 600, 604, 608, 612, 618, 634, 641, 642,
643, 680, 681, 682, 683, 686, 692, 709, 711, 712, 714, 716, 719, 729, 817, 821
piezometrischer Druck 250, 277
Poissonsche Gleichung 377, 518, 779
Polare 88, 92, 109, 110, 115, 122
Polare, aufgelöste 88, 115
Polstelle 117, 441, 643, 644, 654, 754, 757, 758, 761, 797, 803, 805
Potenzialfunktion 241, 242, 265, 266, 268, 289, 358, 361, 363, 365, 367, 368, 388, 391, 392,
394, 396, 397, 401, 402, 414, 415, 416, 424, 431, 434, 437, 445, 446, 449, 451, 458, 459,
463, 466, 468, 471, 472, 473, 475, 477, 479, 484, 503, 512, 518, 561, 562, 566, 578, 579,
580, 583, 585, 593, 595, 603, 620, 622, 648, 649, 656, 679, 697, 710, 760, 766, 767, 774,
778, 779, 790, 792, 798, 809, 817
Potenzialströmung XXX, XXXI, XXXIII, XXXIV, 7, 32, 34, 35, 36, 38, 43, 52, 231, 238,
239, 240, 241, 242, 245, 247, 254, 259, 260, 265, 267, 268, 271, 272, 279, 280, 287, 299,
301, 302, 357, 358, 359, 360, 364, 365, 366, 367, 368, 372, 375, 376, 377, 379, 384, 391,
393, 396, 397, 400, 403, 412, 413, 422, 437, 440, 442, 444, 453, 454, 455, 458, 465, 471,
481, 484, 487, 489, 490, 492, 494, 505, 507, 517, 559, 561, 562, 563, 564, 566, 567, 578,
582, 587, 588, 592, 596, 600, 601, 610, 611, 615, 620, 621, 622, 630, 631, 632, 634, 638,
644, 687, 697, 722, 724, 725, 757, 765, 767, 770, 779, 803, 822, 823, 858
Potenzialwirbel 56, 57, 259, 261, 279, 378, 432, 434, 438, 440, 557, 559, 562, 604, 605, 608,
611, 618, 621, 622, 643, 747, 758, 760, 761, 816, 817, 818, 820, 834, 839, 841

- Prandtl, Ludwig IX, X, XI, XX, XXIII, XXXI, XXXII, 13, 33, 35, 41, 43, 57, 60, 61, 112, 114, 117, 135, 156, 175, 178, 190, 355, 365, 454, 466, 471, 488, 492, 513, 567, 592, 632, 633, 644, 687, 726, 857
- Profil VIII, XI, 5, 9, 10, 12, 13, 14, 18, 19, 23, 25, 26, 28, 31, 32, 33, 37, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 52, 53, 54, 57, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 72, 74, 75, 76, 78, 81, 82, 83, 84, 85, 88, 89, 90, 91, 92, 97, 98, 100, 101, 103, 104, 105, 108, 109, 110, 113, 115, 119, 121, 131, 156, 215, 283, 284, 311, 332, 333, 335, 420, 452, 483, 503, 613, 651, 703, 723, 729, 747, 857, 860
- Profilkontur, gekrümmte 273
- Profiloberseite 12, 16, 19, 21, 28, 31, 39, 69, 73, 74, 80, 90, 269, 271, 275, 278, 282, 284, 285
- Profilsehnenlänge 42, 44, 64, 68, 85, 88, 94, 95, 174, 183
- Profilumströmung 30, 32, 43, 49, 52, 278, 284, 331
- Profilunterseite 20, 31, 33, 70, 72, 73, 74, 79, 80, 214, 269, 271, 279, 284, 285
- Propeller 1, 4, 7, 9, 31, 99, 152, 284, 303, 306, 307, 308, 309, 310, 345

Q

- Quelle XXIX, 17, 44, 99, 146, 152, 208, 220, 225, 374, 410, 412, 413, 414, 415, 416, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 431, 432, 433, 434, 437, 456, 464, 465, 466, 467, 471, 472, 473, 474, 495, 496, 501, 509, 510, 511, 557, 558, 559, 562, 564, 645, 646, 647, 648, 654, 655, 656, 658, 664, 667, 677, 692, 694, 695, 696, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 717, 720, 754, 758, 759, 760
- Quellenfreiheit XXIX, 208, 222, 270, 293, 377, 391, 397, 414, 415, 434, 437, 438, 470, 484, 764, 765, 767
- Quellen-Senken-Kombination 510, 593, 594, 677, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 705, 719, 808, 810
- Quellen- und Senkenströmung, räumlich 463
- Querkraft XXXI, XXXIII, 52, 55, 56, 58, 423, 484, 610, 611, 612, 613, 614, 620, 621, 626, 627, 631, 634, 641, 643, 644, 747, 815, 823

R

- Randbedingungen X, 49, 97, 104, 133, 191, 207, 241, 254, 257, 268, 269, 270, 301, 302, 358, 368, 385, 400, 401, 469, 470, 579, 663, 666, 674, 675, 676, 691, 692, 699, 702, 737, 746, 749, 753, 792
- räumliche Quellen- und Senkenströmung 463
- räumlicher Dipol 455, 471, 479, 480
- räumlicher, drehsymmetrischer Halbkörper 493
- räumlicher Halbkörper 493
- Reaktionskraft 1, 5, 17, 18, 32, 42
- Realteil **Re** der komplexen Zahl 525
- reellwertige Funktion $F(z)$ in einer komplexen Variablen 564
- Reibungswiderstand 30, 32, 33, 35, 72, 76, 126, 325, 332, 370, 507
- resultierende Kraft 64, 84, 85, 209, 315, 322, 327, 349, 422, 453, 454, 484, 610, 831, 833, 836
- Reynolds, Osborne XXIII, 47, 50, 53, 61, 135, 156, 157, 159, 161, 163, 164, 165, 166, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 183, 190, 281, 355, 455, 513, 614, 726

Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz 180
Reynolds-Zahl 156, 157, 159, 161, 163, 164, 166, 172, 173, 174, 175, 177, 179, 180, 181,
183, 281, 455
Riemannsche Blätter 753
Riemannscher Abbildungssatz 747
Runge, Carl 726, 857, 858, 859, 861
Runge-Kutta-Verfahren 857

S

Satz von Kutta-Žukovskij 631, 632, 643, 644
Satz von Schwarz 194, 242, 265, 266, 362, 363, 785, 788
Saugkraft 422, 821, 822, 823, 834, 840, 860
Schallgeschwindigkeit 161, 162, 163, 173, 178, 179, 189, 311
Scherspannung 33, 72, 75, 76, 325, 326
Schlichting, Hermann 23, 61, 112, 113, 119, 120, 122, 135, 183, 190, 278, 332, 336, 356,
358, 455, 466, 500, 513, 613, 726, 830, 835, 862
schräg angeströmte ebene Platte 797, 823
Schränkung 96, 102
Schub, installierter 346
Schubkraft 1, 4, 151, 314, 341, 345, 346, 347
Schub, nicht installierter 346
schwanzlastig 836
Schwenkdüse 338, 341, 346
Schwerkraft 19, 50, 51, 53, 177, 227, 276, 286, 287, 290, 291, 294, 303, 315, 366
Schwerpunktsatz der Mechanik 316
Sehne 841, 842, 848, 860
Senke 208, 220, 225, 374, 410, 414, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 431, 432, 434, 437,
466, 467, 470, 471, 472, 473, 474, 510, 511, 654, 655, 656, 658, 664, 677, 692, 706, 757,
758, 759, 761
Short Take-Off and Landing 49, 54, 346
Skalar 196, 223, 224, 264, 312, 338, 361, 363, 375, 396, 439, 792
skalare Funktion 240, 261, 287, 288, 360, 361, 377, 389
Skalarfeld XXVI, XXVII, XXVIII, XXX, 360, 363, 627
Slats (Vorflügel) 346
spezifische Elementararbeit der Volumenkräfte 244
spezifische kinetische Energie 214, 246, 250
spezifische Verschiebearbeit 243, 245, 246, 250
Stammfunktion 256, 574, 643, 668, 741, 789, 790, 862
stationär XIV, 203, 204, 207, 213, 214, 215, 217, 219, 222, 231, 240, 243, 245, 246, 249,
251, 272, 285, 293, 296, 333, 359, 374, 808
stationäre Strömung 135, 203, 205, 246, 254, 333
statischer Druck XIII, 5, 6, 7, 8, 9, 75, 254, 309, 311, 333, 610, 619, 626
stereografische Projektion 733, 734, 735, 737, 738, 742, 743, 744
Stokessche Stromfunktion 456, 459, 471, 477, 479, 484, 502, 512

- STOL (Short Take-Off and Landing) 49, 54, 55, 346
- Stoß 312, 314, 365, 367
- Streckung 95, 96, 99, 101, 102, 111, 112, 115, 121, 122, 123, 124, 125, 132, 169, 170, 571, 578, 793
- Stromfaden 180, 181, 201, 206, 209, 210, 219, 221, 398, 400, 408, 409
- Stromfunktion XXX, 360, 388, 389, 390, 391, 392, 394, 397, 398, 399, 400, 401, 404, 405, 410, 412, 414, 415, 416, 424, 425, 426, 429, 431, 432, 434, 437, 441, 443, 445, 446, 449, 450, 456, 458, 459, 463, 471, 472, 476, 477, 479, 484, 485, 493, 502, 503, 512, 515, 518, 558, 560, 561, 564, 566, 579, 583, 585, 593, 595, 601, 603, 604, 605, 614, 616, 618, 637, 640, 641, 648, 650, 656, 663, 679, 680, 681, 686, 688, 692, 697, 699, 702, 705, 710, 711, 749, 760, 767, 779, 784, 787, 792
- Stromfunktion, Stokessche 456, 459, 471, 477, 479, 484, 502, 512
- Stromlinie VII, VIII, XXVIII, 19, 20, 21, 22, 23, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 210, 213, 216, 217, 218, 219, 221, 246, 247, 248, 249, 251, 253, 254, 255, 256, 257, 259, 271, 273, 275, 278, 279, 280, 282, 284, 290, 291, 292, 293, 295, 296, 297, 301, 350, 352, 358, 379, 389, 390, 399, 400, 406, 407, 409, 435, 440, 442, 446, 447, 457, 464, 502, 581, 596, 600, 601, 608, 634, 637, 645, 648, 650, 656, 676, 680, 682, 683, 686, 699, 704, 705, 706, 709, 711, 712, 713, 714, 716, 719, 729, 747, 749, 754, 757, 768, 772, 775, 802, 807, 817, 818, 825, 828, 829, 857
- Stromröhre 201, 206, 207, 209, 219, 221, 293, 303, 304, 305, 309, 310, 374
- Strömungsfeld XXIV, XXV, XXVIII, XXX, 8, 9, 26, 27, 38, 45, 160, 164, 166, 167, 173, 175, 177, 178, 185, 205, 212, 214, 216, 220, 223, 224, 225, 229, 234, 239, 246, 247, 249, 251, 254, 259, 264, 265, 271, 272, 277, 289, 303, 317, 319, 320, 328, 374, 375, 377, 385, 387, 388, 394, 395, 399, 417, 419, 420, 421, 422, 455, 469, 470, 479, 486, 487, 488, 494, 495, 515, 586, 587, 599, 600, 606, 614, 618, 620, 621, 631, 646, 648, 652, 664, 667, 682, 704, 729, 750, 751, 755, 756, 768, 769, 770, 772, 778, 791, 796, 797, 801, 802, 803, 804, 806, 808, 809, 820, 823, 825, 828, 829, 831, 837
- Strömungsfunktion 515, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 578, 579, 583, 586, 587, 590, 594, 597, 599, 601, 631, 635, 637, 638, 641, 645, 648, 655, 656, 663, 668, 669, 671, 679, 686, 688, 689, 692, 697, 698, 710, 719, 720, 721, 749, 750, 751, 753, 754, 756, 758, 759, 760, 761, 774, 808, 809, 816, 817, 855
- Strömungsumlenkung 5, 19, 49
- Strouhal-Zahl 180
- substantielle Änderung 223, 320
- substantielles Differential 223
- Swivel Nozzle, Schwenkdüse 336, 337, 346, 347
- symmetrische Körper 271

T

- Tietjens, Oskar XX, 41, 57, 61, 156, 190, 355, 356, 365, 447, 454, 466, 471, 488, 492, 512, 513, 557, 580, 581, 592, 632, 678, 684, 688, 694, 699, 726, 803, 818, 862
- Trägheitskraft 21, 165, 179, 226, 228, 274, 490
- Tragkraft 1, 346, 347
- Trennungsfläche 116, 117, 120, 836

Triebwerk 24, 313, 314, 323, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348
Truckenbrodt, Erich 23, 61, 112, 113, 119, 120, 122, 135, 224, 278, 315, 332, 356, 358, 410,
454, 455, 466, 471, 474, 475, 476, 477, 500, 513, 613, 726, 830, 835, 862
Tschaplygin, Sergei 638, 641, 856, 860, 862
Turbofan 55, 341, 342, 343
Turbojet 323, 341

U

umkehrbar eindeutige Abbildung 748, 761, 762
Umströmung eines Kreiszylinders 443, 444, 452, 601, 634, 666, 729, 748
Umströmung eines Kreiszylinders mit Zirkulation 58, 601, 604, 605, 606, 611, 613, 614,
616, 619, 620, 621, 631, 633, 634, 638, 641, 643, 729, 747, 816, 840, 848
Umströmung eines Kreiszylinders ohne Zirkulation 443, 452
uninstallierter Schub 346
Unterseitenströmung 13
unvollständige Ähnlichkeit 169, 172
Upwash 17, 19, 39, 118, 369

V

Vektor XXVI, XXVII, XXIX, 3, 22, 23, 193, 196, 201, 203, 204, 217, 223, 227, 257, 259,
262, 275, 276, 312, 324, 327, 360, 363, 377, 389, 392, 395, 398, 428, 474, 489, 519, 529,
569, 627, 634, 635, 765, 859
Vektoranalysis V, XVI, XIX, XXIII, XXIX, XXX, 38, 46, 195, 196, 197, 204, 220, 223, 331,
389, 392, 396, 489, 613, 765
Vektorfeld XXVI, XXVIII, XXIX, XXX, 195, 201, 220, 225, 239, 242, 266, 287, 301, 359,
360, 361, 363, 364, 374, 389, 395, 437
Vektorprodukt 258, 380
Vertauschungsprinzip 401, 456, 477, 479, 512, 560
Verzerrung 168, 706, 733, 735, 793, 812
Verzerrungsfaktor 794, 795, 799, 805, 813, 825, 848, 850, 853
Verzerrungszahl 794, 799, 841, 847
Viskosität XXXV, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 43, 51, 52, 56, 95, 119, 140, 142, 144, 146, 152,
155, 157, 161, 163, 173, 174, 175, 177, 182, 183, 185, 206, 207, 221, 310, 322, 326, 422,
490, 505, 611
vollständige Ähnlichkeit 169, 172, 184
Volumenkraft 191, 194, 195, 196, 226, 227, 228, 230, 244, 248, 249, 254, 274, 286, 287,
294, 295
Volumenstrom 141, 207, 208, 304, 305, 309, 310, 321, 330, 398, 399, 409, 422, 432, 456,
458, 459, 466, 468, 495, 501, 646, 647, 655, 692, 695
Vorflügel 281, 346
V-Stellung 96

W

- Wandkontur 270, 271, 399, 648
Wechselwirkungsgesetz 4, 5, 17, 19, 42, 54, 343, 369, 609, 618
Wechselwirkungswiderstand 346
Wegintegral 375, 378, 379, 385, 386, 395, 643
Weg- oder Linienintegral 375, 377, 614
Weltner, Klaus VIII, XII, 5, 12, 13, 14, 17, 41, 42, 51, 52, 58, 61, 62, 611, 632
Widerstand XVI, XXXV, 12, 34, 35, 36, 43, 53, 64, 68, 91, 92, 95, 97, 103, 111, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 129, 130, 132, 133, 134, 157, 184, 185, 192, 227, 326, 327, 332, 333, 335, 346, 453, 455, 484, 507, 610, 614, 666, 822, 823
Widerstand, induzierter 114, 115, 120, 121, 122, 123, 126, 132, 133
Widerstandsbeiwert 78, 88, 95, 96, 105, 109, 112, 113, 127, 156, 159, 188, 332, 335, 336, 453, 506, 507
Widerstandskraft XXXV, 35, 67, 68, 69, 75, 97, 119, 120, 133, 143, 145, 154, 325, 335, 422, 454, 484, 505, 507, 606, 621, 626, 822, 823
Widerstandspolare 88, 97, 98, 109, 110, 112, 114, 115, 122, 126, 127, 128
Widerstandspolare, parabolische 126, 127, 128, 870
Winkelgeschwindigkeit 23, 58, 146, 151, 233, 234, 237, 260, 275, 285, 286, 296, 380, 384, 387, 388, 395, 610
winkeltreu 729, 733, 775, 776, 792, 819
winkeltreue Abbildung 578, 725, 727, 743, 750, 768, 773, 820, 861
Wirbel, freier 118
Wirbel, gebundener 118

Z

- Zeiger 519, 526, 527, 528, 529, 531, 533, 534, 539, 559, 566, 581, 584, 588, 596, 598, 654, 656, 670, 672, 678, 679, 692, 710, 795, 808, 847
Zentrifugalkraft VIII, 192, 286, 290, 292
Zentripetalbeschleunigung 19, 22, 23, 32, 273, 275, 276, 284
Zentriwinkel 846, 855, 857
Zirkulation XI, XXX, XXXI, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 56, 58, 62, 260, 266, 331, 332, 359, 363, 367, 369, 370, 371, 372, 379, 385, 423, 440, 441, 443, 446, 452, 480, 482, 487, 505, 595, 601, 603, 604, 605, 606, 607, 611, 613, 614, 615, 616, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 630, 631, 632, 633, 634, 638, 641, 642, 643, 644, 729, 747, 766, 815, 816, 817, 818, 821, 822, 823, 828, 831, 834, 836, 837, 839, 840, 841, 848, 858, 859
Žukovskij, Nikolai Jegorowitsch XVI, XVII, XVIII, XXX, XXXI, XXXII, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 46, 58, 331, 332, 356, 370, 611, 614, 620, 621, 631, 632, 633, 638, 643, 644, 726, 834, 859, 862
Zweites Newtonsches Axiom 3, 4, 141, 314
Zylinderkoordinaten 435, 437, 439, 440, 442, 444, 449, 455, 460, 462, 479