

F. W. Dustmann

Navigation und Aerodynamik

Fürst-Johann-Moritz-Gymnasium Siegen, September 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Standortbestimmungen	3
1.1 Kreuz- und Doppelpeilung	3
1.2 Horizontalwinkelpeilung	9
1.3 Funknavigation für Flugzeuge	13
1.4 Satellitennavigation	18
1.5 Gemischte Aufgaben zur Standortbestimmung	22
2 Kursbestimmungen	25
2.1 Windvektoren und Ballonfahrt	27
2.2 Geschwindigkeiten	33
2.3 Das Strömungs- und Winddreieck	37
2.4 Gemischte Aufgaben zur Flugplanung	42
2.5 Klausurbeispiele	45
3 Kompass und Missweisung	49
4 Segelflug und Gleitverhältnisse	54
5 Höhen- und Tiefenmessung	58
6 Statischer Auftrieb und Ballonfahrten	64
7 Dynamischer Auftrieb und Kräfte beim Flugzeug	67
7.1 Reaktionsprinzip und dynamischer Auftrieb	67
7.2 Druckverhältnisse an gekrümmten Flächen	70
7.3 Der Coanda-Effekt und das Euler'sche Prinzip	73
7.4 Strömungsgeschwindigkeit an der Tragfläche	76
7.5 Kräfte an der Tragfläche	78
7.6 Formeln für Auftrieb und Luftwiderstand	81
7.7 Staudruck und Geschwindigkeitsmessung	88
7.8 Polardiagramm und Flugphasen	90
7.9 Gemischte Aufgaben	94

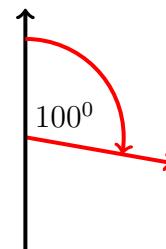
8 Steuerung, Stabilität und Antrieb beim Flugzeug	96
8.1 Steuerung und Kurvenflug	96
8.2 Start- und Landehilfen	99
8.3 Drehmomente und Stabilität	101
8.4 Propeller- und Düsenantrieb	105
8.5 Gemischte Aufgaben	109
9 Allgemeine Aerodynamik mit Anwendungen	111
9.1 Das Gesetz von Bernoulli	111
9.2 Der Magnuseffekt	114
9.3 Segeln am Wind	116
9.4 Kontrollaufgaben	118
10 Überschallflug	119
10.1 Schall und Schallgeschwindigkeit	119
10.2 Bewegungen bei großer Geschwindigkeit	122
10.3 Spezielle Probleme des Überschallflugs	124
11 Weitere Übungen und Klausurbeispiele	125
12 Anhang	129
12.1 Hinweise für Lehrer	129
12.2 Die Wirbeltheorie des Auftriebs	130

1 Standortbestimmungen

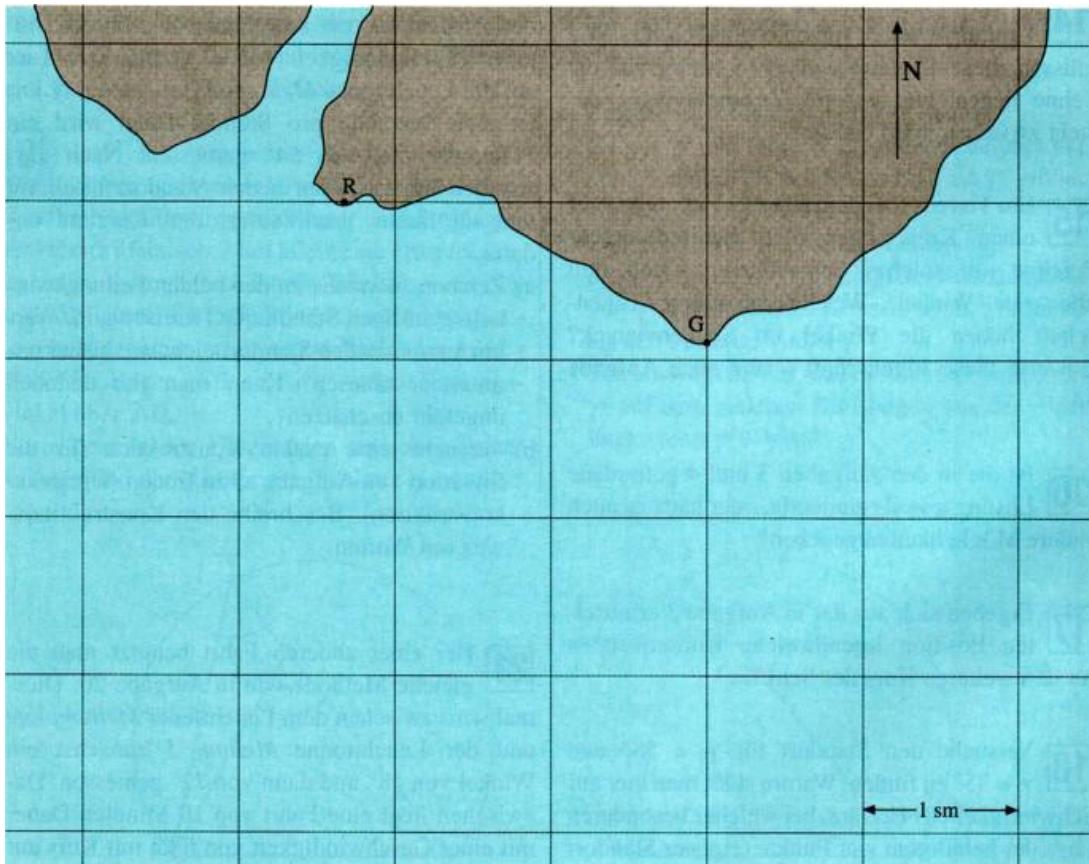
Eine der wesentlichen Grundlagen der Navigation ist die Standortbestimmung, denn eine solide Kursplanung ist ohne die genaue Kenntnis des jeweiligen Standortes nicht möglich. Wir werden in diesem Kapitel verschiedene Methoden der Standortbestimmung kennenlernen. Dazu gehören die Standardmethoden der Küstenschiffahrt (Kreuzpeilung, Doppelpeilung, Horizontalwinkelmessung), die teilweise auch in der Fliegerei eingesetzt werden, aber auch moderne, satellitengestützte Standortbestimmungen, wie GPS oder in Zukunft auch Galilei.

1.1 Kreuz- und Doppelpeilung

- 1 In der Navigation werden Richtungen stets durch einen Winkel gekennzeichnet. Dabei handelt es sich um den Winkel zwischen der anzugebenden Richtung und der Nordrichtung. Anders als sonst in der Mathematik üblich werden die Winkel rechtsdrehend angegeben, d. h. man dreht in Gedanken *im Uhrzeigersinn* (siehe Abbildung für 100^0 rw.). Die Abkürzung rw. steht für „rechtweisend“, d.h. dass die Richtung auf die geographische Nordrichtung und nicht auf die magnetische Nordrichtung bezogen ist



- Beschreibe die Himmelsrichtungen O, S, W, SW, NW, NNW durch Richtungswinkel.
- Zeichne ein Koordinatenkreuz mit den Haupthimmelsrichtungen (N, O, S, W) und trage darin die folgenden Richtungen ein: 23^0 , 77^0 , 125^0 , 210^0 , 300^0 .



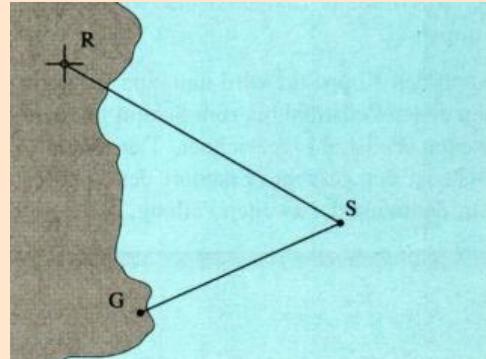
- 2** Von einem Schiff aus werden die Leuchttürme *Rübensand* (R) und *Geesthafen* (G) in den Richtungen $324,5^0$ bzw. $51,2^0$ gepeilt.
- In welchen Richtungen würde man von den Leuchttürmen aus das Schiff peilen?
 - Trage von den Leuchttürmen ausgehende Peilstrahlen in eine Kopie der Kartenskizze (auf der vorigen Seite) ein. Man bezeichnet diese Linien als **Standlinien**, weil auf ihnen der Standort des Schiffes liegt. Markiere den Standort S des Schiffes in der Kartenskizze. Ermittle die Entfernung des Standortes von den Leuchttürmen R und G. Beachte dabei, dass das Gitternetz im Seemeilenabstand angefertigt ist.

Ortsbestimmung durch Standlinien

Eine **Standlinie** liefert noch nicht den gewünschten Standort des Schiffes, sondern eine unendliche Zahl möglicher Standorte, die alle auf dieser Linie liegen. Erst der **Schnittpunkt zweier Standlinien** liefert den Schiffsort. Dies gilt für alle Verfahren der Ortsbestimmung mittels Standlinien.

Standortbestimmung durch Kreuzpeilung

Bei der **Kreuzpeilung** werden unmittelbar nacheinander zwei verschiedene Landmarken R und G gepeilt. Auf diese Weise erhält man gerade Standlinien. Peilt man z. B. die Landmarke R unter $324,5^0$, so trägt man von R einen Strahl in genau entgegengesetzter Richtung (also $144,5^0$) ab. Dies ist die erste Standlinie. Ebenso verfährt man für den Punkt G. Der Kreuzungspunkt der beiden Standlinien ist der gesuchte Schiffsstandort.



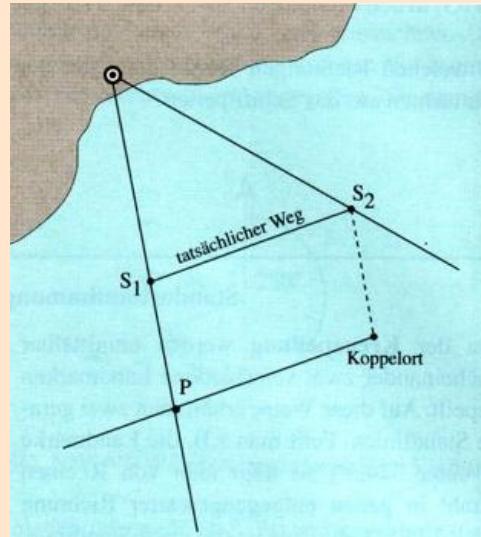
Auf spezielle Probleme der Kompasspeilung, z. B. Missweisungen, gehen wir hier nicht ein.

- 3** Von einem Schiff aus wird R unter $29,5^0$ und G unter $61,5^0$ gepeilt. Nach 20 Minuten Fahrt ist die Peilung für R 321^0 und für G $345,5^0$. Ermittle die beiden Schiffstandorte und die Geschwindigkeit des Schiffes in Knoten (1 Knoten = 1 Seemeile/Stunde).
- 4** Eine Motoryacht fährt mit 14 kn auf Kurs 320^0 . Um 11.00 Uhr werden die beiden Leuchttürme G und R unter den Winkeln 0^0 und 327^0 gepeilt. Ermittle die Standorte um 11.00 Uhr und um 11.15 Uhr. Von Strömungen und Abdrift durch Wind wird abgesehen. Welche Peilungen sind um 11.15 zu erwarten?
- 5** Ein Schiff fährt mit 6,5 kn auf Kurs 81^0 . Um 14.00 Uhr wird der Leuchtturm R in Richtung 35^0 , eine Stunde später in Richtung 294^0 gesehen.

- a) Berechne wieder die Peilwinkel, unter denen das Schiff um 14 und 15 Uhr vom Leuchtturm aus gesehen wird, und trage die Peilstrahlen in eine Kopie der Kartenskizze ein.
- b) Lege willkürlich irgendwo auf dem Peilstrahl von 14 Uhr einen Hilfspunkt P fest, und zeichne den Kurs unter dem oben angegebenen Winkel ein. Trage auf dieser Linie die zurückgelegte Strecke maßstabgerecht ab. Der so ermittelte Ort heißt in der Navigation **Koppelort**. Er ist i. A. noch nicht mit dem wahren Schiffsstandort identisch, warum nicht?
- c) Ermittle nun ausgehend vom Koppelort den wahren Schiffsstandort durch eine geeignete geometrische Konstruktion und zeichne den zurückgelegten Weg in die Kartenskizze ein.
- d) Dieses Verfahren wird als **Doppelpeilung** bezeichnet. Es ist im Allgemeinen mit einer größeren Unsicherheit behaftet als die Kreuzpeilung. Überlege, warum dies so ist.

Standortbestimmung durch Doppelpeilung

Eine Landmarke wird zweimal in größerem Zeitabstand gepeilt, sodass die Peilungswinkel deutlich unterschiedlich sind. Von dieser Landmarke aus werden in der Seekarte in genau entgegengesetzter Richtung zwei Peilstrahlen eingezeichnet. Durch einen willkürlich festgelegten Ort auf dem ersten Peilstrahl wird der anliegende Kurs als Gerade eingezeichnet und auf der Kursgeraden von diesem Ort ausgehend der zurückgelegte Weg abgetragen. Der so ermittelte Endpunkt des Weges heißt **Koppelort**. Durch den Koppelort wird nun eine Parallele zum ersten Peilstrahl bis zum Schnitt mit dem zweiten Peilstrahl gezeichnet. Der Schnittpunkt ist der gesuchte Standort des Schiffes zum Zeitpunkt der zweiten Peilung.



- 6** Ein Schiff fährt mit Kurs 105° mit unbekannter Geschwindigkeit. Zunächst wird der Leuchtturm R (siehe Kartenskizze zu Aufgabe 2) in Richtung 54° , nach einer Stunde in Richtung 303° gepeilt. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das Schiff in der Nähe einer Bakentonne, die nach Ausweis der Seekarte 4,1 sm von R entfernt ist. Wie schnell ist es gefahren (Angabe in kn)?
- 7** Eine Segelyacht fährt auf Kurs 85° mit 8 kn und peilt um 15.12 Uhr den Leuchtturm G unter 72° . Um 15.36 Uhr wird G unter 41° gepeilt. In welchem Abstand wird das Kap bei G passiert, wenn der Kurs beibehalten wird? Man nennt diesen Abstand den **Passageabstand**. Es handelt sich um die Länge des Lotes von G auf die Kurslinie.

8 Ein Schiff läuft mit Kurs 102^0 vor der Küste entlang (siehe Skizze zu Aufgabe 2). Der Leuchtturm G wird zunächst am Ort S_1 unter 77^0 und dann am Ort S_2 unter 52^0 gepeilt, nachdem eine Strecke von 2 sm zurückgelegt worden ist.

- Berechne die Winkel zwischen den Peilstrahlen und der Kursgeraden. Warum bezeichnet man diese Methode wohl als **Verdopplungspeilung**?
- Begründe, warum das Schiff in S_2 zwei Seemeilen von G entfernt ist.
- Formuliere eine Regel, wie man mit der Verdopplungspeilung die Entfernung von einer Landmarke bestimmen kann.

9 Ein Schiff fährt mit Kurs 85^0 vor der Küste entlang (siehe Skizze zu Aufgabe 2). Bei dieser Fahrt wird der Leuchtturm G bei der ersten Peilung unter 40^0 und bei der zweiten unter 355^0 gepeilt.

- Bestimme den Winkel zwischen den Peilrichtungen und dem Schiffskurs und skizziere den Sachverhalt. Welcher Sonderfall liegt hier vor?
- Begründe, warum in diesem Fall der Passageabstand zu G gleich der zwischen den beiden Peilungen zurückgelegten Strecke ist.

Aus der Kartenkunde: **Seekarten**

Ein Blick auf die abgebildeten Seekarten (s. u.) zeigt zunächst eine verwirrende Vielfalt von Linien, Zahlen und merkwürdigen Symbolen, die kaum an das von Landkarten gewohnte Bild erinnern. Tatsächlich findet man vor Ort eine mehr oder weniger gleichmäßige Wasseroberfläche, auf der man sich als Laie nur schwer orientieren kann. Die Zahlen stellen Angaben über Wassertiefen dar. Diese Angaben beziehen sich allerdings nicht auf die sonst übliche Bezugshöhe Normalnull (Meereshöhe), sondern auf ein so genanntes **Kartennull**. Dieses Nullniveau ist in der Nordsee die Höhe des Wasserstandes bei einem mittleren *Springniedrigwasser*. Vielleicht hast du im Erdkundeunterricht bereits gelernt, dass eine *Springflut* zustande kommt, wenn sich Sonne, Mond und Erde ungefähr in einer Linie befinden, da sich dann die Gezeitenwirkungen beider Himmelskörper gegenseitig verstärken. Wenn in manchen Gebieten der Erde gerade eine Springflut ist, ist in anderen Gebieten dementsprechend ein *Springniedrigwasser*, also ein besonders ausgeprägtes Niedrigwasser, dessen langjähriger Mittelwert das Nullniveau der Seekarte bestimmt. In der Ostsee, wo es nur schwache Gezeiten gibt, ist das Kartennull die Höhe des Wasserstandes bei Mittelwasser, also genau zwischen Ebbe und Flut.

Die Zahlen selbst sind Tiefenangaben in Metern, wobei die tiefer gestellte kleinere Zahl die erste Dezimale angibt. Gebiete mit einer Wassertiefe von weniger als 6 m sind in der Karte blau dargestellt, die übrigen Gebiete weiß. Der grüne Bereich fällt bei Niedrigwasser trocken. Die Zahlen mit dem Strich darunter geben an, wie hoch dieses Gebiet über dem Kartennull liegt. Bei Flut wird es natürlich vom Wasser überströmt. Man findet in diesem Gebiet natürlich auch einige Wracks (rechts unten in Karte 1 durch  dargestellt). Das Festland selbst wird durch eine gelbe Färbung kenntlich gemacht. Im Festlandbereich werden nur für die Navigation wichtige Objekte dargestellt, wie Kirchtürme, Sendemasten, Deiche usw.

Weiterhin sind in der Seekarte wichtige Orientierungshilfen für den Seefahrer eingezeichnet, so vor allem Leuchtfeuer (durch • und F gekennzeichnet), die der Orientierung bei Nacht dienen. Im Kartenausschnitt 1 finden wir das Leuchtfeuer *Mellumplate*, das bei mittleren Sichtverhältnissen 12 sm weit zu sehen ist. Es handelt sich um ein so genanntes Leitfeuer (Lt-F), da es durch einen seiner Sektoren eine spezielle Fahrrinne markiert (das Wangerooger Fahrwasser in Richtung WNW). Die Angaben in der zweiten Zeile bedeuten, dass es sich um unterbrochene Lichtscheine(Ubr.) handelt, die in den Farben weiß (w), rot (r) und grün (gn) vorkommen. Der Umkreis des Leuchtfeuers ist in Sektoren eingeteilt, die durch vom Leuchtfeuer ausgehende Strahlen begrenzt werden. Innerhalb eines solchen Sektors sieht man das Leuchtfeuer stets in der gleichen Farbe, die in der Karte durch einen großen Kreis um das Leuchtfeuer herum dargestellt ist (statt weiß in der Karte gelb). Im Kartenausschnitt sind noch weitere Sektorbegrenzungen zu erkennen, die zu Leuchtfeuern gehören, die außerhalb des Ausschnittes liegen.

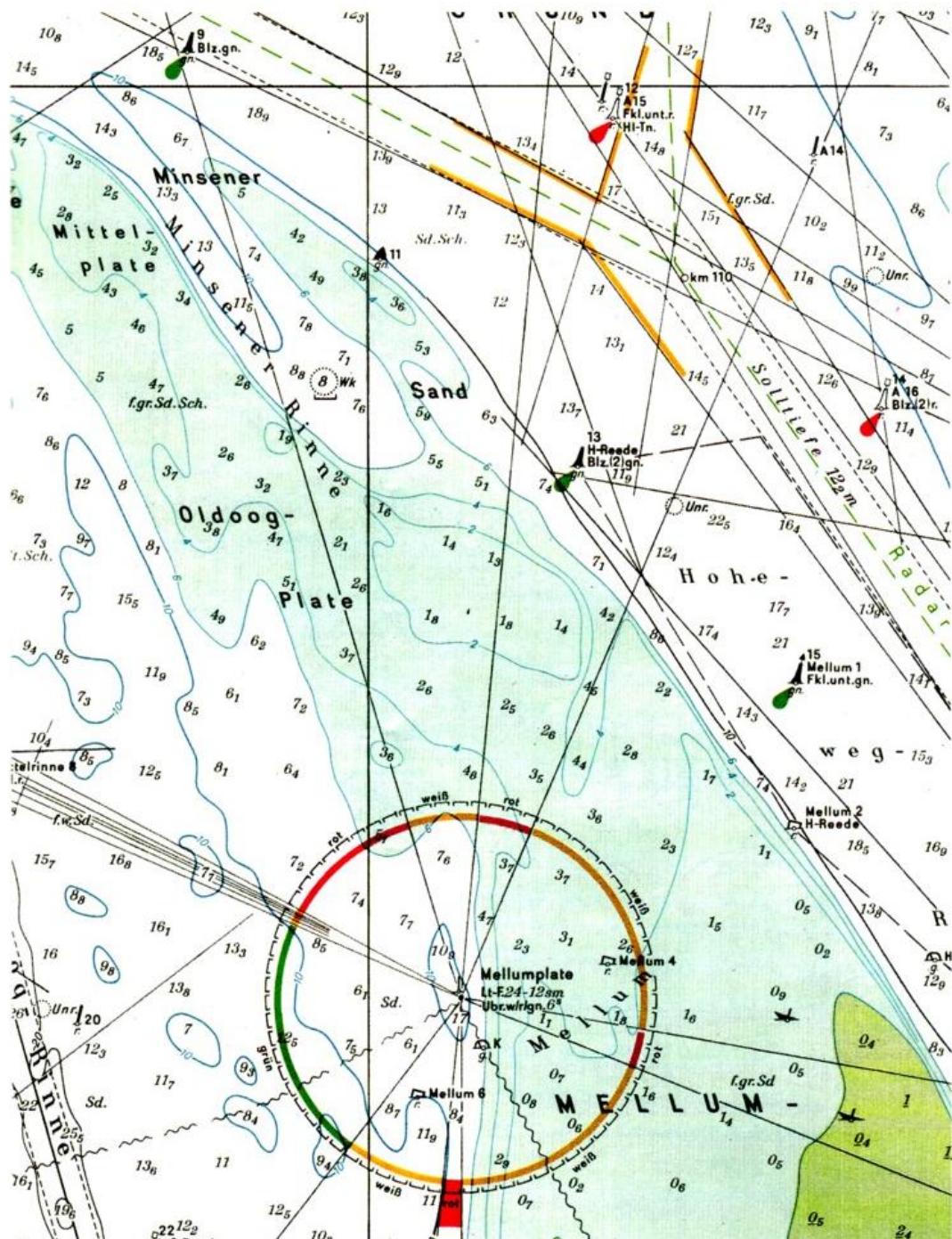
Darüber hinaus findet man eine Reihe weiterer Seezeichen in der Karte, die hier nicht alle erläutert werden können. Man kennt als schwimmende Seezeichen u. a. Stumpf-, Spitz-, Baken-, Spieren- und Leuchttönen, die häufig oben noch verschiedene Toppzeichen haben. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Kartensymbole für diese Tonnen. Die farbige Birne an den beiden rechten Symbolen bringt zum Ausdruck, dass diese Tönen befeuert sind.

Diese sehr unterschiedlichen Formen dienen der besseren Unterscheidbarkeit. An der Form der Tonne bzw. an ihrer Befeuerung kann man sie von anderen Tonnen unterscheiden, wenn man seinen Standort bestimmen will. Die Befeuerung wird in der Seekarte in der zweiten Zeile der Beschriftung genauer charakterisiert. Bei *Mellum 1* handelt es sich um ein *unterbrochenes Funkelfeuer* (Fkl.unt.), das grün (gn) leuchtet, weil es sich auf der Steuerbordseite der Fahrrinne (bei Einfahrt in den Hafen) befindet. Die Leuchttonne A 16 ist ein *Blitzgruppenfeuer mit einer Gruppe von 2 Blitzen* (BLZ.(2)), das rot (r) leuchtet, weil es sich auf der Backbordseite der Fahrrinne befindet. Es gibt darüber hinaus noch viele andere Kennungen, auf die wir hier nicht weiter eingehen.

Der zweite Kartenausschnitt in diesem Buch (s. u.) enthält englischsprachige Kennungen. Statt Blz. für Blitz finden wir dort z. B. Fl. für flash.



- 1** Was besagen die Kennungen Blz.(2)gn. bei der Leuchttonne H-Reede und Fkl.unt.r bei A 15?
- 2** Welche Wassertiefe ist in der Nähe der Tonne A 15 zu erwarten?
- 3** Welche Entfernung hat die Tonne A 16 vom Leuchtfeuer *Mellumplate*?
- 4** Wie groß ist die geringste Wassertiefe im Bereich der Untiefe *Minsener Sand*?

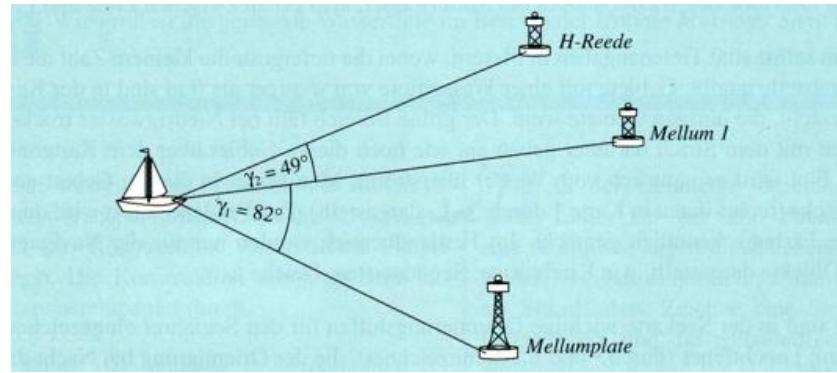


Karte 1: Seekarte der Weser-Jade-Mündung (veraltet), Maßstab 1 : 50 000

1.2 Horizontalwinkelpeilung

In der Küstenschifffahrt gibt es auch Verfahren zur Standortbestimmung, für die man keinen Kompass benötigt. Bei dem Verfahren der Horizontalwinkelpeilung benötigt man drei sichtbare Landmarken oder Seezeichen, zwischen denen der Horizontalwinkel gemessen wird, d. h. der Winkel zwischen je zwei Marken in einer Horizontalebene.

- 1** Lisa und ihr Vater segeln in die Wesermündung hinaus und werden von einer Nebelbank überrascht. Nach dem Aufklaren haben sie die Orientierung verloren und müssen ihren Standort bestimmen. Da sie den Kompass vergessen haben, messen sie die Horizontalwinkel zwischen dem Leuchtturm Mellumplate und der Leuchttonne Mellum 1 bzw. zwischen den Tonnen Mellum 1 und H-Reede (siehe Kartenausschnitt auf Seite 8).

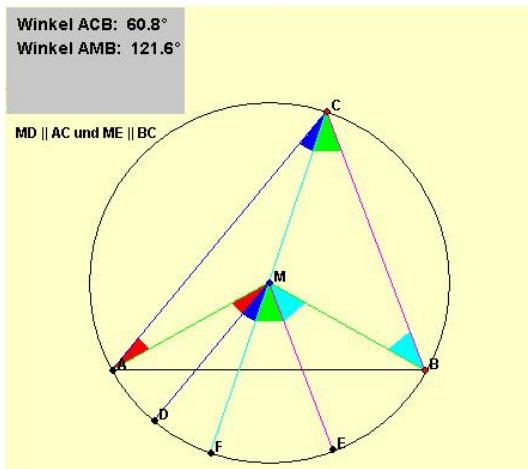


- a) Zeichne den Winkel γ_1 auf Transparentpapier und lege dieses so auf eine Kopie der Seekarte, dass die Schenkel durch das Leuchtfeuer und die Leuchttonne gehen. Mit der Zirkelspitze kannst du nun vorsichtig am Scheitelpunkt des Winkels durchstechen, sodass der Punkt auf der Kopie der Karte zu sehen ist. Markiere ihn deutlich und suche anschließend weitere mögliche Lagen des Scheitelpunktes.
- b) Falls du mindestens 5 bis 6 verschiedene Lagen ermittelt hast, versuche herauszufinden, auf was für einer Standlinie die Scheitelpunkte liegen. Versuche die Linie grob zu skizzieren. Gegebenfalls musst du noch weitere Lagen für den Scheitelpunkt ausfindig machen.
- c) Verfahre wie in Aufgabe a) und b) auch für den zweiten Winkel γ_2
- 2** In Aufgabe 1 scheinen die Scheitelpunkte alle auf einem Kreisbogen zu liegen. Um diesen Verdacht zu prüfen, zeichnen wir irgendeinen Kreis, wählen zwei Punkte A und B auf dem Kreis aus und verbinden sie durch eine Sehne. Anschließend wählen wir mindestens 6 verschiedene Punkte $C_1, C_2 \dots C_6$ auf dem Kreisbogen aus und verbinden sie jeweils mit A und B. Dabei sollten die Punkte C_i auf beiden Seiten der Sehne \overline{AB} liegen. Anschließend messen wir die Winkel $\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_6$. Was stellen wir fest? Formuliere deine Vermutung als Lehrsatz
- 3** Zeichne in die Figur von Aufgabe 2 auch noch die Verbindungen von A und B zum Kreismittelpunkt M und miss den Winkel $\mu = \angle AMB$. Vergleiche μ mit γ_i . Was stellst du fest? Formuliere auch diesen Sachverhalt als Lehrsatz.

Lehrsatz über Umfangs- und Mittelpunktwinkel

- (1) Liegen die Scheitelpunkte verschiedener Winkel $\gamma_1, \gamma_2 \dots$ auf einem Kreisbogen, der durch zwei Punkte A und B geht, und gehen die Schenkel der Winkel alle durch A und B, so sind die Winkel entweder gleich oder sie ergänzen sich zu 180° . Man bezeichnet solche Winkel als **Umfangswinkel über der Sehne \overline{AB}** .
- (2) Der Mittelpunktwinkel über der Sehne \overline{AB} ist doppelt so groß wie der zugehörige Umfangswinkel über \overline{AB} .

4 Zum Beweis des Umfangswinkelsatzes



- a) Begründe, warum die gleichfarbigen Winkel in der Zeichnung gleich groß sind.
 - b) Begründe, warum die roten und blauen Winkel gleich sind. Verfahren ebenso für die grünen und türkisfarbenen Winkel.
 - c) Erläutere, warum aus dem bisher Bewiesenen folgt, dass der Mittelpunktwinkel doppelt so groß ist wie der Umfangswinkel.
 - d) Erläutere, was sich ändert, wenn der Punkt C unterhalb der Sehne \overline{AB} auf dem Kreis liegt. Welcher Mittelpunktwinkel gehört dann zu diesem Umfangswinkel?
- 5 In Aufgabe 1 sind wir zu der folgenden Vermutung gelangt: *Wenn die Schenkel gleich großer Winkel $\gamma_1, \gamma_2, \dots$ jeweils durch A und B gehen und auf der gleichen Seite von \overline{AB} liegen, dann liegen die Scheitelpunkte dieser Winkel alle auf dem gleichen Kreisbogen, der durch A und B geht.* Prüfe, ob dies der gleiche Lehrsatz ist wie der in Aufgabe 2 von dir gefundene.

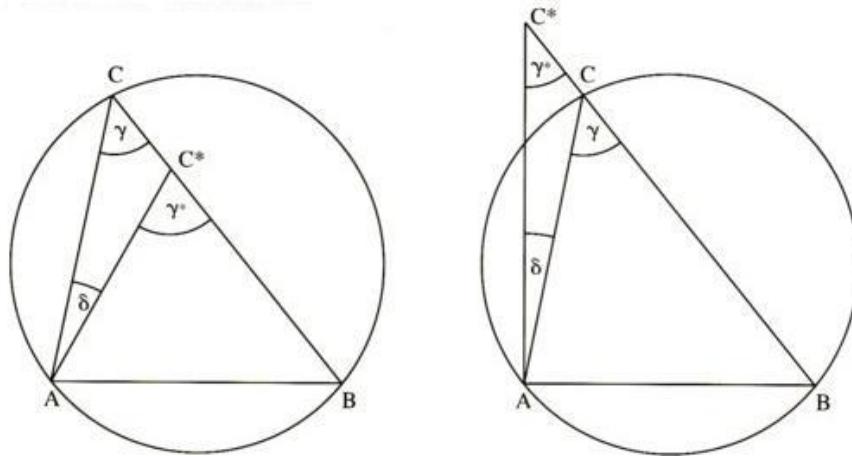
Kehrsatz des Umfangswinkelsatzes

Gehen die Schenkel zweier gleich großer Winkel γ_1 und γ_2 durch zwei Punkte A und B, so liegen die Scheitelpunkte beider Winkel auf dem selben Kreisbogen über der Sehne \overline{AB} .

6 Verwende für den Beweis des Kehrsatzes die Zeichnung auf der folgenden Seite.

- a) Zeige mit Hilfe der linken Zeichnung, dass $\delta + \gamma = \gamma^*$ ist, wenn C^* innerhalb des Kreises liegt.
- b) Zeige mit Hilfe der rechten Zeichnung, dass $\delta + \gamma^* = \gamma$ ist, wenn C^* außerhalb des Kreises liegt.

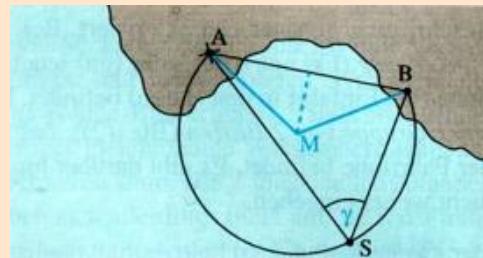
- c) Erläutere, warum aus a) und b) folgt, dass der Scheitelpunkt von γ^* auf dem zum Umfangswinkel γ gehörenden Kreisbogen gehört.



Inzwischen wissen wir, dass die gesuchte Standlinie ein Kreisbogen durch die beiden Punkte A und B ist, also ein Kreisbogen über der Sehne \overline{AB} . Es ist aber noch zu klären, wie man den Kreis konstruiert, d. h. wie man den Mittelpunkt findet. Du findest die Vorgehensweise im folgenden Info-Kasten.

Standortbestimmung durch Horizontalwinkelpeilung

Gemessen wird der **Horizontalwinkel γ** (siehe Abb.), unter dem zwei Landmarken A und B vom Schiffsstandort aus erscheinen. Die Standlinie, deren Punkte als Schiffsstandort in Frage kommen, hat die Gestalt eines Kreisbogens über der Sehne \overline{AB} . γ ist der zugehörige Umfangswinkel der Sehne. Den Mittelpunkt des Kreisbogens findet man folgendermaßen:



Fall 1: $\gamma < 90^\circ$: Man trägt auf der Karte an die Strecke \overline{AB} in den Punkten A und B jeweils den Winkel $90^\circ - \gamma$ nach der Seite des Schiffes hin an. Der Schnittpunkt der beiden freien Schenkel ist der gesuchte Mittelpunkt des Kreisbogens, auf dem sich das Schiff befindet.

Fall 2: $\gamma > 90^\circ$: Man trägt auf der Karte an die Strecke \overline{AB} in den Punkten A und B jeweils den Winkel $\gamma - 90^\circ$ nach der vom Schiff abgewandten Seite hin an. Der Schnittpunkt der beiden freien Schenkel ist der gesuchte Mittelpunkt des Kreisbogens, auf dem sich das Schiff befindet.

- 7 Begründe, warum das Konstruktionsverfahren aus dem Infokasten den gesuchten Kreismittelpunkt liefert (insbesondere auch für den Fall 2).
- 8 Erläutere, wie die Konstruktion in dem Sonderfall $\gamma = 90^\circ$ aussieht.

- 9** Bei einer anderen Standortbestimmung beträgt der Winkel zwischen dem Leuchtfeuer *Mellumplate* und der Leuchttonne *Mellum 1* 31^0 und der Winkel zwischen den beiden Leuchttönen *Mellum 1* und *H-Reede* 50^0 .
- Ermittle den Standort. Was muss in dieser Situation offenbar anders sein als bisher, weil es sonst keine Lösung gibt?
 - Erläutere, woran der Schiffsführer erkennt, auf welcher Seite der Sehne \overline{AB} er sich befindet.

Anwendungsübungen:

- 10** Ermittle den Schiffsstandort für $\gamma_1 = 51^0$ und $\gamma_2 = 28^0$, wobei die Winkel wie in Aufgabe 1 festgelegt sind.
- 11** Versuche den Standort für $\gamma_1 = 58^0$ und $\gamma_2 = 35^0$ zu finden. Warum stößt man hier auf Schwierigkeiten. Erkläre, bei welcher besonderen Lage der beteiligten vier Punkte das Verfahren nicht anwendbar ist.
- 12** Ermittle den Standort eines Schiffes für die Situation der Abbildung 1 aber jetzt mit $\gamma_1 = 112^0$ und $\gamma_2 = 69^0$. Welchen Abstand hat der Standort vom Leuchtfeuer *Mellumplate*? Gib die Entfernung in Kilometer und in Seemeilen an. Eine Seemeile (1 sm) ist gleich 1,85 km.
- 13** Nachdem erneut eine Nebelbank durchgezogen ist, sind nur noch die beiden Tonnen sichtbar. Der Horizontalwinkel zwischen ihnen beträgt 28^0 . Da sich der Standort nicht bestimmen lässt, werfen Lisa und ihr Vater den Hilfsmotor an und fahren 15 Minuten mit einer Geschwindigkeit von 4 Knoten (4 kn)¹ mit Kurs auf die Leuchttonne *Mellum 1*. Dann wird ein Peilungswinkel von 54^0 gemessen. Nach kurzer Zeit hat Lisa den neuen Standort bestimmt und rät ihrem Vater den Kurs sofort zu verändern.
- Zeichne zuerst die zu den beiden Peilungswinkeln gehörenden Standlinien (Kreisbögen). Warum kann man den Standort nicht wie bisher unmittelbar ablesen? Kann man ihn dennoch ungefähr abschätzen?
 - Versuche eine exakte Konstruktion für die Situation von Aufgabe a) zu finden (Dreieckskonstruktion). Beschreibe den Konstruktionsweg mit Worten.
 - Warum rät Lisa zum Kurswechsel?
- 14** Bei einer anderen Fahrt benutzt man die gleiche Methode wie in Aufgabe 13). Diesmal wird zwischen dem Leuchtfeuer *Mellumplate* und der Leuchttonne *Mellum 1* zunächst ein Winkel von 48^0 und dann von 72^0 gemessen. Dazwischen liegt eine Fahrt von 10 Minuten Dauer mit einer Geschwindigkeit von 6 kn mit Kurs auf das Leuchtfeuer. Ermittle die Anfangs- und die Endposition.

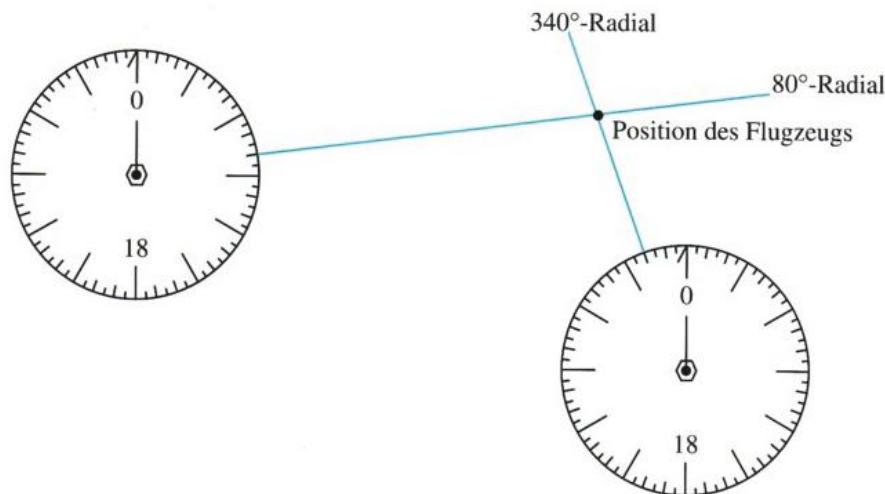
¹1 kn = 1 sm/h

1.3 Funknavigation für Flugzeuge

Aus der Praxis: UKW-Drehfunkfeuer

Auch in der Fliegerei ist eine exakte Navigation unverzichtbar. Insbesondere beim Instrumentenflug (IFR-Flug) benötigt man elektronische Hilfsmittel für die Navigation. Ganz Europa ist deswegen mit einem Netz von UKW-Sendern überzogen, mit deren Hilfe der Pilot sein Flugzeug sicher zum Ziel bringen kann. Eines der wichtigsten Systeme ist das VOR-System (VOR = Very High Frequency Omnidirectional Range), die deutsche Bezeichnung ist UKW-Drehfunkfeuer. Die Sendefrequenzen liegen zwischen 108 und 118 MHz, also direkt oberhalb der Hörfunkfrequenzen im UKW-Bereich.

Eine VOR Bodenstation sendet zwei verschiedene Arten von Funksignalen aus. Das erste Signal wird von einer rotierenden Richtantenne nur in einer, sich allerdings ständig ändernden Richtung abgestrahlt. Das zweite Signal wird gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlt. Etwas vereinfacht kannst du dir vorstellen, dass der Richtstrahl eine 360° -Drehung in 360 Sekunden ausführt, also jede Sekunde um 1° weiterrückt. Jedesmal wenn er durch die Nordrichtung geht, wird das zweite Signal in alle Richtungen (omnidirectional) abgestrahlt. Wenn nun im Empfänger des Flugzeugs das Richtsignal 75 Sekunden später als das zweite Signal eintrifft, befindet sich das Flugzeug auf dem 75° -Radial der VOR-Station, deren Sendefrequenz man eingestellt hat. In der Realität ist die VOR-Technik etwas komplizierter, als sie hier erläutert wurde. Der Richtstrahl rotiert z. B. viel schneller, nämlich mit 30 Umdrehungen pro Sekunde. Es werden auch keine kurzen Impulse ausgesendet, sondern ein sinusförmig moduliertes Dauersignal. Da die Sinuskurve des Richtstrahlers gegenüber dem Referenzstrahler proportional zum Drehwinkel verschoben wird, kann man im Empfänger aus der Verschiebung den Drehwinkel bestimmen. Technisch lässt sich dieses Verfahren leichter realisieren als das oben beschriebene, das leichter verständlich ist und auf dem gleichen Grundprinzip beruht.



Man kann nun auf dem Anzeigegerät ablesen, auf welchem Radial der eingestellten VOR-Station sich das Flugzeug befindet und dieses in die Karte einzeichnen. Hat man diese Daten noch für eine weitere Station ermittelt, so kann man in bekannter Weise eine Kreuzpeilung vornehmen.



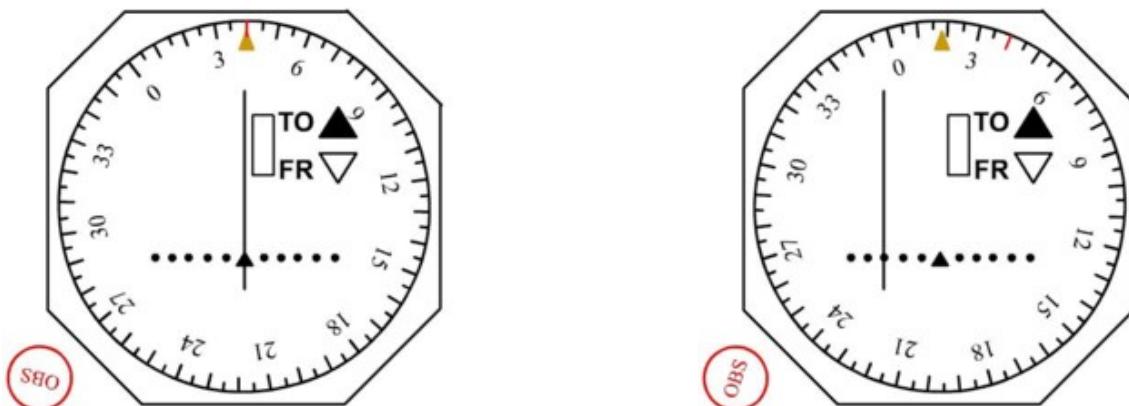
Karte 2; Maßstab 1 : 500 000; veraltet

Fortsetzung: Drehfunkfeuer

- 1 In Karte 2 auf Seite 14 findest du die beiden VOR-Stationen COLA und ARPE. Welche Sendefrequenzen haben die beiden Stationen?
- 2 Ein Flugzeug befindet sich auf dem 200^0 -Radial von ARPE und auf dem 100^0 -Radial von COLA. Ermittle die Position auf der Karte. Welchen Flugplatz würdest du als Pilot in einem Notfall ansteuern?
- 3 Stelle dir vor, du überfliegst gerade das 190^0 -Radial von ARPE und siehst unter dir eine Autobahn. Wo befindest du dich?
- 4 Ein anderes Flugzeug fliegt auf dem 20^0 -Radial von COLA. Der Pilot sieht unter sich eine Talsperre. Wo ist er?

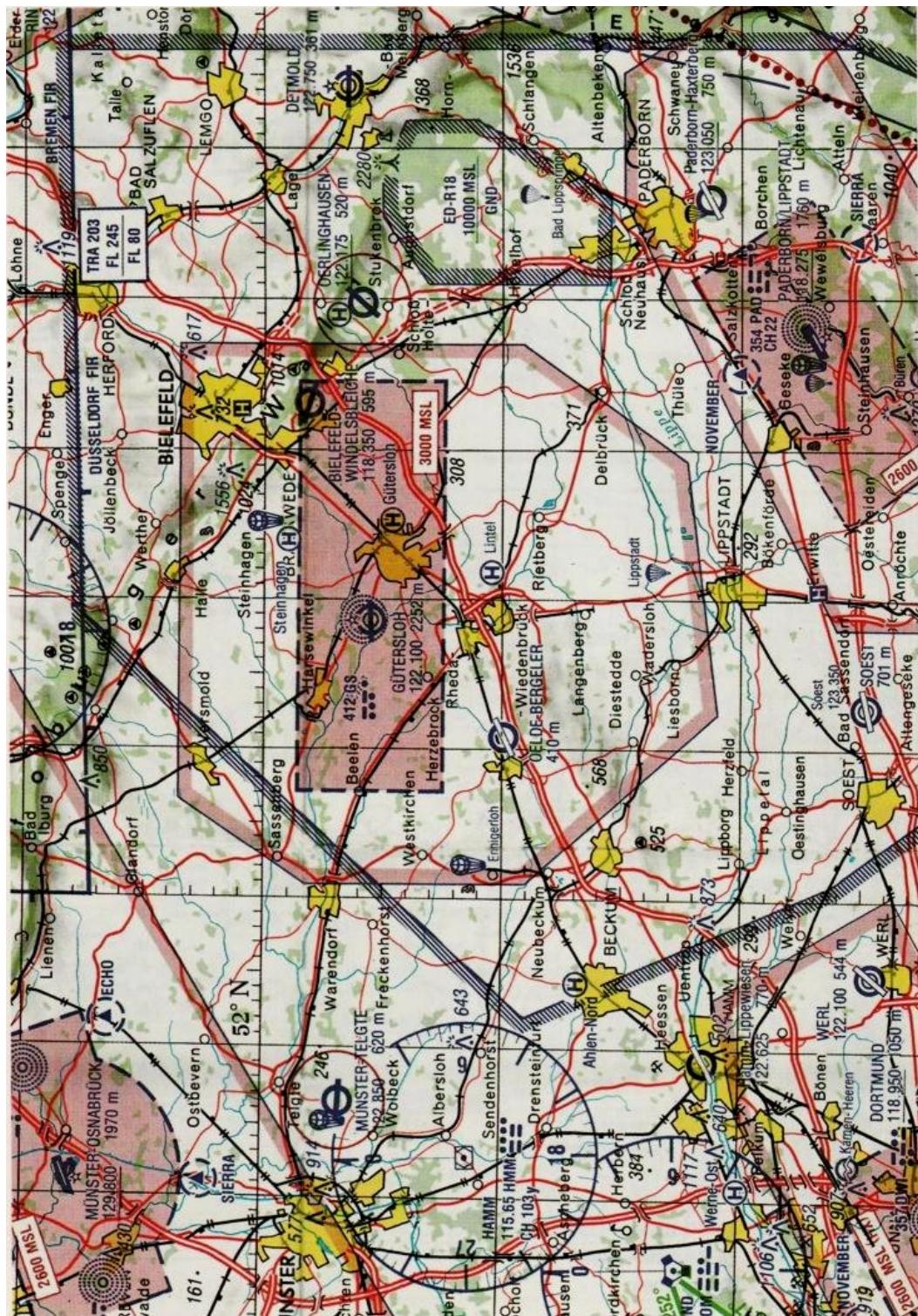
In vielen Fällen fliegt man einfach auf einem VOR-Radial als Leitstrahl von Station zu Station. Man muss dann am Empfangsgerät nur überprüfen, ob man stets auf dem gleichen Radial bleibt. Dies kann allerdings bei starkerem Wind mit Schwierigkeiten verbunden sein.

Die folgenden Abbildungen zeigen das Anzeigegerät. Die Zahlen auf der Windrose sind durch 10 geteilte Winkelangaben in Grad. Im linken Bild befindet sich das Flugzeug genau auf dem 40^0 -Radial, was daran zu erkennen ist, dass der senkrechte Strich genau in der Mitte steht. Im rechten Bild befindet sich das Flugzeug neben dem 40^0 -Radial. Wie weit entfernt man von ihm ist, erkennt man daran, wie weit der Strich von der Mittelposition entfernt ist. Will man auf einem Radial fliegen, so muss man lediglich darauf achten, dass der Strich genau in der Mitte steht.



- 5 Fertige ein Poster an, durch das deine Mitschüler über das VOR-System informiert werden. Verschaffe dir ggf. weitere Informationen aus dem Internet.
- 6 Ein Pilot möchte auf Radialen des VOR ARPE (bei Schameder) vom Flugplatz *Allendorf-Eder* zum Flugplatz *Betzdorf-Kirchen* fliegen. Ermittle das Radial für den Flug bis zum Funkfeuer ARPE und das Radial für den Weiterflug nach Betzdorf-Kirchen.

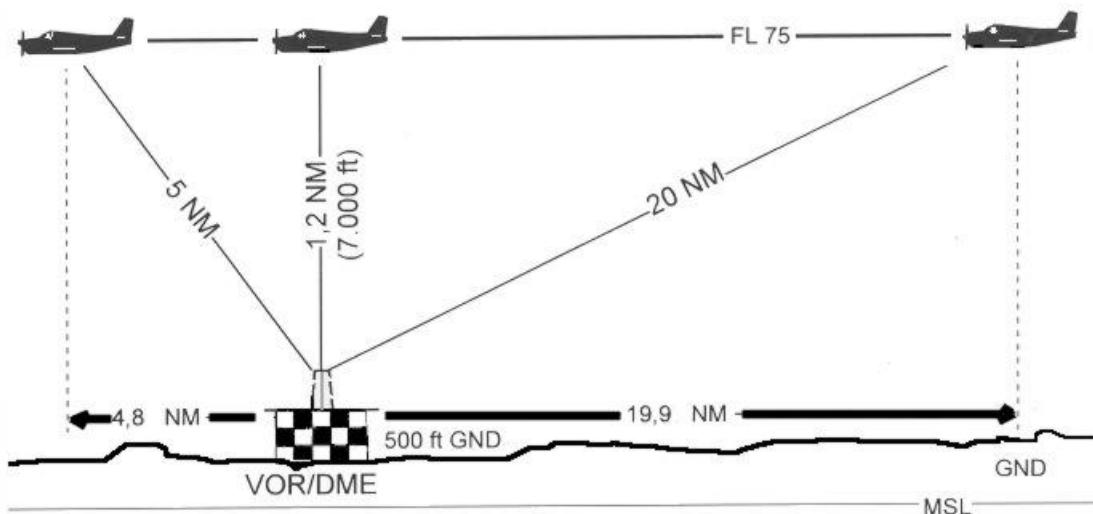
Das VOR-System lässt nur Richtungspeilungen zu, keine Entfernungsbestimmungen. Durch Kreuzpeilung kann man allerdings den Standort ermitteln, wenn man Verbindung zu zwei VOR-Stationen hat. Es gibt auch VOR-Stationen, die zusätzlich mit einem DME (DME = Distance Measurement Equipment) ausgestattet sind. Im Kartenausschnitt 3 (s.u.) gilt dies für das Drehfunkfeuer HAMM.



Karte 3; Maßstab 1 : 500 000; veraltet

Aus der Praxis: Entfernungsmessung

Einige VOR-Stationen sind mit einem DME (DME = Distance Measurement Equipment) ausgestattet. In der Flugkarte sind sie durch das spezielle Symbol ☰ gekennzeichnet. Das Bordgerät im Flugzeug sendet ein spezielles Radarsignal aus, das von der Bodenstation empfangen und nach einer fest vorgegebenen Pause beantwortet wird. Empfängt das Bordgerät die Antwort, so bestimmt es die Laufzeit T des Signals für Hin- und Rückweg (Pausenzeit wird abgezogen). Daraus berechnet es den Laufweg $s = \frac{1}{2}c \cdot T$, also die räumliche Entfernung des Flugzeugs von der Bodenstation (siehe Abbildung), worin c die Signalgeschwindigkeit (hier 300 000 km/s) ist.



In der Abbildung bedeutet: NM = Nautical Mile (Seemeile), ft = feet (Fuß), FL75 = Flight Level 75 (Flughöhe 7500 Fuß), MSL = Medium Sea Level (Normalnull).

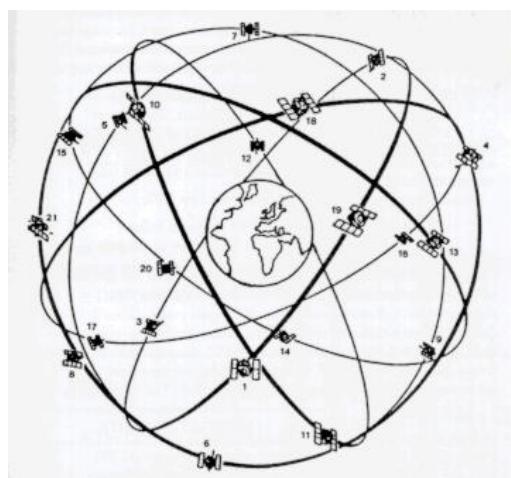
In der Regel interessiert man sich nicht für den räumlichen Abstand s , sondern für die Bodenentfernung d (fette Linie). Man kann sie mit dem Pythagorassatz ausrechnen, wenn die Höhe über Grund bekannt ist. Die Verfahren der Höhenmessung werden wir später kennenlernen.

- 1** Bei einer Flughöhe von 5000 m über Grund wird eine Signallaufzeit von 86,67 μs ($1 \mu\text{s} = 0,000\,001 \text{ s}$) gemessen. Berechne die räumliche Entfernung und die Bodenentfernung des Flugzeugs von der VOR/DME-Station.
- 2** Ein Flugzeug fliegt auf dem 90° -Radial der VOR/DME-Station HAMM und in einer Flughöhe von 5000 m. Das Radarsignal benötigt für den Hin- und Rückweg 268,7 μs . Berechne die Bodenentfernung von der Station und stelle an Hand der Karte fest, wo es sich befindet. Gib den nächstgelegenen Ort an.
- 3** Ein Flugzeug fliegt 10 000 Fuß über Grund. Das Radarsignal benötigt für Hin- und Rückweg 120 μs . Berechne die Bodenentfernung in nautischen Meilen. Besorge dir die nötigen Umrechnungsfaktoren aus Tabellenwerken oder dem Internet.

1.4 Satellitennavigation

Die heute am weitesten verbreitete Methode der Standortbestimmung ist das **Global Positioning System** (GPS), das für uns fast alltäglich geworden ist, weil es insbesondere im Straßenverkehr Verwendung findet. Es wurde ursprünglich in Amerika für militärische Zwecke entwickelt, wird aber schon seit langem auch zivil genutzt. Ein unabhängiges europäisches System mit Namen *Galilei* ist zur Zeit im Aufbau.

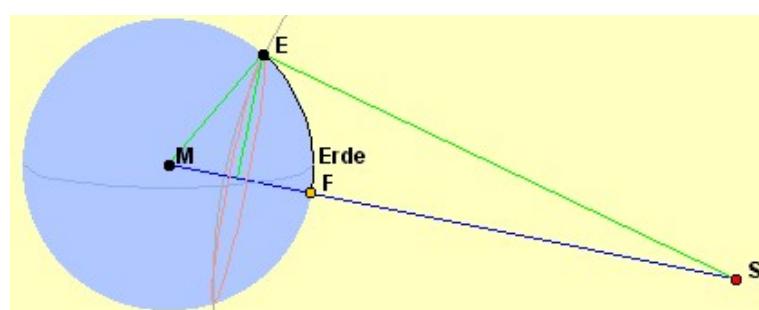
Das GPS dient der präzisen Standortbestimmung auf der Erde oder im Luftraum über der Erde. Wie bei allen anderen vergleichbaren Systemen wird der Standort als Schnittpunkt von zwei bzw. drei Standlinien auf der Erdoberfläche bestimmt. Wir kennen dies z. B. bereits von der Kreuzpeilung (2 Geraden), die in der terrestrischen Navigation und bei der Funkpeilung eingesetzt wird, oder von der Methode der Horizontalwinkelmesseung (2 Kreisbögen), die in der terrestrischen Navigation verwendet wird.



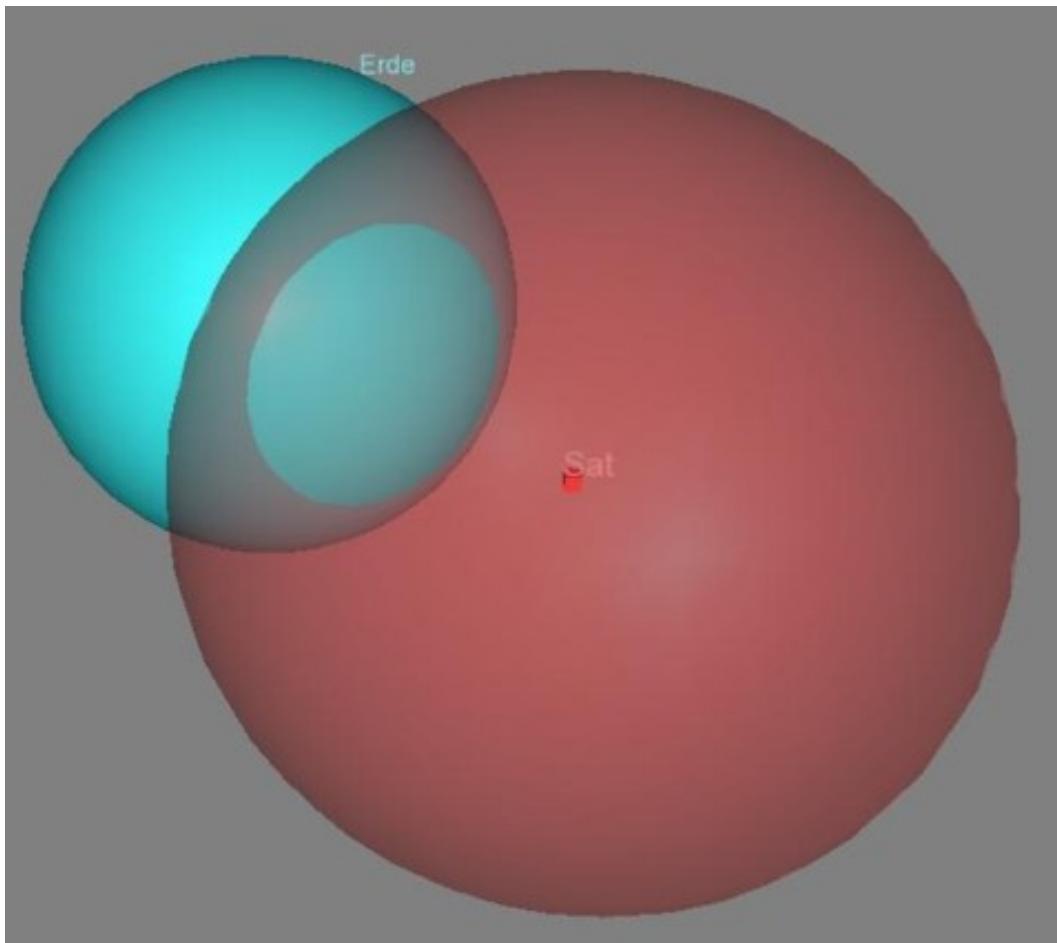
Das System verwendet insgesamt mehr als 24 Satelliten, die für einen Umlauf genau einen halben Sternentag benötigen, das sind 11 h 58 min. Ein Sternentag ist die Zeit, die die Erde für eine 360^0 -Drehung um die eigene Achse benötigt. Der mittlere Abstand der Satelliten vom Erdmittelpunkt beträgt 26 560 km. Nur in diesem Abstand haben die Satelliten die gewünschte Umlaufzeit. Die Bahnen sind so eingestellt, dass an jedem Punkt der Erde zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten „Sichtverbindung“ zum Boden haben, d. h. die Funksignale der Satelliten ungehindert die Empfänger erreichen können.

Die Sender in den Satelliten strahlen kontinuierlich Funksignale aus, die sich im erdnahen Weltraum mit Lichtgeschwindigkeit nach allen Seiten hin gleichmäßig ausbreiten. Eine Millisekunde nach der Aussendung kann das Signal also auf einer Kugel mit dem Radius 300 km um den Satelliten herum empfangen werden. Nach einer weiteren Millisekunde hat diese „Signalkugel“ bereits einen Radius von 600 km usw. Irgendwann erreicht die „Signalkugel“ die Erdoberfläche, die selbst annähernd eine Kugel ist.

- 1** Berechne den Abstand $|SF|$ des Satelliten zur Erdoberfläche, wenn der mittlere Erdradius 6360 km beträgt.
- 2** Berechne, wie lange das Signal vom Satelliten bis zum nächstgelegenen Punkt F der Erdoberfläche braucht. Man nennt diesen Punkt den Subsatellitenpunkt.

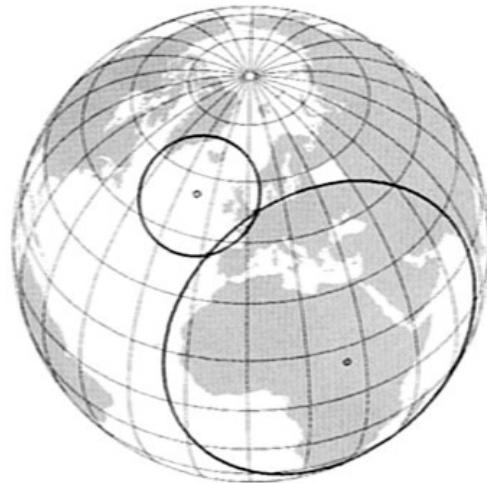


Wenn zwei Kugeln sich gegenseitig durchdringen, schneiden sie sich in einem Kreis. Unser Signal (rote Kugel in der Abbildung) wird also auf der Erdkugel auf einem Kreis zu empfangen sein, der sich vom Subsatellitenpunkt ausgehend ausbreitet, bis das Signal nicht mehr zu empfangen ist. Für eine kurze Zeit überstreicht dieser Kreis die dem Satelliten zugewandte Seite der Erde. Stelle dir vor, dass die rote Kugel in der folgenden Abbildung keinen konstanten Radius hat, sondern mit zunehmender Zeit größer wird.



- 3** Berechne den Radius $|\overline{SE}|$ der „Signalkugel“ nach $80 \mu\text{s}$ (siehe Abbildung auf Seite 18). Stelle das Dreieck MSE im Maßstab $1 : 250\,000\,000$ zeichnerisch dar. Bestimme aus der Zeichnung, wie groß der Radius des Kreises auf der Erdoberfläche ist, auf dem zu diesem Zeitpunkt das Signal empfangen werden kann. Miss auch den Winkel $\angle EMS$.
- 4** Gehe davon aus, dass der Subsatellitenpunkt auf dem 0° -Meridian bei 40° nördl. Breite liegt. Bei welchen Breiten schneidet der Signalkreis aus Aufgabe 3 dann den 0° -Meridian?
- 5** Der Empfängerpunkt E kann nur so weit nach links rücken, bis SE eine Tangente an die Erdkugel ist. Erläutere, warum das so ist. Was lässt sich in dieser Lage über den Winkel $\angle MES$ sagen? Berechne die Strecke \overline{SE} und die Laufzeit des Signals für diese Lage.
- 6** Warum ist in der Lage von Aufgabe 5 ein Empfang nur noch theoretisch möglich, in der Praxis aber nicht?

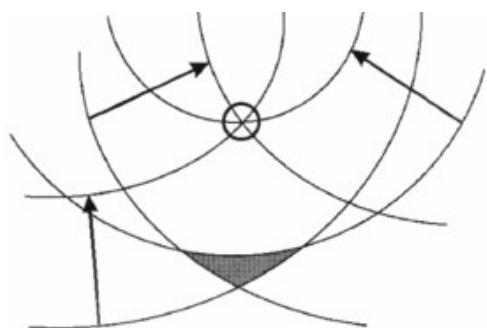
Bestimmung der Standlinien



Wenn es gelingt die Laufzeit des Signales vom Sender zum Empfänger sehr genau zu bestimmen, kann man daraus den Kreis auf der Oberfläche berechnen, auf dem sich der Empfänger befindet. Wir haben dadurch also eine Standlinie für die Positionsbestimmung gewonnen. Wenn man nun für einen weiteren Satelliten eine entsprechende Messung durchführt, erhält man eine zweite kreisförmige Standlinie (siehe Abbildung). Die beiden Kreise schneiden sich in der Regel in zwei Punkte, die als Standort in Frage kommen. Eine dritte ebenso gewonnene Standlinie liefert schließlich eine eindeutige Lage, in unserem Fall in der Nordsee (untere Abb.).

Was in der Theorie sehr gut zu gehen scheint, macht in der Praxis allerdings Schwierigkeiten. Während die Satelliten mit extrem genau gehenden Atomuhren ausgestattet sind, ist dies bei den Empfängern natürlich nicht möglich, da diese dann viel zu groß und zu teuer würden. Trotz aller Bemühungen wird die Empfängeruhr immer etwas vor- oder nachgehen, d. h. sie wird eine etwas zu große oder etwas zu kleine Laufzeit des Signales anzeigen. Die Folge davon ist, dass die Radien der Ortslinien zu groß oder zu klein sind, sodass sich die drei Kreise nicht genau in einem Punkt schneiden.

Uhrensynchronisation



In der nebenstehenden Abbildung ist dargestellt, welche Wirkung es hat, wenn durch eine falsch gehende Uhr im Empfänger die Kreisradien zu groß berechnet werden. Die drei Kreise schneiden sich nicht mehr in einem Punkt, sondern in einem kleinen Dreieck, dessen Seiten aus Kreisbögen bestehen. Der eingebaute Computer registriert diesen Fehler, führt die Berechnung sofort mit geringfügig kleineren Radien durch und überprüft das Ergebnis. Ist das Dreieck jetzt kleiner geworden, so wiederholt er die Prozedur, bis das Dreieck praktisch auf einen Punkt zusammenschrumpft. Auf diese Weise berechnet man iterativ die korrekten Radianen.

Falls im ersten Iterationsschritt die Radianen zu klein gewählt wurden, bildet sich erneut ein Dreieck auf der anderen Seite des eingekreisten Punktes. Dies registriert der Computer ebenfalls und wählt nun geeignete Zwischenwerte. Auch hier führen mehrere Wiederho-

lungen zur gewünschten Genauigkeit. Dieser Prozess läuft so schnell ab, dass der Benutzer nichts davon bemerkt.

- 7 In Aufgabe 3 hast du den Winkel $\angle EMS$ gemessen. Benutze das Ergebnis um den Kreisbogen EF (in der Abbildung auf S. 18 schwarz gezeichnet) zu berechnen. Als mittleren Erdradius verwenden wir $R = 6360$ km. Diese Größe bezeichnet man als **sphärischen Abstand** der Punkte E und F.
- 8 Führe eine entsprechende Rechnung für die Situation von Aufgabe 5 durch.
- 9 Am Anfang haben wir einiges über die Bahndaten der Satelliten erfahren. Verwende diese Angaben, um die Geschwindigkeit der Satelliten zu berechnen. Sie ist weit größer als die Schallgeschwindigkeit. Warum hören wir keinen Schallknall, wenn uns ein Satellit überquert.
- 10 Fertige ein Poster an, mit dem du deine Mitschüler über GPS informieren kannst. Besorge dir ggf. weitere Informationen und Bilder aus dem Internet.

Hinweis: Falls du den Kosinussatz kennst, kannst du den Winkel $\angle EMS$ auch berechnen.

Besonderheiten beim realen GPS

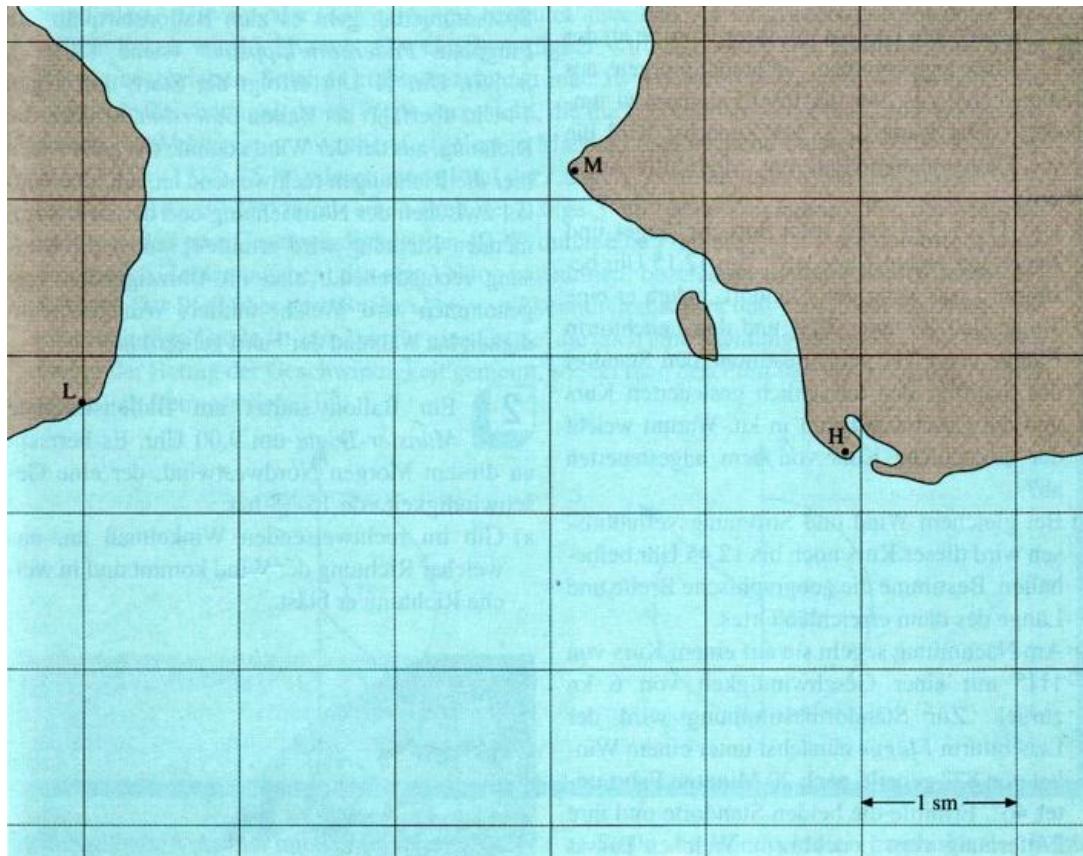
In der realen Satellitennavigation ist die genaue Berechnung des Standortes deutlich schwieriger als es hier dargestellt ist. Es ist vor allem zu berücksichtigen, dass die Erde keine exakte Kugel ist, sondern ein mehr oder weniger unregelmäßiger Körper, ein sog. *Geoid*. Die Erde ist an den Polen deutlich abgeflacht. So ist der Polradius 6356,76 km und der Äquatorradius 6378,14 km groß. Wegen der großen Geschwindigkeiten, die hier auftreten, und der extremen Genauigkeit muss bei der Zeitbestimmung sogar die Relativitätstheorie berücksichtigt werden.

Bei unserer Betrachtung sind wir mit drei Satellitensignalen ausgekommen. Tatsächlich benötigt man aber vier Satelliten. Dies hängt damit zusammen, dass man mit GPS nicht nur einen Punkt auf der Erdoberfläche bestimmt, sondern einen Punkt im Raum über der Erdoberfläche, also auch die Höhe über Normalnull. Dazu benötigt man ein weiteres Satellitensignal.

Im Flugverkehr spielt GPS nur eine untergeordnete Rolle als ergänzendes Hilfssystem. Hier werden nach wie vor Systeme wie VOR oder LORAN-C bevorzugt.

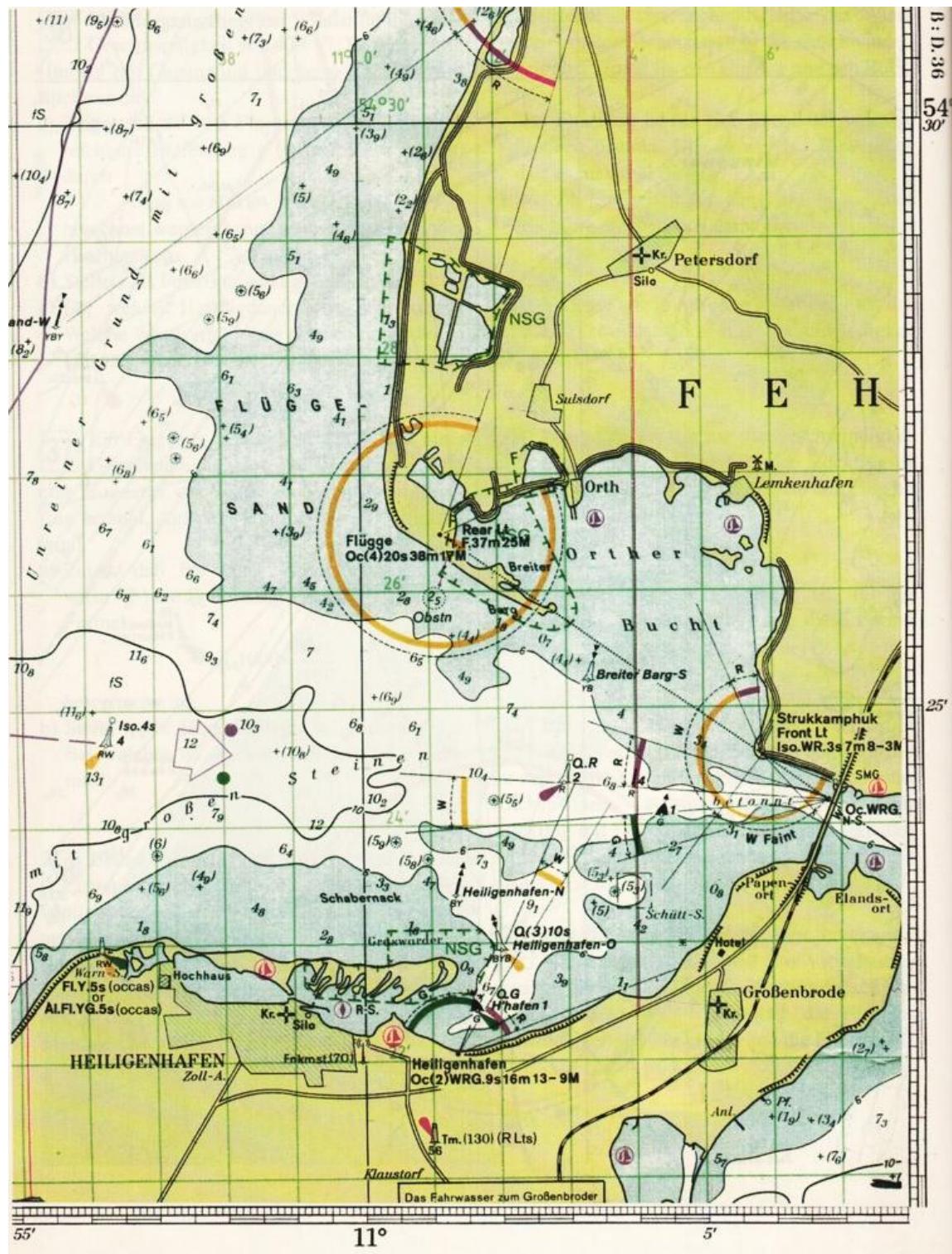
1.5 Gemischte Aufgaben zur Standortbestimmung

Es empfieilt sich die Aufgaben 1 bis 4 auf Kopien der folgenden Karte oder auf Transparenzpapier durchzuführen.



- 1** Eine Segelyacht verlässt den Hafen bei H (sieh Kartenskizze oben). Nachdem sie von der Hafenöffnung aus 5 sm gefahren ist, wird L unter 355^0 gepeilt. Wo ist der Standort der Yacht? Wie weit ist sie von L entfernt?
- 2** Von einem anderen Schiff aus werden die Leuchttürme M und L in den Richtungen 34^0 bzw. 331^0 gepeilt.
 - a) Bestimme seinen Standort und seine Entfernung von L und M.
 - b) Das Schiff steuert einen Kurs von 25^0 mit einer Geschwindigkeit von 14 kn. Ermittle den voraussichtlichen Standort des Schiffes nach 15 Minuten Fahrt. Wie weit ist er von L und M entfernt?
 - c) Nach 15 Minuten Fahrt wird M allerdings unter 141^0 und L unter 222^0 gepeilt. Stelle fest, welchen Kurs das Schiff tatsächlich gesteuert hat und wie schnell es in Wirklichkeit gefahren ist.
 - d) Gib Gründe an, die für diese Kursabweichung verantwortlich sein können. Um wie viel Seemeilen weicht der tatsächliche Standort vom vorausberechneten ab?
- 3** Ein weiteres Schiff peilt L unter 281^0 um 16.05 Uhr und unter 342^0 um 16.25 Uhr. Es fährt mit einer Geschwindigkeit von 16,5 kn auf einem Kurs von 261^0 . Ermittle den Standort des Schiffes zum Zeitpunkt der zweiten Peilung und dessen Abstand von L.

- 4 Das Kap bei M muss wegen Untiefen in einem Abstand von mindestens 0,5 sm passiert werden. Muss ein Schiff mit Kurs 343,3° diesen ändern, wenn der Kapitän bei der Standortbestimmung L unter 295,0° und M unter 350,9° peilt?
- 5 Eine Landmarke P wird von See aus zunächst unter 70° und nach einer Fahrt von 4 sm unter 25° gepeilt. Der anliegende Kurs ist 115°. Welche Entfernung hat das Schiff zum Zeitpunkt der zweiten Peilung von P?



Karte 4: Seekarte vom Fehmarn-Sund, Maßstab 1 : 100 000

6 Inzwischen ist Lisa mit ihrer Familie in der Ostsee angekommen. Sie laufen morgens aus Heiligenhafen aus, um die Insel Fehmarn zu umrunden (siehe Karte auf S. 23). Zunächst wird die Tonne Heiligenhafen-Nord mit Motorhilfe angesteuert.

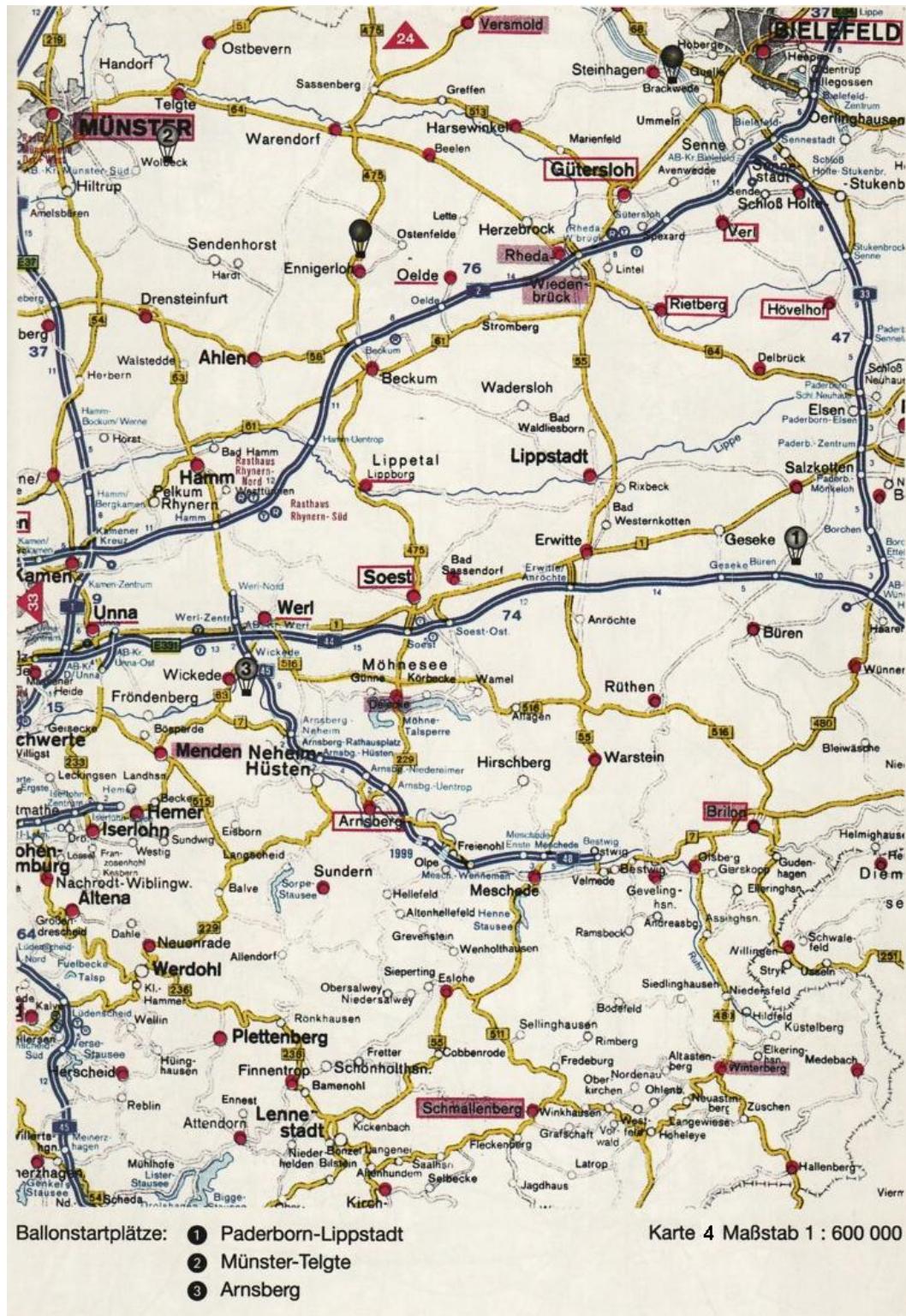
- a) Um 11.15 Uhr setzt man dort die Segel und steuert auf einem Kurs 318^0 . Um 12.15 Uhr bestimmt Lisas Vater den Standort, indem er eine Tonne (Iso.4s) unter 203^0 und den Leuchtturm Flügge unter 71^0 peilt. Bestimme den Standort des Schiffes, den tatsächlich gesteuerten Kurs und die Geschwindigkeit in kn. Warum weicht der tatsächliche Kurs von dem angesteuerten ab?
- b) Bei gleichen Wind- und Strömungsverhältnissen wird dieser Kurs noch bis 12.45 Uhr beibehalten. Bestimme die geographische Breite und Länge des dann erreichten Ortes. Beachte dazu die Skalen am Kartenrand.
- c) Am Nachmittag brechen sie die Tour ab und segeln auf einem Kurs von 111^0 mit einer Geschwindigkeit von 6 kn zurück. Zur Standortbestimmung wird der Leuchtturm Flügge zunächst unter einem Winkel von 82^0 gepeilt, nach 20 Minuten Fahrt unter 46^0 . Ermittle die beiden Standorte und ihre Entfernung vom Leuchtturm. Welchen Passageabstand von der Landzunge *Breiter Barg* wird man haben, wenn der Kurs beibehalten wird? Könnte man auf diesem Kurs die Fehmarnsundbrücke durchfahren?
- d) Während der Fahrt langweilt sich Lisa etwas und probiert noch einmal die Methode der Horizontalwinkelpeilung aus. Sie misst zwischen den Leuchttürmen *Flügge* und *Strukkamphug* einen Winkel von 95^0 und zwischen den Leuchttürmen *Strukkamphug* und *Heiligenhafen* einen Winkel von 83^0 . Bestimme den Ort und stelle fest, ob er auf dem vorher vom Vater ermittelten Kurs liegt.
- e) Der Kurs wird beibehalten, bis das Echolot eine Wassertiefe von 6 m anzeigt. Wo befindet sich das Boot dann? Bestimme den Kurzwinkel, wenn es von diesem Ort genau auf das Leuchtfeuer *Heiligenhafen* zuhält.

7 Das U-Boot-Jagdflugzeug *Aurora* wirft aus 6 000 m Höhe Horchbojen ab, die sofort nach dem Aufschlagen auf der Meeresoberfläche ein mit Mikrofonen bestücktes Kabel ins Meer abseilen. Ein Sender in der Boje funkts die aufgenommenen Geräusche zum Flugzeug, in dem ein Computer aus der Stärke der Geräusche den Standort des U-Bootes berechnet. Drei vom U-Boot-Jäger abgeworfene Horchbojen melden Geräusche gleicher Stärke. Die Bojen befinden sich an den Punkten $P(0|0)$, $Q(16|4)$ und $R(2|12)$ eines willkürlich festgelegten Koordinatensystems (Längeneinheit: 1 sm).

- a) Zeichne den Sachverhalt und bestimme durch Konstruktion den Ort $U(x|y)$ des U-Bootes.
- b) Die *Aurora* befindet sich im Augenblick der Ortung des U-Bootes an der Stelle $S(24|10)$ in 6 000 m Höhe und nimmt sofort Kurs auf den Punkt U. Ermittle den Kurzwinkel.
- c) Die *Aurora* bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 80 kn. Berechne die Zeit, die sie benötigt, um zu dem vermutlichen Standort des U-Bootes zu gelangen.
- d) Das U-Boot kann in dieser Zeit weiterfahren. Zeichne das Gebiet um $U(x|y)$ ein, in dem es sich befinden kann, wenn es mit einer Geschwindigkeit von 20 Knoten fährt.

2 Kursbestimmungen

Bisher haben wir im Rahmen unserer Aufgaben auch schon Kurswinkel benutzt, aber immer ohne den Einfluss von Meereströmungen und Wind. Jetzt wollen wir im Detail untersuchen, wie sich Wind- oder Wasserströmungen auf die Bewegung von Booten und Flugzeugen auswirken. Dabei lernen wir den mathematischen Begriff des **Vektors** kennen.



2.1 Windvektoren und Ballonfahrt

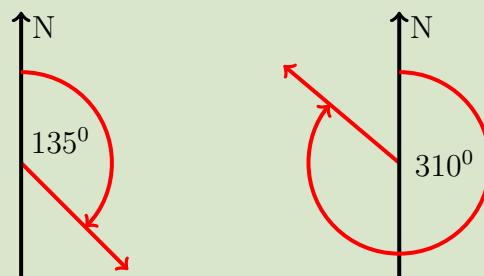
- 1** Blasius hat in einem Preisausschreiben eine Ballonfahrt gewonnen. An einem schönen Spätsommertag geht es zum Ballonstartplatz am Flugplatz Paderborn/Lippstadt (siehe Karte 4, Nr. 1). Um 11 Uhr erfolgt der Start und gegen 14 Uhr überfährt der Ballon *Gütersloh*. Ermittle die Richtung, aus der der Wind kommt, und die Richtung, in die der Wind bläst. Wir geben auch hier die Richtung rechtweisend an, also der Winkel zwischen der geographischen Nordrichtung und der zu bestimmenden Richtung rechtsdrehend (d.h. im Uhrzeigersinn). Ermittle auch die mittlere Windgeschwindigkeit während der Fahrt.



- 2** Ein Ballon startet am Ballonstartplatz *Münster-Telgte* um 9.00 Uhr. Es herrscht an diesem Morgen Nordwestwind, der eine Geschwindigkeit von $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ hat.
- Gib im Winkelmaß an, aus welcher Richtung der Wind kommt und in welche Richtung er weht.
 - Wo wird der Ballon voraussichtlich um 10 Uhr (bzw. 11 Uhr, 12 Uhr) sein?
- 3** Entwickle Ideen, wie man die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Windes graphisch darstellen könnte. Stelle die Windrichtungen aus Aufgabe 1 und 2 in dieser Weise dar.

Der Windvektor

Um die Windbewegung vollständig zu bestimmen, muss man die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit kennen. Gewöhnlich gibt man die Richtung an, aus der der Wind kommt. In diesem Buch wird aber, wenn es nicht ausdrücklich anders gesagt wird, bei Gradangaben stets die Richtung angeben, in die der Wind bläst. Die Angabe $(135^\circ|15 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ bedeutet also, dass ein Nordwestwind mit einer Geschwindigkeit von $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ weht. Die Geschwindigkeit wird also durch eine **Richtung** und einen **Betrag** beschrieben. Derartige Größen bezeichnet man als **Vektoren** (lat. vector = Beweger). Sie werden in Zeichnungen durch Pfeile dargestellt, die die Richtung angeben und deren Länge den Betrag des Vektors einem vorher festgelegten Maßstab entsprechend darstellen, z. B. $\vec{v} = (135^\circ|20 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ durch einen Pfeil von 2 cm Länge in Richtung 135° .



Koordinaten eines Vektors

Die beiden Zahlenangaben, die einen (ebenen) Vektor bestimmen, bezeichnet man als **Koordinanten** des Vektors. Man unterscheidet zwischen **kartesischen Koordinaten**, bei denen der Rechts- und der Hochwert (ähnlich wie bei Punkten) angegeben wird, und **Polarkoordinaten**, bei denen der Richtungswinkel und der Betrag (die Länge) angegeben wird. Der Pfeil über dem Buchstaben v soll kennlich machen, dass \vec{v} nicht ein Platzhalter für eine zahlenartige Größe ist, sondern für eine Größe, die auch eine Richtung hat (vektorielle Größe). Ist nur der Betrag des Vektors gemeint, so lässt man den Pfeil weg (v) oder man benutzt zusätzlich Betragsstriche ($|\vec{v}|$).

Hinweis: In der Flugnavigation wird — anders als hier — beim Wind die Richtung angegeben, aus der er kommt. Hier wird zur Vereinheitlichung bei allen Vektoren immer die Richtung angegeben, in die er zeigt.

- 4** Stelle die Vektoren mit den folgenden Koordinatenangaben graphisch dar. Gib dabei den gewählten Maßstab an. Du kannst jeweils drei Vektoren zusammen in einem Bild zeichnen.

a) $(51^\circ | 22 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ b) $(105^\circ | 36 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ c) $(287^\circ | 17 \frac{\text{km}}{\text{h}})$
d) $(36^\circ | 180 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ e) $(215^\circ | 215 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ f) $(154^\circ | 300 \frac{\text{km}}{\text{h}})$

- 5** Windvektoren können in unterschiedlichen Höhen verschieden sein. An einem Tag wurden folgende Winde gemessen:

- Am Boden Westwind mit $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Geschwindigkeit.
- In 300 m Höhe Westnordwestwind mit $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Geschwindigkeit.
- In 800 m Höhe Nordwestwind mit $35 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Geschwindigkeit.

- a) Stelle die Windvektoren graphisch dar (Maßstab: $10 \frac{\text{km}}{\text{h}} \hat{=} 1 \text{ cm}$).
b) Der Ballon startet am Flugplatz *Münster-Telgte* und fährt zunächst eine halbe Stunde in 300 m Höhe, dann eine Stunde in 800 m Höhe, schließlich wieder eine Stunde in 300 m Höhe. Ermittle die Flugroute mit Hilfe der Karte.

- 6** Ein Ballonfahrer steigt am Ballonstartplatz *Ennigerloh* bei Westsüdwestwind um 11.30 Uhr auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt zunächst $12 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Nach 1,5 Stunden frischt der Wind plötzlich auf und dreht auf Nordwest. Die neue Windgeschwindigkeit beträgt $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Wo wird der Ballon gegen 14 Uhr vermutlich stehen?

Aus der Kartenkunde: Flugkarten

Die wichtigsten Karten für die Sichtnavigation sind die so genannten ICAO-Karten im Maßstab 1 : 500 000, die in diesem Kapitel ausschließlich benutzt werden. Die ICAO (engl. International Civil Aviation Organization) ist die internationale Zivilluftfahrtorganisation. Diesen Karten liegt eine topographische Karte zugrunde, in der die wichtigsten Geländeformationen, größere Ortschaften, wichtige Straßen, Autobahnen, Bahnlinien und andere Landschaftsmerkmale eingezeichnet sind, an denen man sich orientieren kann. Höhenangaben werden grundsätzlich in Fuß gemacht. Darüber hinaus sind in dieser Karte natürlich alle Flugplätze, Kontrollzonen, Nahverkehrsbereiche, Gefahren- und Flugbeschränkungsgebiete eingezeichnet. Du kannst dir wahrscheinlich vorstellen, dass über einem Gebiet, wo Schießübungen veranstaltet werden, kein freier Flugbetrieb möglich ist. Deshalb müssen solche Gebiete kenntlich gemacht werden. In Karte 3 auf Seite 15 findest du ein solches Gebiet mit Flugbeschränkungen über dem Truppenübungsplatz Senne in der Nähe des rechten Randes. Es ist durch eine blau schraffierte Grenze gekennzeichnet und trägt die Bezeichnung ED-R 18.

Der Luftraum über Deutschland ist in vielfacher Hinsicht gegliedert und der Pilot muss auf seiner Karte diese unterschiedlichen Gebiete klar erkennen können. Um die Details können wir uns in diesem Buch nicht kümmern, da wir sie für das, was wir lernen sollen, nicht benötigen. Aber einige Informationen müssen wir der Karte doch entnehmen können. Deshalb folgt jetzt eine Übersicht über die wichtigsten Symbole der Karte, sofern sie sich auf das Flugwesen beziehen.

FLUGPLÄTZE / AERODROMES

 HAMBURG	Internationaler Flughafen International Airport	 Korbach	Sonderlandeplatz, Ausrichtung der längsten Gras-Start- und Landebahn Special airfield, alignment on the longest grass runway
 LEMWERDER	Flughafen Airport	 Schwege	Hubschrauberlandeplatz Heliport
 KIEL-HOLTENAU	Flughafen (Civil-/Militär-) Airport (civil/military)		Hubschrauberlandeplatz für Krankentransporte Heliport for ambulances
 FASSBERG	Militärflugplatz Military Aerodrome	 Steinberg	Segelfluggelände Glider site
 MAINZ-FINTHEN	Landeplatz (Civil-/Militär-) Airfield (civil/military)	 Tegelberg	Hängegleitergelände Hang Glider site
 GANDERKESEE	Verkehrslandeplatz, Ausrichtung der längsten befestigten Start- und Lande- bahn Airfield for public use, alignment on the longest hardened runway	 Mornheim	Fallschirmabsprunggelände Parachute jumping site
		 Gersthofen	Freiballonstartplatz Free balloon site

Fortsetzung: Flugkarten

Unter dem Namen des Flugplatzes findet man meistens zwei Zahlenangaben. Die linke gibt die verfügbare Sendefrequenz an, die rechte die Länge der Start- und Landebahn. Der Militärflugplatz Gütersloh sendet also auf der Frequenz 122,1 MHz und hat eine Landebahn von 2250 m Länge, die etwa in West-Ost-Richtung ausgerichtet ist. Bei manchen Sonderlandeplätzen (z. B. Soest) fehlt die Frequenzangabe, es ist nur die Länge der Landebahn angegeben.

Für die Funknavigation sind die Positionen der so genannten Funkfeuer eingetragen. Das sind Sender, mit deren Hilfe sich der Pilot mittels Funkpeilung orientieren kann. Im Kartenausschnitt 3 finden wir z. B. das Drehfunkfeuer Hamm, das auf einer Frequenz von 115,65 MHz sendet.

In der Übersicht auf der nächsten Seite sind einige weitere topographische Symbole kurz charakterisiert.

LUFTRAUMBESCHRÄNKUNGEN AIRSPACE RESTRICTIONS

ED-R1	Gebiet mit Flugbeschränkung Restricted area
ED-D8	Gefahrengebiet Danger area
TRA-	Zeitweilig reservierte Lufträume Temporary Reserved Airspace (TRA)
ADIZ	Flugüberwachungszone Air defence identification zone
grün/green	Gebiete mit kontrolliertem Sichtflug s. AIP Band III RAC Areas where VFR flights can operate with clearance from ATC only see AIP volume III RAC CVFR MÜNCHEN RADAR 119.050

FUNKNAVIGATIONSANLAGEN RADIO NAVIGATION FACILITIES	
	VOR UKW-Drehfunkfeuer VHF omnidirectional radio range
	VOR/DME UKW-Drehfunkfeuer mit Entfernungsmesser VHF omnidirectional radio range with distance measuring equipment
	VORTAC Örtlich vereint aufgestellte VOR- und TACAN-Anlagen Co-located VOR and TACAN facilities
	TACAN Taktische UKW-Flugnavigationsanlage Tactical UHF air navigation facility
	NDB Ungerichtetes Flugfeuer Non-directional radio beacon

FLUGVERKEHRSDIENSTE AIR TRAFFIC SERVICES

FIR	Fluginformationsgebiet Flight information region
CTA	Kontrollbezirk Control area
TMA	Nahverkehrsbereich Terminal control area
rot/red	1000 ft GND
blau/blue	1700 ft GND
	1000 ft GND } TMA-Untergrenzen 1700 ft GND } TMA-Lower limits
CTR	Kontrollzone Control zone
	Flugplatzverkehrszone Aerodrome traffic zone
	250-Fuß-Tieffluggebiet 250 feet low flying area
	Pflichtmeldepunkt für VFR-Anflüge Compulsory reporting point for VFR approaches

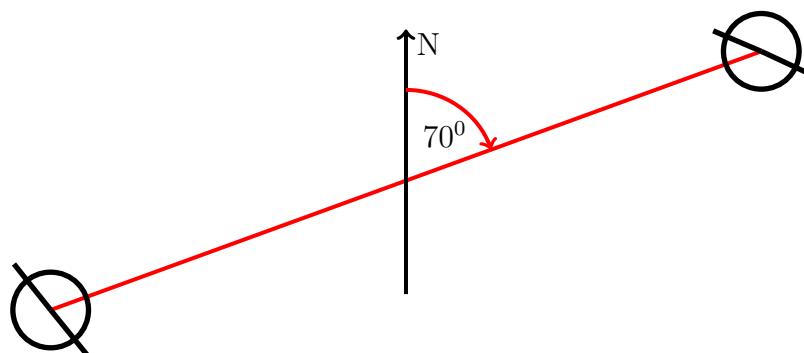
Fortsetzung: Flugkarten

LANDSCHAFTSMERKMALE LANDMARKS		STRASSEN ROADS	
Ⓐ	Aussichtsturm, Fernsehturm Lookout tower, television tower	=====	Autobahn, Schnellstraße Dual highway
✝	Kirche Church	=====	Autobahn im Bau Dual highway under construction
✠	Kloster Monastery	—	Fernverkehrsstraße Primary road
□	Ruine Ruin	—	Wichtige Verbindungsstraße Secondary road
¤	Schloß Castle	○	Rennstrecke Race track
¤	Festung Fort	— — — — —	Autobahn-Auffahrt Dual highway entry
▀	Denkmal Monument	— — — — —	Straßenbrücke Road bridge
I	Leuchtturm Lighthouse	— — — — —	Straßentunnel Road tunnel
—	Fabrik Factory		
✗	Bergwerk Mine		
¤	Steinbruch Quarry	— — — — —	Eisenbahn (eingleisig) mit Bahnhof Railway (single track) with station
▲	Ölfeld Oilfield	— — — — —	Eisenbahn (mehrgleisig) mit Bahnhof Railway (multiple track) with station
●	Öltank Oiltank	— — — — —	
GELÄNDEDARSTELLUNG TOPOGRAPHY		EISENBAHNEN RAILWAYS	
↗	Steile Böschung und Steilküste Bluff, cliff or escarpment	— — — — —	
----	Damm, Deich Dike	— — — — —	
◆◆◆	Sanddünen Sand dunes	▲ ▲	Hindernis und Hindernisgruppe (unbefeuert) Obstacle and group of obstacles (unlighted)
• 117	Höhenpunkt Spot elevation	▲ ▲	Hindernis und Hindernisgruppe (befeuert) Obstacle and group of obstacles (lighted)
VERSCHIEDENES MISCELLANEOUS			
		— 3° W —	Linien gleicher Mißweisung Isogonic lines

Fortsetzung: Flugkarten

Größere Flugplätze, die für Starts und Landungen nach Instrumentenflugregeln (IFR-Flüge) ausgerüstet sind, haben Kontrollzonen, die in der Karte durch eine rosa Färbung gekennzeichnet sind. Diese Kontrollzonen verlässt man beim Start durch Überfliegen eines Pflichtmeldepunktes, der durch das Symbol  gekennzeichnet ist. Auch bei der Landung fliegt man über einen solchen Punkt ein. Den Überflug eines solchen Kontrollpunktes muss der Pilot unaufgefordert dem Kontrollturm melden. Die verschiedenen Pflichtmeldepunkte eines Flughafens sind noch näher bezeichnet. In unserer Karte findest du z. B. für den Flughafen Münster-Osnabrück die beiden Kontrollpunkte SIERRA und ECHO. Die Bezeichnungen sind dem so genannten NATO-Alphabet entnommen. Sie dienen im internationalen Flugverkehr zum Buchstabieren der Buchstaben S und E. S steht dabei für das englische Wort „south“ und E für „east“. Es handelt sich also um den südlichen und östlichen Pflichtmeldepunkt. Bei unseren Aufgaben ist darauf zu achten, dass man bei der Kursbestimmung nicht von der Platzmitte ausgeht, sondern von einem der Kontrollpunkte, wenn es sich um einen kontrollierten Platz handelt.

Wegen der in Landkarten unvermeidlichen Verzerrung der Erdoberfläche, die dadurch entsteht, dass eine gekrümmte Oberfläche in eine Ebene abgebildet wird, sollte der Kurswinkel bei längeren Flügen stets in der Mitte des Flugweges gemessen werden, da sich zwischen dem westlichen und östlichen Ende des Flugweges kleine Unterschiede des Kurswinkels ergeben. Wegen der Kürze der Flugwege spielen diese Abweichungen bei unseren Aufgaben keine große Rolle.



- 1** Ermittle die Sendefrequenzen der Flugplätze Oerlinghausen und Bielefeld-Windelsbleiche.
- 2** Wie lang sind die Landebahnen in Münster-Telgte und Detmold?
- 3** Welche Freiballonstartplätze findest du in Karte 3?
- 4** In welcher Richtung sind die Landebahnen in Paderborn-Haxterberg und Oelde-Bergeler ausgerichtet?
- 5** Westlich von Bielefeld steht auf dem Höhenzug des Teutoburger Waldes ein Fernsehturm. Wie hoch (über NN) ist seine Spitze in Metern?

2.2 Geschwindigkeiten

1 Blasius hat Interesse an der Luftfahrt bekommen und bittet seinen Onkel, der Sportflieger ist, ihn einmal mitzunehmen. Sie starten am Flugplatz *Detmold* und Blasius bekommt als „Beiflieger“ die Luftfahrtkarte in die Hand gedrückt. Er soll den Kurswinkel zum Kontrollpunkt ECHO des Flughafens *Münster-Osnabrück* ermitteln (siehe Karte 3 auf Seite 16).

- Bestimme den Kurswinkel. Gehe dabei von der Mitte des Flugplatzsymbols aus.
- Sie benötigen 20 Minuten reine Flugzeit bis zum Kontrollpunkt (ohne Start). Berechne die Geschwindigkeit des Flugzeugs.
- Ähnlich wie die Windgeschwindigkeit kann auch die Fluggeschwindigkeit durch einen Vektor dargestellt werden. Gib die Koordinaten des Vektors an und stelle ihn zeichnerisch durch einen Pfeil dar (Maßstab: $100 \frac{\text{km}}{\text{h}} \hat{=} 2 \text{ cm}$).

Hinweis: Bei den vorliegenden Aufgaben geben wir die Geschwindigkeit in Kilometer pro Stunde an und nicht in nautischen Meilen pro Stunde (Knoten), wie es sonst in der Luftfahrt üblich ist. Auf diese Weise sparen wir einige Umrechenarbeit.

2 Ein Flugzeug soll vom Flughafen *Münster-Osnabrück* zum Flughafen *Paderborn-Lippstadt* fliegen.

- Welcher Kurs ist (bei Windstille) auf dem Hinflug (bzw. Rückflug) zwischen den Kontrollpunkten ECHO und NOVEMBER zu steuern?
 - Das Flugzeug hat eine Geschwindigkeit von $210 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Markiere seine Position alle 5 Minuten durch einen Querstrich auf der Kurslinie. Berechne die Dauer des Fluges zwischen den Kontrollpunkten.
- 3**
- Ein Flugzeug legt in $1\frac{1}{4}$ Stunden 275 km zurück. Welche Geschwindigkeit hat es?
 - Wie lange benötigt ein Flugzeug, das mit einer Geschwindigkeit von $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ fliegt, für eine Strecke von 450 km?
 - Ein Flugzeug fliegt 2 h 20 min mit einer Geschwindigkeit von $180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Berechne, welche Entfernung es in dieser Zeit zurücklegt.

Der Geschwindigkeitsvektor des Flugzeugs

Die Bewegung des Flugzeugs wird ähnlich wie die Windbewegung durch einen Geschwindigkeitsvektor beschrieben, durch den die Bewegungsrichtung (Kurswinkel) und der Betrag der Geschwindigkeit definiert sind. Bei einem Geschwindigkeitsvektor $\vec{v} = (225^\circ | 220 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ fliegt das Flugzeug mit $220 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ in südwestlicher Richtung. Für Berechnungen gelten folgende Formeln:

$$v = \frac{s}{t} \quad s = v \cdot t \quad t = \frac{s}{v}$$

4 Ein Sportflugzeug führt folgende Flüge (bei Windstille) aus. Bestimme jeweils die Koordinaten des Geschwindigkeitsvektors.

- von *Detmold* nach *Werl* in 30 Minuten,
- von *Werl* nach *Münster-Telgte* in 15 Minuten,
- von *Münster-Telgte* nach *Oerlinghausen* in 20 Minuten,
- von *Oerlinghausen* nach *Paderborn/Lippstadt* in 10 Minuten.

Es handelt sich stets um reine Flugzeiten (ohne Start- und Landezeiten) und es sind immer die Flugplätze und nicht die Ortschaften gemeint.

5 Ein Flugzeug unternimmt Flüge vom Flughafen *Münster-Osnabrück* aus. Es verlässt den Kontrollbereich beim Ausflugspunkt ECHO. Ermittle jeweils den Standort mit Hilfe des angegebenen Geschwindigkeitsvektors und der Flugdauer, die vom Überfliegen des Kontrollpunktes ab gerechnet wird. Gib den am nächsten gelegenen Ort auf der Karte an.

- $\vec{v} = (101^\circ | 210 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ und 21 Minuten,
- $\vec{v} = (142^\circ | 180 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ und 24 Minuten,
- $\vec{v} = (179^\circ | 200 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ und 18 Minuten.

6 Ein Flugzeug fliegt vom Flughafen *Paderborn/Lippstadt* zum Flughafen *Münster-Osnabrück*. Der Geschwindigkeitsmesser des Flugzeugs zeigt $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ an.

- Berechne die zwischen den Kontrollpunkten NOVEMBER und ECHO zu erwartende Flugzeit.
- Tatsächlich ist es erst nach 25 Minuten (bereits nach 17 Minuten) am Kontrollpunkt ECHO. Berechne die realen Geschwindigkeiten. Was könnte der Grund für die Abweichungen sein?

Geschwindigkeiten

In der Luftfahrt unterscheidet man zwischen der **Eigengeschwindigkeit** \vec{v} eines Flugzeugs, die es auf Grund seiner Motorleistung erbringt, und der **Geschwindigkeit über Grund** \vec{u} , die angibt, wie schnell das Flugzeug in Bezug auf den darunter liegenden Erdboden vorankommt. Bei Windstille sind beide Geschwindigkeiten gleich. Herrscht aber keine Windstille, so weicht die Geschwindigkeit über Grund von der Eigengeschwindigkeit ab.

7 Ein Flugzeug fliegt mit einer Eigengeschwindigkeit von $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ genau nach Westen. Nach einer halben Stunde stellt der Pilot mit Hilfe seines GPS-Gerätes fest, dass er 80 km zurückgelegt hat. Welche Rückschlüsse über den Windvektor kann er daraus ziehen? Man spricht davon, dass der Pilot sich den Wind *erfliegt*, wenn er nicht über genaue Wetterdaten verfügt.

8 Bei einem anderen Flug mit $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Eigengeschwindigkeit stellt der Pilot nach einer halben Stunde fest, dass er 115 km zurückgelegt hat.

- Welchen Schluss kann er daraus ziehen?
- Bei Windstille ist mit einer Flugdauer von 75 Minuten zu rechnen. Wie lange wird er unter diesen Umständen brauchen?

Gegen- und Rückenwind

Bei Gegenwind ist die Geschwindigkeit über Grund um den Betrag der Windgeschwindigkeit geringer als die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs, bei Rückenwind um den Betrag der Windgeschwindigkeit größer. Wenn wir mit w den Betrag der Windgeschwindigkeit bezeichnen, dann gilt für die Geschwindigkeit u über Grund:

$$u = v - w \quad \text{bei Gegenwind} \quad \text{und} \quad u = v + w \quad \text{bei Rückenwind}$$

Hat das Flugzeug z. B. eine Eigengeschwindigkeit $v = 200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, so schafft es über Grund bei einem Gegenwind von $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ nur 150 Kilometer in der Stunde, bei einem entsprechenden Rückenwind aber 250 Kilometer in der Stunde.

9 Bei einem Nordwestwind von $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ fliegt ein Flugzeug mit folgenden Eigengeschwindigkeitsvektoren:

a) $\vec{v} = (135^\circ | 170 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ b) $\vec{v} = (315^\circ | 220 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ c) $\vec{v} = (135^\circ | 250 \frac{\text{km}}{\text{h}})$

Bestimme jeweils die Geschwindigkeit über Grund \vec{u} rechnerisch.

10 Ein Flugzeug legt bei einer Windgeschwindigkeit von $45 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ in 20 min (bzw. 15 min) eine Strecke von 100 km (bzw. 70 km) zurück. Wie groß ist die Eigengeschwindigkeit bei a) Rückenwind, b) Gegenwind?

11 Der *Fieseler Storch* war ein Flugzeug, das wegen seiner Fähigkeit extrem langsam fliegen zu können ($v = 45 \frac{\text{km}}{\text{h}}$) für Spezialeinsätze verwendet wurde, so z. B. bei der Befreiung des italienischen Diktators Benito Mussolini im Jahre 1943 aus der Haft. Unter bestimmten Umständen konnte es auf der Stelle stehen oder sogar langsam rückwärts fliegen. Erkläre, wie dies möglich war.²

12 Im Juli 1974 startete ein Sportflugzeug vom Siegerland-Flugplatz zu einem Flug nach Zürich (ca. 450 km) und zurück. Es hatte für $4 \text{ h } 20 \text{ min}$ Flugzeit getankt. Seine normale Reisegeschwindigkeit betrug $240 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Kurz vor der Landung auf dem Heimatflugplatz stürzte es wegen Treibstoffmangels ab.

- Welche Flugdauer für Hin- und Rückflug ist bei Windstille zu erwarten?

²Heute gibt es nur noch wenige funktionsfähige Nachbauten oder restaurierte Exemplare

- b) Bei jenem Flug gab es auf dem Hinflug einen Gegenwind von $85 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und auf dem Rückflug einen entsprechenden Rückenwind. Berechne die sich daraus ergebende Flugdauer.

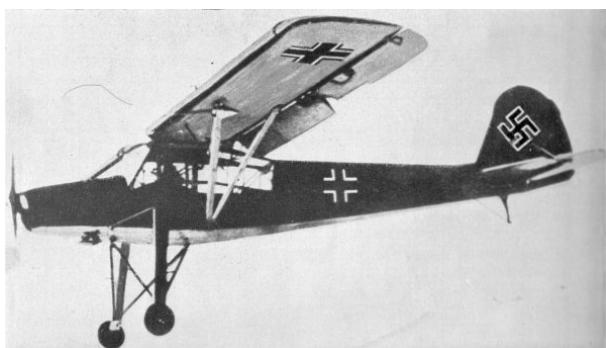
13 Ein Flugzeug fliegt von Afeld nach Zetstadt und zurück. Die Entfernung beträgt für einen Weg 450 km. Das Flugzeug fliegt mit einer Eigengeschwindigkeit von $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und verbraucht dabei pro Stunde 14 l Treibstoff.

- a) Berechne Flugdauer und Treibstoffverbrauch bei Windstille.
- b) Wie viel Treibstoff muss getankt werden, wenn aus Sicherheitsgründen eine halbe Stunde Reserve eingeplant wird? Dies ist im Allgemeinen die Reservezeit, die für private Flüge nach Sichtflugregeln eingeplant wird.
- c) Nun herrscht beim Hinflug ein Gegenwind von $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und beim Rückflug ein entsprechender Rückenwind. Berechne wiederum die Flugdauer und den Treibstoffverbrauch. Reicht die eingeplante Reserve?

14 In der Situation von Aufgabe 13 gibt es eine maximale Windgeschwindigkeit, bei der man mit dem getankten Treibstoff theoretisch gerade noch den Rückflug schafft. Berechne diese maximale Windgeschwindigkeit.

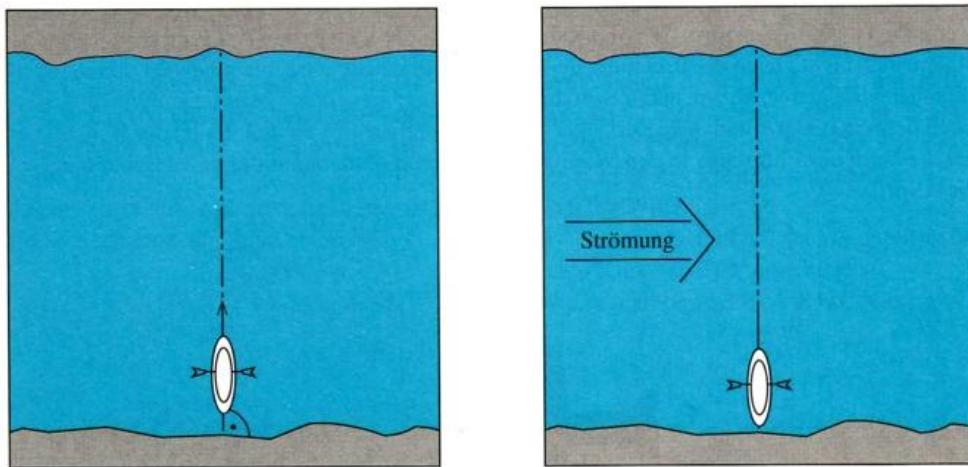
15 Eine Cessna 172 fliegt gewöhnlich mit einer Geschwindigkeit von $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Der Pilot hat für eine Flugdauer von 4 Stunden Treibstoff getankt.

- a) Wie weit kann der Pilot bei Windstille gerade noch fliegen, wenn er mit dem Treibstoffvorrat zum Ausgangspunkt zurückkehren muss? Man bezeichnet diesen letzten Umkehrpunkt in der Luftfahrt als **Point of No Return** (kurz PNR). Welche Zeit vergeht bis zum Erreichen des PNR?
- b) Bestimme den PNR für den Fall, dass beim Hinflug ein Gegenwind von $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ herrscht und beim Rückflug ein entsprechender Rückenwind.
- c) Wie weit entfernt ist der PNR, wenn der Rückenwind beim Hinflug herrscht und der Gegenwind beim Rückflug?
- d) Gustav Glückauf fliegt, ohne auf Zeit und Wind zu achten, mit seiner Cessna 172 zwei Stunden und kehrt dann um. Da er für eine Flugzeit von 4 Stunden getankt hat, erwartet er, dass er den Flugplatz gerade noch erreicht. Beim Hinflug hatte er allerdings $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ Gegenwind. Schafft er es oder muss er notlanden? Was ist bei einem entsprechenden Rückenwind beim Hinflug zu erwarten?



Fieseler Storch im Flug (Archivbild)

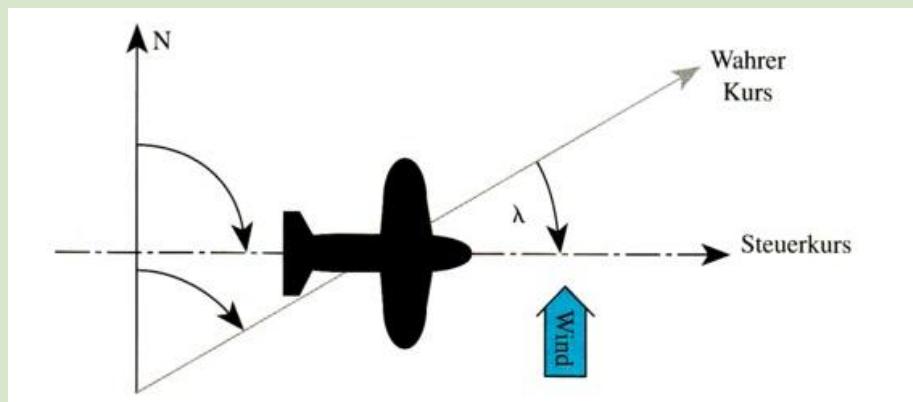
2.3 Das Strömungs- und Winddreieck



- 1** Ein Paddelboot überquert mit einer Eigengeschwindigkeit von $6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ einen 120 m breiten Fluss. Dabei wird die Bootsachse stets so gehalten, dass sie im rechten Winkel zum Ufer steht (siehe Abb.).
- Der Fluss hat durch Aufstauung keine Strömung. Berechne die Dauer der Überfahrt unter diesen Bedingungen
 - Unterhalb der Aufstauung hat der Fluss bei gleicher Breite eine Strömung von $4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Die Überfahrt wird bei gleicher Orientierung der Bootsachse jetzt anders verlaufen als in a). Erkläre den Grund dafür. Ist die Dauer der Überfahrt jetzt anders als in a) oder genauso groß?
 - Wenn der Paddler nicht gegensteuert, wird das Boot abgetrieben. Stelle den Vorgang durch eine Zeichnung im Maßstab 1 : 2 000 dar. Miss den Winkel zwischen der angesteuerten Richtung (senkrecht zum Ufer) und der tatsächlichen Richtung (mit Abdrift). Welche Strecke wird bei der Überfahrt tatsächlich zurückgelegt und was lässt sich daraus für die Geschwindigkeit schließen?
- 2**
- Ein Heißluftballon und ein Flugzeug starten gleichzeitig an einem Flugplatz bei kräftigem Westwind ($\vec{w} = (90^\circ | 50 \frac{\text{km}}{\text{h}})$). Der Pilot hält das Flugzeug so auf Kurs, dass die Längsachse stets genau nach Norden weist. Es hat dabei eine Eigengeschwindigkeit von $180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Stelle die in einer halben Stunde zurückgelegten Wege für den Ballon und das Flugzeug graphisch durch Pfeile dar, die die Richtung und die Länge des Weges beschreiben (Maßstab: $10 \text{ km} \hat{=} 1 \text{ cm}$).
 - Verfare ebenso wie in a) für Flugdauern von 10 bzw. 20 Minuten. du kannst dabei die gleiche Zeichnung benutzen. Was stellst du beim Vergleich mit a) fest?
 - Welche tatsächlichen Strecken hat das Flugzeug in den drei gezeichneten Fällen zurückgelegt? Welchen Betrag und welche Richtung hatte also die Geschwindigkeit über Grund?
 - Miss den Winkel zwischen dem **Steuerkurs** (Richtung der Flugzeugachse) und dem **Kurs über Grund**.

Steuerkurs und Kurs über Grund

Da ein Flugzeug von einer Luftströmung mitgenommen wird wie ein Boot von einer Wasserströmung, ist der **Steuerkurs** (d.h. die Richtung, in die die Längsachse des Flugzeugs zeigt) im Allgemeinen nicht gleich der Richtung, in die sich das Flugzeug tatsächlich bewegt. Letztere bezeichnen wir hier ebenso wie in der Seefahrt als (wahren) **Kurs über Grund**. Den Winkel λ zwischen dem Steuerkurs und dem Kurs über Grund nennt man **Luvwinkel**. Beim Gegensteuern ist dies der Winkel, um den die Nase des Flugzeugs in den Wind gedreht werden muss, damit der gewünschte Kurs über Grund erreicht wird.

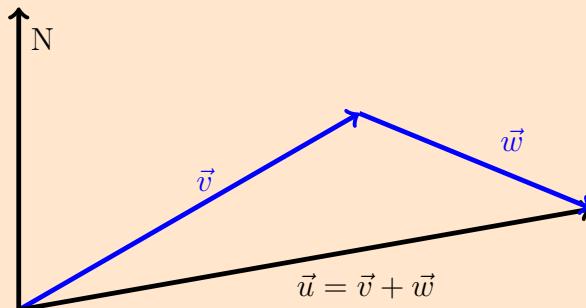


Für die Bestimmung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung ist es offenbar gleichgültig, wie groß das Dreieck für die Bestimmung der Geschwindigkeit über Grund gezeichnet wird. Deshalb bezieht man sich immer auf den in einer Stunde zurückgelegten Weg, weil man die Geschwindigkeit gewöhnlich in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ angibt, und stellt die Geschwindigkeiten durch Pfeile dar, deren Längen nach einem vorher vereinbarten Maßstab gewählt werden.

- 3 Stelle die drei Geschwindigkeiten aus Aufgabe 1 in einem Pfeildiagramm dar (Maßstab: $1 \frac{\text{km}}{\text{h}} \hat{=} 1 \text{ cm}$), indem du den Pfeil für die Wassergeschwindigkeit an die Spitze des Pfeils für die Eigengeschwindigkeit anhängst. Wo zeichnet man dann sinnvollerweise den Pfeil für die Geschwindigkeit über Grund hin? Vergleiche die Figur mit der aus Aufgabe 1
- 4 Zur Vermeidung der Abdrift (siehe Aufgabe 1) dreht man die Bootsachse leicht nach links (gegen die Strömung).
 - a) Schätze, um welchen Winkel man verdrehen muss.
 - b) Zeichne das Geschwindigkeitsdreieck (wie in Aufgabe 8) für den Fall, dass die **Eigengeschwindigkeit unverändert** ist, dass also gleich stark gepaddelt wird, und der Pfeil für die Geschwindigkeit über Grund jetzt rechtwinklig zum Ufer steht. Miss den Winkel zwischen den Pfeilen für die Eigengeschwindigkeit und die Geschwindigkeit über Grund und bestimme die Geschwindigkeit über Grund.

Das Winddreieck — Vektoraddition

Das **Winddreieck** dient der Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors über Grund, wenn der Eigengeschwindigkeitsvektor und der Windvektor bekannt sind. Man bezeichnet den Geschwindigkeitsvektor über Grund als **Summe** oder als **Resultierende** der beiden anderen Geschwindigkeiten. Zur Konstruktion hängt man den zweiten Pfeil an die Spitze des ersten Pfeiles. Der Summenpfeil führt dann vom Ausgangspunkt zur Spitze des zweiten Pfeiles (siehe Abbildung).



$$\vec{v} = (60^0 | 104 \frac{\text{km}}{\text{h}}) \quad \vec{w} = (113^0 | 66 \frac{\text{km}}{\text{h}}) \quad \vec{u} = (80^0 | 153 \frac{\text{km}}{\text{h}})$$

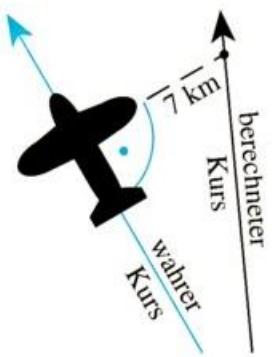
- 5** Überprüfe zeichnerisch, ob man das gleiche \vec{u} erhält wenn man die Reihenfolge von \vec{v} und \vec{w} vertauscht, also zuerst \vec{w} und dann \vec{v} zeichnet. Begünde anschließend den Sachverhalt.
- 6** Ein Hubschrauber vom Typ *Schweizer 330* hat eine normale Reisegeschwindigkeit von $170 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Der Pilot steuert einen Kurs von 310^0 . Laut Flugwetterberatung weht ein Wind von $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ aus Richtung 220^0 .
- In welche Richtung weist der Windvektor?
 - Zeichne das Winddreieck und bestimme den wahren Kurs und die Geschwindigkeit über Grund.
 - Welcher Kongruenzsatz liegt der Dreieckskonstruktion von Aufgabe (b) zugrunde?
- 7** Der *Eurotrainer 2000 A* ist ein Schulungsflugzeug mit einer ökonomischen Reisegeschwindigkeit von $290 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Ein Pilot steuert es auf Kurs 150^0 mit dieser Geschwindigkeit. Der Wind weht aus Nordosten mit $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Ermittle den wahren Kurs und die Geschwindigkeit über Grund.
- 8** Bei der Flugplanung ist gewöhnlich der Kurs über Grund (Zielort), der Betrag v der Eigengeschwindigkeit und der Windvektor \vec{w} gegeben. Gesucht ist der zu steuernde Kurs.



- a) Ermittle den Steuerkurs für $v = 170 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und einen Kurs über Grund von 310° , wenn der Windvektor $\vec{w} = (40^\circ | 40 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ ist.
- b) Bestimme auch die Geschwindigkeit u über Grund.
- c) Welcher Kongruenzsatz liegt dieser Konstruktion zugrunde?

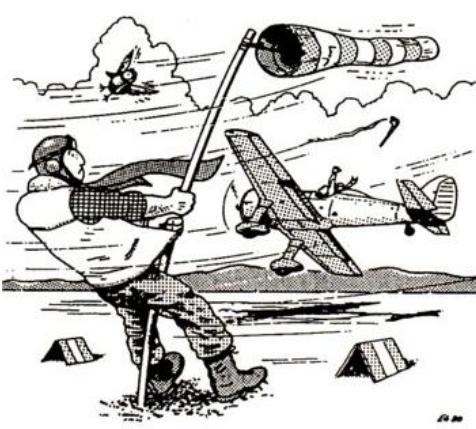
9 Nach Beendigung des Fluges von Aufgabe 8 will der Pilot wieder zurückfliegen. Winddaten und Eigengeschwindigkeit sind die gleichen wie beim Hinflug. Welchen Kurs muss er steuern, um nach Hause zu gelangen? Wie lange dauert es, wenn die Entfernung 250 km beträgt?

10 Die Angaben der Flugwetterberatung sind nicht immer zutreffend. Der Wind kann sich sehr kurzfristig ändern. Häufig „erfliegen“ sich Piloten daher den Wind. Unser Pilot hat 15 Minuten lang den Kurs 310° gesteuert (mit $v = 170 \frac{\text{km}}{\text{h}}$). Dann bestimmt er seine Position mit Hilfe der Karte und stellt fest, dass er sich, in Flugrichtung gesehen, 7 km links (querab) von seiner errechneten Position befindet (siehe Abbildung).



- a) Konstruiere aus den bekannten Größen das Winddreieck und bestimme den Windvektor.
- b) Welchen Kurs muss er steuern, um über Grund einen Kurs von 310° zu erzielen?
- c) Wie schnell bewegt er sich über Grund?

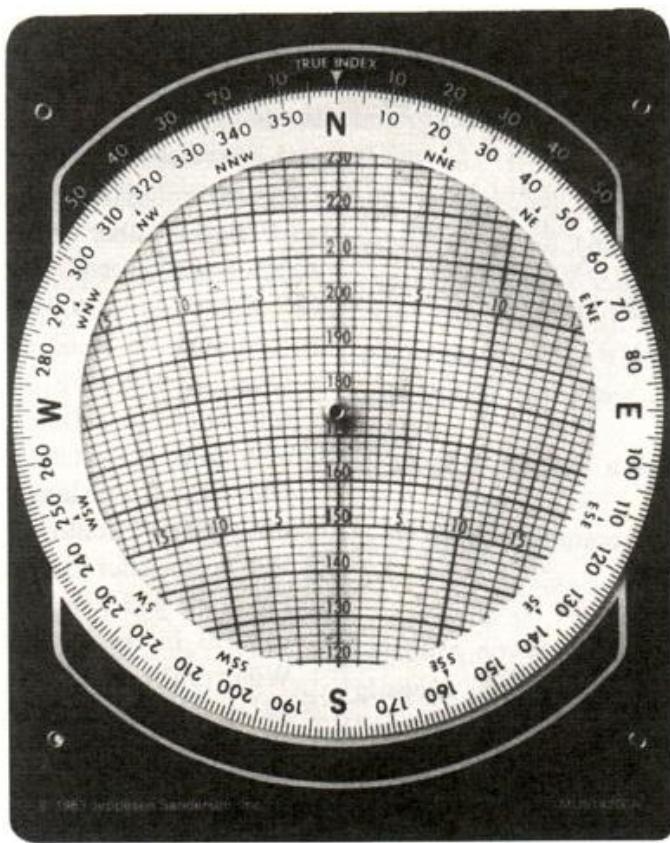
11 Ein Flugzeug fliegt mit einer Eigengeschwindigkeit von $190 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Es soll bei einem Westwind von $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ die Strecke vom Flughafen *Münster-Osnabrück* zum Flughafen *Paderborn/Lippstadt* zurücklegen. Es verlässt den Kontrollbereich diesmal über den Ausflugspunkt *SIERRA* und nimmt Kurs auf *NOVEMBER* am Flughafen *Paderborn/Lippstadt*.



- a) Bestimme an Hand der Karte den Kurs über Grund, konstruiere das Winddreieck und ermittle den Steuerkurs.
- b) Wie groß ist die tatsächliche Geschwindigkeit über Grund? Wie lange wird der Flug von Kontrollpunkt zu Kontrollpunkt dauern?
- c) Wie groß ist der Luuwinkel?
- d) Führe die gleichen Bestimmungen wie in Aufgabe a) bis c) für den Rückflug durch. Die Windverhältnisse sollen unverändert bleiben.

Aus der Praxis: Hilfsmittel des Piloten

Vielleicht hast du schon einmal darüber nachgedacht, dass ein Pilot während des Fluges nicht ein Zeichenbrett herausholen kann, um den Kurs zeichnerisch zu bestimmen. Das geht normalerweise nur vor Beginn des Fluges. Es gibt allerdings Hilfsmittel, mit deren Hilfe man auch während des Fluges relativ schnell die nötigen Daten ermitteln kann. Ein solches Hilfsmittel ist der **Navigationsrechner**. Die Vorderseite benutzt man für verschiedene Berechnungen (Treibstoffverbrauch, Flugdauer usw.), die Rückseite für Kursbestimmungen. Die Abbildung unten zeigt die Rückseite des Gerätes. Man erkennt im Innern Geschwindigkeitsskalen (Angaben in kn) und am Rand eine drehbare Windrose mit einer 360^0 -Einteilung. Auf die Handhabung können wir hier nicht eingehen, da eine Erklärung etwas größeren Aufwand erfordert.



Rückseite des Navigationsrechners dient der Kursbestimmung

Ein weiteres wichtiges Hilfsmittel ist der so genannte **Kurskreisel**. Normalerweise wird die Kursbestimmung mit Hilfe eines Magnetkompasses durchgeführt. Ein solcher Kompass hat allerdings den Nachteil, dass er bei Beschleunigungen und Kurvenflügen, also immer dann, wenn Fliehkräfte auftreten, erhebliche Anzeigefehler aufweist. Außerdem hat jeder Kompass eine vom jeweiligen Ort abhängende fehlerhafte Anzeige der Nordrichtung, die sog. Missweisung. Eine von Flugbewegungen unabhängige Anzeige gewährleistet der so genannte Kurskreisel. Man nutzt bei diesem Instrument aus, dass ein Kreisel bei geeigneter Aufhängung seine Drehachse im Raum stets beibehält. Genaueres zum Thema Kompass erfahren wir in einem späteren Kapitel.

2.4 Gemischte Aufgaben zur Flugplanung

Die folgenden Aufgaben sind mit Hilfe der Karte 6 auf Seite 43 (Ausschnitt aus der ICAO-Luftfahrtkarte für den Raum Frankfurt, Maßstab 1 : 500 000) zu lösen.

- 1** Ein Pilot startet vom *Siegerland-Flughafen*, um nach *Allendorf-Eder* (Flugplatz) zu fliegen. Der Windvektor ist laut Wetterbericht $\vec{w} = (100^0|40 \frac{\text{km}}{\text{h}})$. Das Flugzeug fliegt mit einer Eigengeschwindigkeit von $180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.
- Welchen Kurs muss er steuern, um trotz Windabdrift an sein Ziel zu gelangen (Richtung von \vec{v})?
 - Welche Geschwindigkeit über Grund und welche Flugdauer sind zu erwarten?
 - Nach Ablauf der vorausberechneten Zeit ist der Flughafen noch nicht in Sicht. Stattdessen sieht der Pilot unter sich den Ort *Münchhausen*. Was könnte der Grund für diese Abweichung sein?
 - Bestimme den wirklichen Geschwindigkeitsvektor \vec{u}' , der sich aus den Angaben in c) ergibt, und den wirklichen Windvektor \vec{w}' .
- 2** Beim Weiterflug von *Allendorf-Eder* zum Flugplatz *Gießen-Lützellinden* rechnet er mit einem Windvektor $(126^0|63 \frac{\text{km}}{\text{h}})$. Er fliegt immer noch mit $v = 180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.
- Welchen Kurs muss er steuern?
 - Wie schnell kommt er wirklich voran (Geschwindigkeit über Grund)?
 - Wie lange wird der Flug dauern?
- 3** Bei gleichen Windverhältnissen will er wieder zum *Siegerlandflughafen* zurückfliegen und die Strecke in 20 Minuten schaffen.
- Bestimme den wirklichen Geschwindigkeitsvektor über Grund.
 - Welchen Eigengeschwindigkeitsvektor \vec{v} (Betrag und Richtung) benötigt er, um die Geschwindigkeit \vec{u} aus a) zu erreichen?
 - Wie groß ist der Luvwinkel?
- 4** Ein Flugzeug startet vom Flugplatz *Meinertzhagen* mit Eigengeschwindigkeit $\vec{v} = (135^0|300 \frac{\text{km}}{\text{h}})$. Nach 8 Minuten überquert es das Siegtal bei Kirchen.
- Bestimme den Windvektor \vec{w} .
 - Stelle fest, welchen Steuerkurs er ab Kirchen wählen muss, um den Flugplatz *Gießen-Lützellinden* zu erreichen.
 - Welchen Steuerkurs muss er bei gleichem Wind für den Rückflug zum Flugplatz *Meinertzhagen* wählen?
- 5** Ein Flugzeug, das bei Windstille mit einer Geschwindigkeit von $400 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ fliegt, wird für eine Flugdauer von 5 Stunden für Hin- und Rückflug betankt. Auf dem Hinflug herrscht Rückenwind.



Karte 6; Maßstab 1 : 500 000; veraltet

- a) Zeige, dass bei einer Windgeschwindigkeit w (in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$) die Entfernung des PNR durch die Formel

$$s = 1000 - \frac{w^2}{160}$$

berechnet wird.

- b) Stelle s als Funktion von w graphisch dar. Bei welcher Windgeschwindigkeit ist s maximal?

- 6** Bisher wurde bei den Aufgaben zur Berechnung des PNR stets mit Gegen- und Rückenwind gerechnet. Jetzt betrachten wir einen allgemeineren Fall. Das Flugzeug soll auf dem Hinflug stets genau nach Osten fliegen, auf dem Rückflug also nach Westen. Der Wind wird durch den Vektor $\vec{w} = (135^\circ | 60 \frac{\text{km}}{\text{h}})$ beschrieben. Die Eigengeschwindigkeit beträgt $200 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

- a) Bestimme zeichnerisch mit Hilfe des Winddreiecks den Steuerkurs und die Geschwindigkeit über Grund für den Hinflug und den Rückflug.
b) Das Flugzeug ist für eine Flugdauer von vier Stunden betankt. Bis zu welcher Entfernung darf es maximal fliegen?
c) Welche Flugzeiten für den Hinflug und den Rückflug ergeben sich daraus?

- 7** Verfahren ebenso wie in Aufgabe 6 für den Fall, dass ein Nordostwind mit Geschwindigkeit $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ weht.

- 8** Ein Flugzeug, das bei Windstille $300 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ schnell fliegt, benötigt beim Hinflug zu einem 500 km entfernten Zielort wegen eines Rückenwindes 15 Minuten weniger als beim Rückflug mit Gegenwind. Berechne die Windgeschwindigkeit und die Flugzeiten.

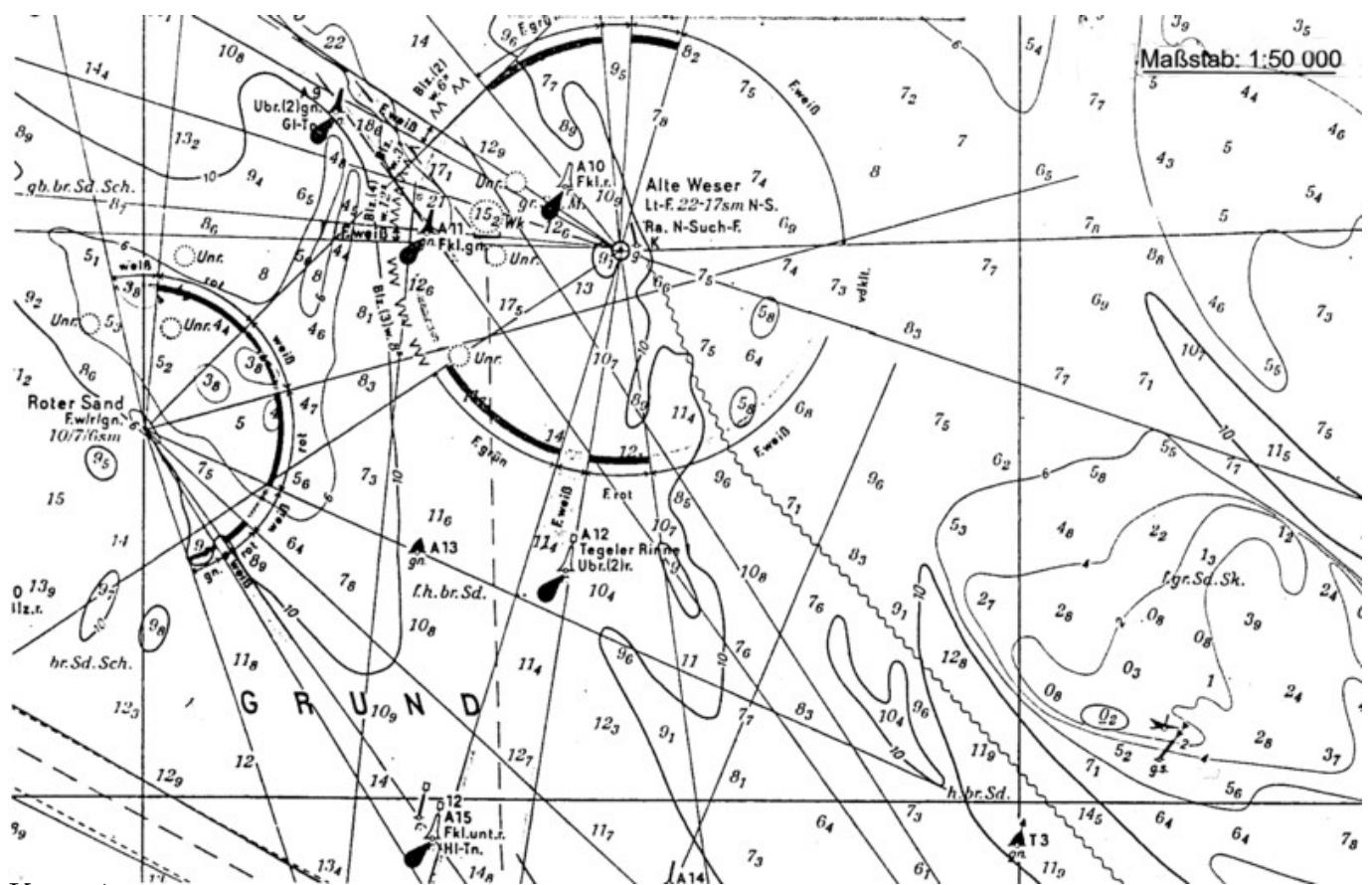
- 9** Ein Flugzeug braucht für eine Strecke von 500 km mit Rückenwind eine Viertelstunde weniger als mit Gegenwind. Die Windgeschwindigkeit beträgt $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Berechne die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs und die Flugzeiten.

2.5 Klausurbeispiele

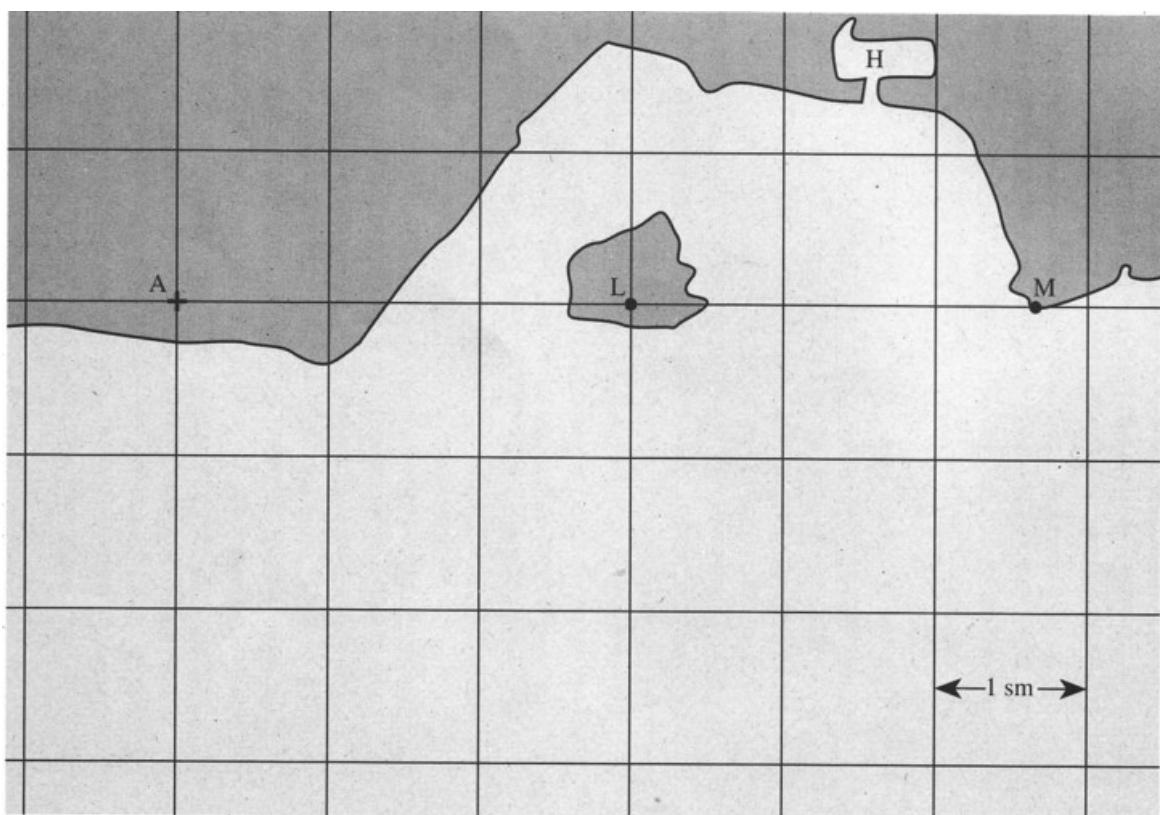
Klausur Nr. 1

- 1** Gib jeweils die rechtweisenden Richtungswinkel für folgende Richtungsangaben an:
 - a) NO
 - b) NNW
 - c) S 30^0 O
 - d) N 52^0 W
- 2** Eine Segelyacht peilt das Leuchtfeuer *Roter Sand* in Richtung 350^0 und das Leuchtfeuer *Alte Weser* in Richtung 43^0 . Bestimme den Standort. Wie lange braucht sie bei einer Geschwindigkeit von 5 kn bis zum Leuchtfeuer *Alte Weser*?
- 3** Ein Schiff fährt auf Kurs 40^0 und peilt das Leuchtfeuer *Alte Weser* zunächst unter 8^0 und nach 15 Minuten Fahrt mit 8 kn unter 289^0 . Ermittle die beiden Schiffsstandorte zum Zeitpunkt der Peilungen. In welchem Abstand wurde das Leuchtfeuer passiert?
- 4** Ein Schiff peilt die beiden Landmarken A und L unter einem Horizontalwinkel von 34^0 und L und M unter 47^0 (Karte 2).
 - a) Ermittle den Standort des Schiffes und den Kurs, den es fahren muss, um genau in die Mitte der Hafeneinfahrt bei H zu gelangen.
 - b) Wie lange dauert die Fahrt bei einer Geschwindigkeit von 5 kn?
- 5** Ein Ballon startet am Punkt A bei einem Westsüdwest-Wind mit Windgeschwindigkeit 4 kn. Zeichne den Kurs in Karte 2 ein, auf dem der Ballon fährt. Kurzzeitig befindet er sich über dem Meer, trifft dann aber wieder auf die Küste. Welche Strecke hat er dann zurückgelegt und wie lange dauert es, wenn der Wind konstant bläst?
- 6** Ein Flugzeug mit Eigengeschwindigkeit 250 km/h soll eine 450 km lange Strecke fliegen und anschließend wieder zurück.
 - a) Berechne die gesamte Flugdauer bei Windstille
 - b) Berechne die gesamte Flugdauer und den Spritverbrauch, wenn beim Hinflug ein Rückenwind von 50 km/h weht und beim Rückflug ein entsprechender Gegenwind. Das Flugzeug hat einen Spritverbrauch von 20 l pro Flugstunde.

Karten auf der folgenden Seite.



Karte 1

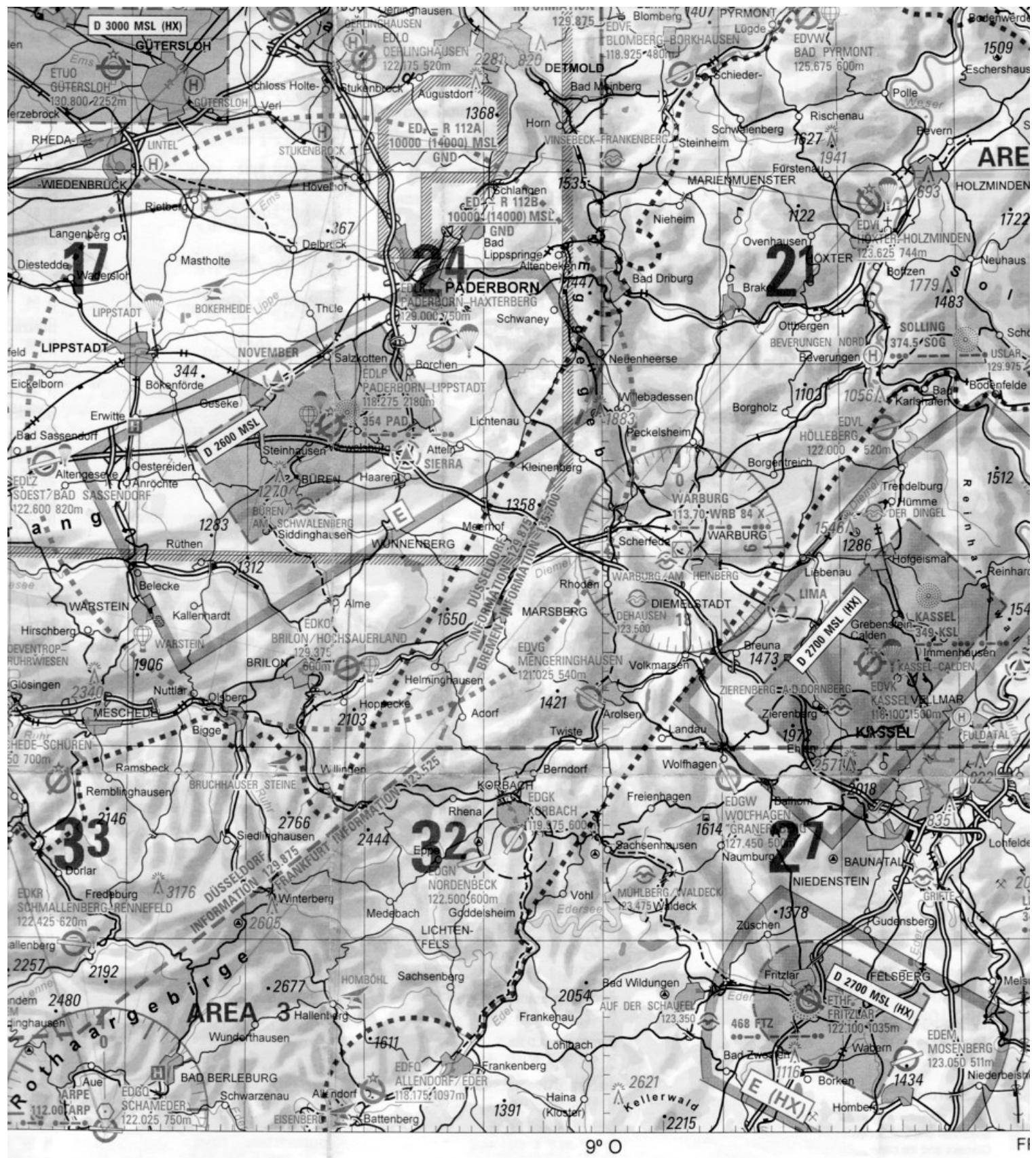


Karte 2

Klausur Nr. 2

- 1** Gib jeweils die ungefähren Richtungswinkel und die Länge der Start- und Landebahnen an:
 - a) Kassel-Vellmar
 - b) Höxter-Holzminden
- 2** Ein Flugzeug befindet sich auf dem 30^0 -Radial des Funkfeuers Arpe bei Schameder und auf dem 270^0 -Radial des Funkfeuers Warburg. Bestimme den Standort S auf der Karte.
- 3** Bei einem Nordostwind von 60 km/h steuert ein Flugzeug genau nach Norden mit $v = 180 \text{ km/h}$ Eigengeschwindigkeit. Durch den Windeinfluss wird es aber in eine andere Richtung getrieben. Bestimme den Kurs und die Geschwindigkeit über Grund zeichnerisch.
- 4** Ein Flugzeug mit Eigengeschwindigkeit $v = 190 \text{ km/h}$ soll vom Flugplatz *Höxter-Holzminden* zum Flugplatz *Allendorf/Eder* fliegen.
 - a) Bestimme die Entfernung (Maßstab $1 : 500\,000$) und den Kurs über Grund.
 - b) Berechne die Flugdauer bei Windstille.
 - c) Bestimme den Steuerkurs und die Geschwindigkeit über Grund bei einem Westwind von 50 km/h (mit Planskizze). Berechne anschließend die Flugdauer unter diesen Bedingungen.
 - d) Bestimme für den Rückflug den Steuerkurs und die Geschwindigkeit über Grund bei einem Westwind von 50 km/h .
- 5** Ein Flugzeug überfliegt um 14.24 Uhr den Kontrollpunkt *Sierra* des Flughafens Paderborn Lippstadt mit Steuerkurs 150^0 und Eigengeschwindigkeit 210 km/h . Nach 10 Minuten befindet es sich am nördlichen Stadtrand von Korbach. Ermittle den Kurs und die Geschwindigkeit über Grund und den Windvektor \vec{w} .
- 6** Der Bahnradius der GPS-Satelliten beträgt etwa $26\,570 \text{ km}$ (Abstand Erdmittelpunkt - Satellit), der Erdradius 6370 km . Berechne die Zeit, die das Signal bis zum Subsatellitenpunkt auf der Erdoberfläche braucht, und die Geschwindigkeit des Satelliten auf der Bahn (Umlaufszeit 12 h).
- 7** Die Position auf der Erdoberfläche wird als Schnittpunkt dreier Kreise bestimmt, die sich theoretisch genau an einem Punkt treffen. Da die Empfängeruhren etwas ungenau gehen, sind entweder alle Kreisradien zu groß oder zu klein. Beschreibe, was dies zur Folge hat und wie man das Problem löst.

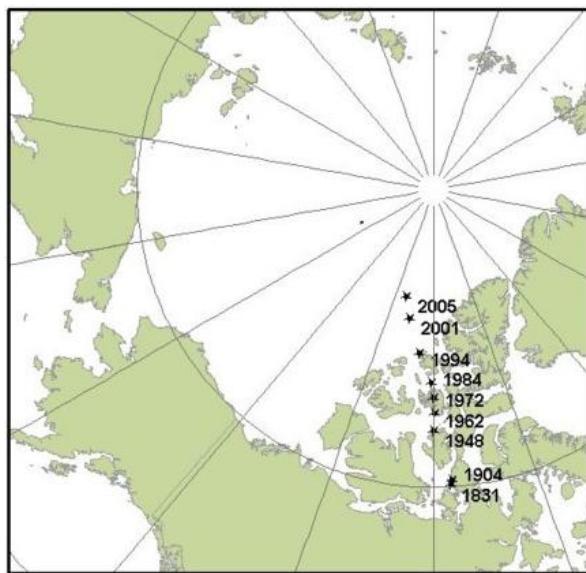
Karte auf der folgenden Seite



Karte zur Klausur Nr. 2

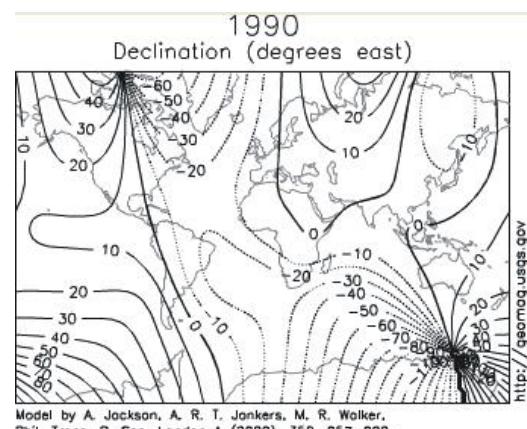
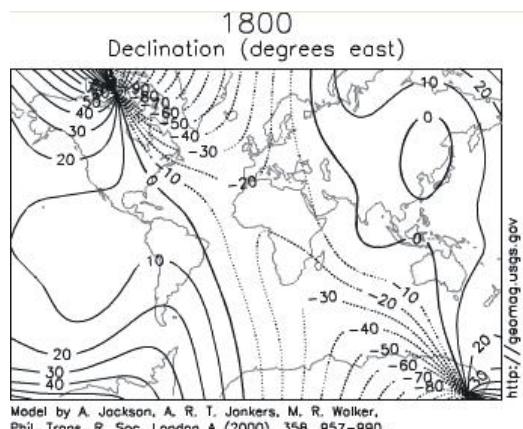
3 Kompass und Missweisung

Der Magnetkompass ist eines der ältesten technischen Hilfsmittel der Navigation. Er wurde in primitiver Form wohl schon im 14. Jahrhundert verwendet. Auch heute spielt er noch eine entscheidende Rolle in allen Bereichen der Navigation. Die natürliche Voraussetzung für das Funktionieren des Kompasses ist das Magnetfeld der Erde. Jeder Stabmagnet, der drehbar aufgehängt wird, ordnet sich bei uns ungefähr in Nord-Süd-Richtung an. Leider ist dies zunächst einfach erscheinende Prinzip, wenn man genaue Messungen machen will, mit einigen Tücken behaftet. Das Erdmagnetfeld ist nämlich keineswegs konstant, sondern in ständiger Veränderung begriffen. Die Feldlinien laufen auch keineswegs gerade von Süden nach Norden, sondern haben einen relativ unregelmäßigen Verlauf. Es ist deshalb eine grobe Vereinfachung, wenn man behauptet, dass die Kompassnadel genau zum Magnetpol in der Arktis weist. Der Magnetpol in der Arktis ist bekanntlich der magnetische Südpol des Erdfeldes, der in der Antarktis der magnetische Nordpol.



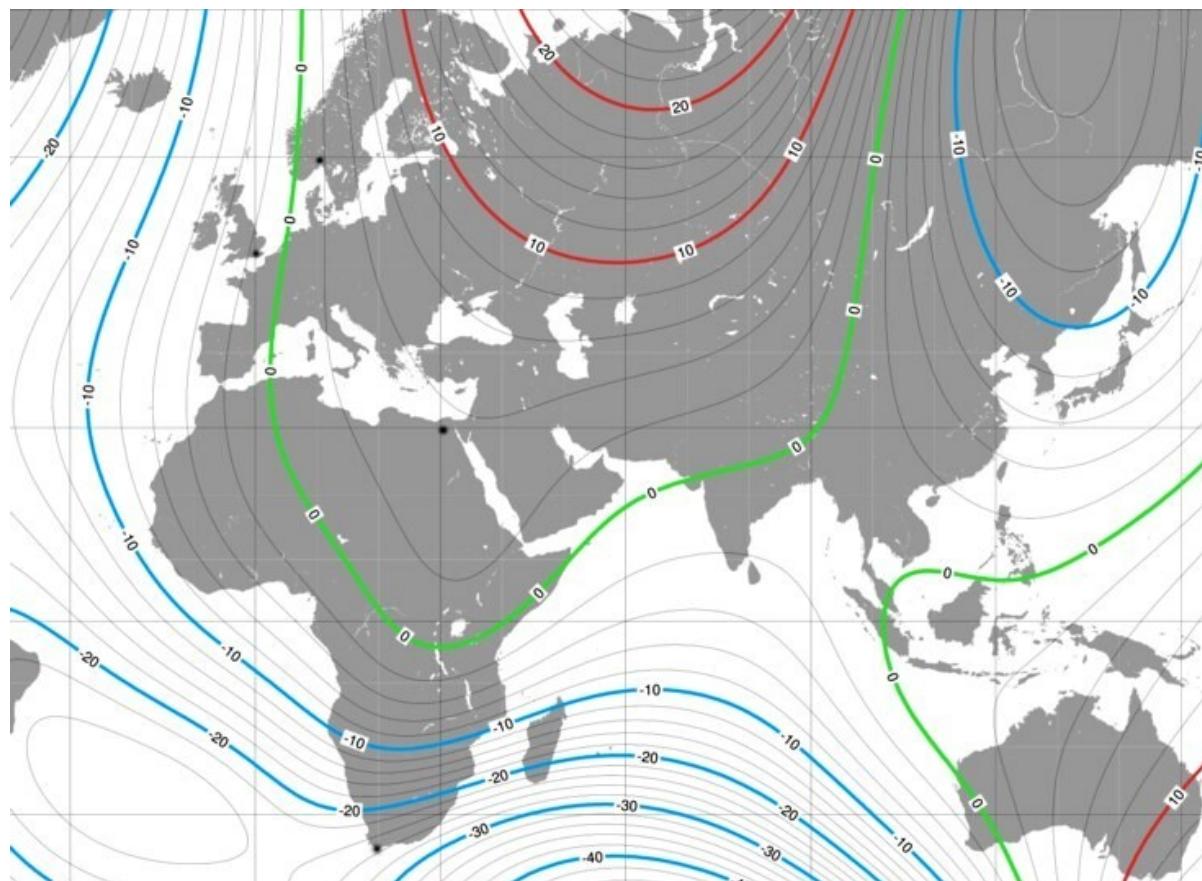
Die Pole sind dadurch charakterisiert, dass in ihrem Bereich das Magnetfeld besonders stark ist und die Feldlinien nahezu senkrecht zur Erdoberfläche in den Erdkörper eintreten. Deshalb ist in der weiteren Umgebung der Kompass völlig unbrauchbar. Das Feld wird durch starke elektrische Ströme im Erdinnern erzeugt, wird aber auch durch Vorgänge im nahen Weltraum beeinflusst. Deshalb verändert es sich praktisch täglich. Insbesondere die Magnetpole sind ständig in Bewegung. Die nebenstehende Abbildung veranschaulicht die Bewegung des arktischen Magnetpols.

Die Wanderung der Magnetpole und die anderen Unregelmäßigkeiten des Erdfeldes führen dazu, dass der Kompass nicht nur nicht genau nach Norden zeigt, sondern auch dazu, dass die Abweichung von der Nordrichtung vom Ort und von der Zeit abhängt. Die Abweichung bezeichnet man als **Missweisung**. Sie wird in Grad angegeben und sollte auf jeder guten Karte angegeben werden. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen Erdkarten, aus denen man die Missweisungen in den Jahren 1800 und 1990 ablesen kann.



Die eingezeichneten Linien sind Linien gleicher Missweisung, sog. **Isogonen**, d. h. alle Orte auf einer solchen Linie haben die gleiche Missweisung. Man erkennt, wie unregelmäßig das Erdfeld ist und wie stark es sich ändert. Um 1800 hatten wir in Mitteleuropa eine Missweisung von ca. -20° , d.h. 20° nach Westen, während sie 1990 fast gleich 0° war. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Veränderung der Missweisung in Paris im Verlauf mehrerer Jahrhunderte (negative Werte sind Abweichungen nach Westen).

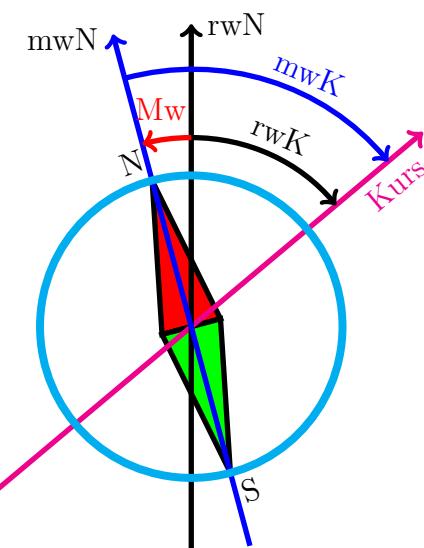
1580	1618	1663	1763	1780	1810	1852	1902	1944	2010
11°	8°	0°	-8°	-17°	-22°	-20°	-15°	-11°	$-0,5^{\circ}$



Missweisungen im Jahre 2010

- 1** Schätze mit Hilfe der obigen Karte die ungefähre Missweisung für Frankfurt/M. und Frankfurt a. d. O.
- 2** Schätze die Missweisung von London, Oslo und Kairo (schwarze Punkte in der Karte).
- 3** Finde mit Hilfe der obigen Karte und einem Atlas Orte, an denen die Missweisung im Jahre 2010 ca. 10° ((bzw. 0° oder -10°) beträgt.
- 4** Besorge dir die aktuellen Missweisungswerte für Orte deiner Wahl vom folgenden Internetserver:
<http://www-app3.gfz-potsdam.de/Declinationcalc/declinationcalc.html>

- 5** Bewege einen Kompass im Klassenraum oder Physikraum herum und beobachte dabei die Magnetnadel. Was stellst du fest? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Kompassablesung auf einem Schiff oder im Flugzeug?
- 6** Im Jahre 2010 beträgt die Missweisung im Siegerland $1,35^\circ$ (nach Osten) und die jährliche Zunahme ca. $0,13^\circ$. Berechne, wann die Missweisung voraussichtlich ca. 2° beträgt, wenn die Änderungsrate konstant bleibt (was langfristig keinesfalls sicher ist).
- 6** Die nebenstehende Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem rechtweisenden Kurs (rwK), dem missweisenden Kurs (mwK) oder Kompasskurs und der Missweisung (Mw), die in der Abbildung -15° beträgt, d.h. 15° nach Westen. Wenn man den Kurs mit einem Magnetkompass überwacht, muss man den rechtweisenden Kurs in den missweisenden umrechnen.
- Erläutere, wie man die Umrechnung vornehmen muss.
 - Ein Flugzeug soll auf $rwK = 213^\circ$ fliegen und die Karte weist eine Missweisung von -5° (W) aus. Berechne den Kompasskurs
- 7** Ein Pilot will von Kapstadt genau nach Nordosten fliegen. Berechne den missweisenden Kurs mit Hilfe der Missweisungskarte von 2010.
- 8** Führe eine entsprechende Rechnung für einen Piloten in Kairo durch.
- 9** Gehe mit einem Kompass im Klassen- oder Physikraum herum und beobachte die Kompassnadel. Nähre dich vor allem auch den Tischen und Stühlen. Was stellst du fest? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für Kompassablesungen im Flugzeug?
- 10** Ein Flugzeug befindet sich mitten über Island und soll einen rechtweisenden Kurs von 110° fliegen. Berechne den Kompasskurs.
- 11** Ein Fluzeug hat in der Nähe von Kapstadt einen Kompasskurs von 19° . Berechne seinen rechtweisenden Kurs.



Der Kreisel als Kompass

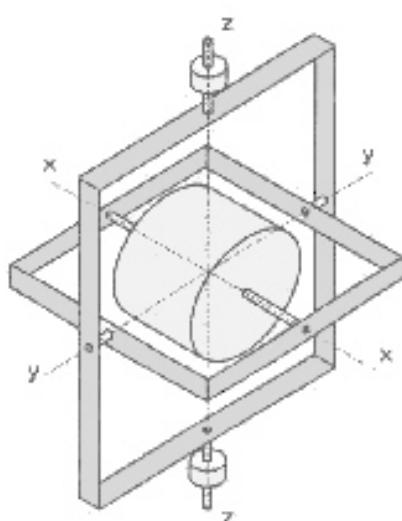
Da der Magnetkompass immer dann, wenn im Flugzeug Fliehkräfte auftreten, erhebliche Anzeigefehler aufweist, benötigt man eine stabilere Alternative. Dies ist der sog. **Kurskreisel**. Man macht sich zunutze, dass ein in Rotation versetzter Kreisel bei geeigneter Aufhängung seine Drehachse beibehält. Dies sollen einige Experimente verdeutlichen.

Experimente



- 1 Setze den Spielzeugkreisel wie im linken Bild dargestellt in schnelle Rotation und verändere durch Drehen aus dem Handgelenk die Lage der Drehachse. Was spürt man dabei für eine Kraft?
- 2 Setze den Spielzeugkreisel wieder in schnelle Rotation und stelle ihn auf die Spitze der Drehachse. Beobachte sein Verhalten über einen längeren Zeitraum.
- 3 Versetze den kardanisch aufgehängten Kreisel (rechtes Bild) in schnelle Rotation und gehe damit im Raum herum. Beobachte dabei die Kreiselachse. Formuliere eine Gesetzmäßigkeit für den kräftefreien Kreisel.
- 4 Verschiebe das Gegengewicht des Kreisels im rechten Bild etwas nach außen oder innen, sodass der Kreisel nicht mehr kräftefrei gelagert ist, versetze ihn in schnelle Rotation und beobachte sein Verhalten.

GRUNDLAGEN: Dreh- und Steuerbewegungen



Wirken auf einen rotierenden Kreisel keine Kräfte (Drehmomente), so bleibt seine Drehachse im Raum unverändert. Weitgehende Kräftefreiheit erreicht man durch die so genannte kardanische Aufhängung, bei der der Kreisel um drei Achsen frei beweglich ist. Da eine gewisse Reibung selbst bei sehr guter Lagerung unvermeidbar ist, gibt es keinen absolut kräftefreien Kreisel. Über längere Zeiträume kann sich die Drehachse doch leicht verändern. Wenn man die Drehachse durch Ausübung einer Kraft (eines Drehmomentes) verändern will, weicht der Kreisel aus. Die Ausweichbewegung erfolgt aber nicht in Richtung der Kraft sondern senkrecht dazu.

Aus der Praxis: Der Kurskreisel

Wird die Drehachse einmal in Nord-Süd-Richtung eingestellt, so behält sie diese Richtung bei, auch wenn das Flugzeug eine Kurve fliegt (siehe 1. Abbildung unten). Dafür wird eine so genannte kardanische Aufhängung benötigt, bei der sich der Kreisel in allen Richtungen frei drehen kann. Zu Beginn des Fluges wird der Kreisel gestartet und die Achse mit Hilfe eines Magnetkompasses in die gewünschte Richtung gestellt. Die Achse behält dann über einen längeren Zeitraum ihre Lage im Raum bei, welche Bewegungen das Flugzeug auch immer macht. Allerdings wird die Bewegung des Kreisels durch Reibung gestört, sodass sich die Achse langfristig doch verstellt. Deshalb sollte man die Anfangseinstellung des Kreisels alle 15 Minuten mit Hilfe eines Magnetkompasses kontrollieren und gegebenenfalls neu justieren. Der Kurskreisel sucht die Nordrichtung also nicht selbst, sondern muss während eines ruhigen Geradeausfluges eingestellt werden. In modernen Geräten kann diese Einstellung aber auch automatisch erfolgen. Der Kurskreisel kann aber den Magnetkompass nicht ersetzen.

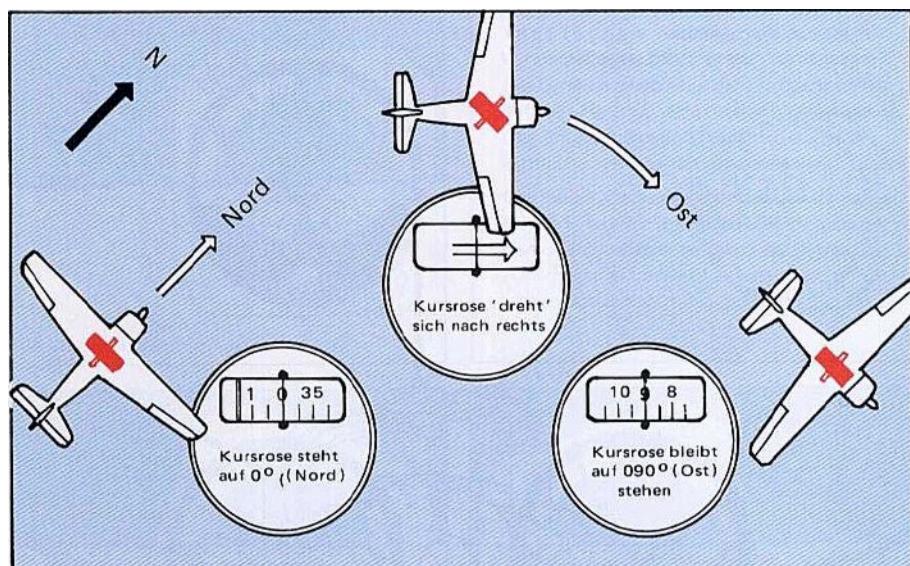
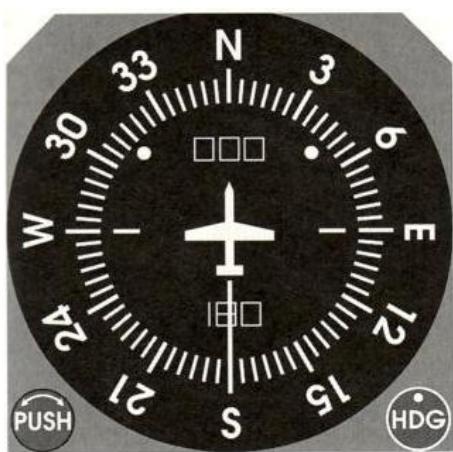
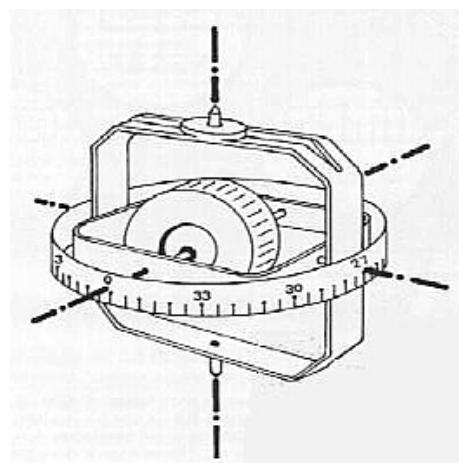


Abb. ... Zur Funktion des Kurskreisels



Das Ableseinstrument



Kardanische Aufhängung

4 Segelflug und Gleitverhältnisse

In diesem Kapitel geht es nicht um die Physik des Segelfliegens, sondern um die Flugplanung beim Segelfliegen. Neben den bereits bekannten Navigationsaufgaben kommt hier ein ganz wesentliches Planungselement hinzu: die begrenzte Reichweite beim Segelflug. In einem kleinen Experiment mit Modellflugzeugen wollen wir die Güte eines Gleiters ermitteln. Dazu dient der folgende Bauplan eines Balsagleiters. Man kann aber auch fertige Bausätze verwenden, die im Fachhandel preisgünstig zu erwerben sind.

Type	Seitenansicht des Flugmodells mit Rumpf, M = 1 : 1 (Maße in mm)*	Bemerkungen
	<p>Teil 3</p> <p>Teil 1</p> <p>Teil 7</p> <p>90</p> <p>22</p> <p>Hier beim Verkleben der Teile 1-3 und 7 den Rumpf mit Abfallstück 1,5 mm unterfüllen</p> <p>Trimm-Blei befestigen</p> <p>2</p> <p>a) Die Trimmblei-Zugabe variiert mit dem spezifischen Gewicht des Holzes b) Schwerpunkttagge c) Zum Erzielen der V-Form Tragflügelenden 40 mm anheben</p>	
	<p>linke Tragfläche</p> <p>Teil 2</p> <p>Höhenleitwerk</p>	
	<p>Teil 1</p>	* nach Vergrösserung über Kopierer 141,4 %

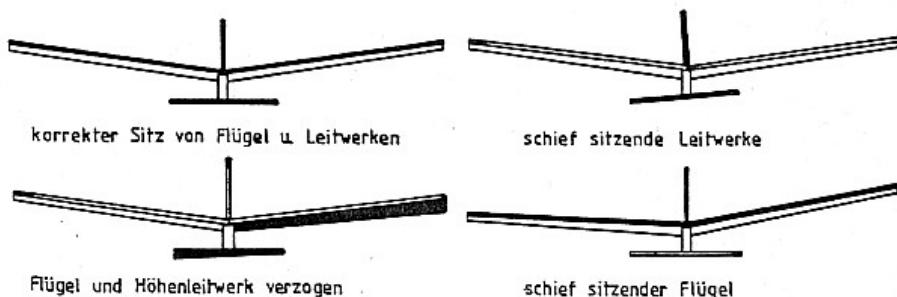
Bauanleitung

Besorge dir 1,5 mm dicke Balsaholzplatten und Trimmblei im Modellbau-Fachhandel. Die Vorlage muss um 141,4 % vergrößert werden (DIN A 4 → DIN A 3). Übertrage den Umriss auf die Balsaplatten. Der Rumpf (Teil 7) und die Tragflächen (Teil 1) werden doppelt benötigt. Die Richtung der Doppelpfeile im Plan sollte mit der Richtung der Holzfaser des Brettchens übereinstimmen. Zum Kleben muss man einen Hartkleber verwenden (z. B. UHU Hart). Nach dem Aushärten des Rumpfes klebt man die übrigen Teile der Skizze entsprechend an. Dabei sollten die Teile mit Stecknadeln auf einem Brett fixiert werden, damit die Klebung in einer stabilisierten Form erfolgt und die Tragflächen nachher symmetrisch sind. Vor dem „Einfliegen“ sollten die Klebstellen mehrere Stunden gut aushärten. Das Trimmblei muss so angebracht werden, dass der Flieger bei Unterstützung unterhalb der markierten Schwerpunktlage (unterhalb der Tragfläche) im Gleichgewicht ist. Gegebenenfalls muss die Trimmung beim Einfliegen korrigiert werden. Die Trimmbleistreifen werden an der Spitze zunächst provisorisch festgeklemmt und erst nach dem Einfliegen festgeklebt.

Einfliegen der Modelle

Beim Einfliegen sollen die Flugeigenschaften optimiert werden. Der Fluggleiter soll beim Flug keine Nickbewegungen machen und auch nicht zu steil „abstürzen“, sondern möglichst gleichmäßig langsam zu Boden gleiten. Dies erreicht man durch die richtige Anbringung des Trimmbleies. Man kann die Position des Bleistreifens mehr nach vorn oder mehr nach hinten verlagern und auch die Länge des Streifens (d. h. sein Gewicht) vergrößern oder verkleinern. Wenn die Flugeigenschaften gut sind, kann das Trimmblei festgeklebt werden.

Falls die Modelle nicht hinreichend geradeaus fliegen, liegt dies meistens an einem unsymmetrischen Zusammenbau. Prüfe also nach Augenmaß, ob eine Unsymmetrie erkennbar ist. Eventuell muss die eine oder andere Klebestelle gelöst und neu verarbeitet werden, damit der Geradeausflug gewährleitet ist.



Qualitätstest

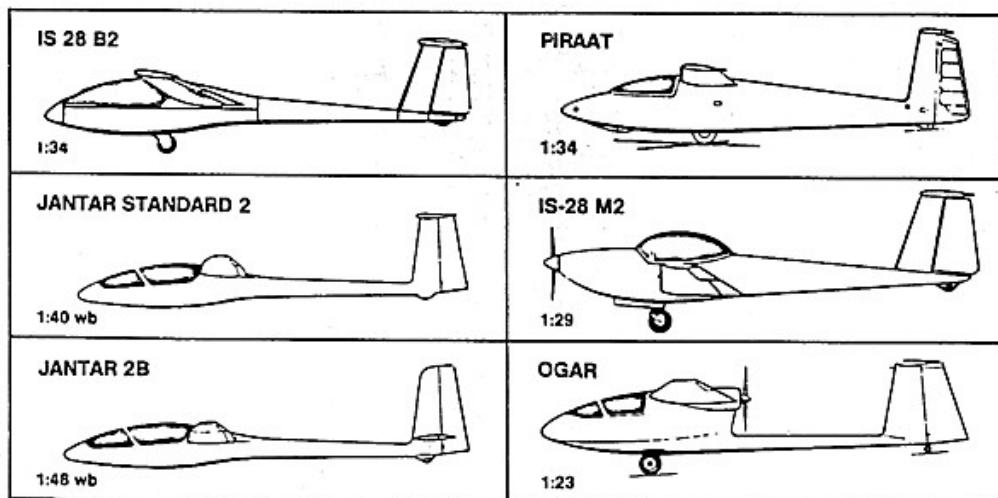
- 1** Überlege dir geeignete Qualitätskriterien für den Vergleich der Flugmodelle.
- 2** Führe einen Leistungsvergleich durch und stelle fest, wer den besten Fluggleiter gebaut hat.

Der einzige „Treibstoff“, der zur Verfügung steht, ist die Anfangshöhe, aus der der Segelflieger den Gleitflug beginnt. Er nutzt die Lageenergie des Flugzeuges aus, um voranzukommen. Es hängt von den jeweiligen Gleiteigenschaften des Flugzeugs ab, wie weit es

mit einem vorgegebenen Höhenunterschied kommt. Die Qualität des Gleiters wird durch das sog. **Gleitverhältnis** gemessen:

$$\text{Gleitverhältnis} = \frac{\text{Anfangshöhe}}{\text{Flugweite}}$$

Das Gleitverhältnis 0,04 oder 1 : 25 besagt, dass man aus einer Anfangshöhe von 1 km 25 km weit fliegen kann. Die folgende Abbildung zeigt einige Flugzeugtypen mit den jeweiligen Gleitverhältnissen.



Manchmal wird anstelle des Gleitverhältnisses sein Kehrwert, die sog. **Gleitzahl** angegeben.

- 1** Welches der abgebildeten Flugzeuge ist der beste Gleiter?
- 2** Die IS-28 M2 und die OGAR sind schlechte Gleiter. Was könnte der Grund dafür sein?
- 3** Ein viersitziges Passagierflugzeug hat ein Gleitverhältnis 1 : 12. Plötzlich „stirbt“ in 700 m Höhe der Motor. Der nächste Flugplatz ist 8 km entfernt. Kann es diesen theoretisch noch erreichen, oder muß es „auf dem Acker“ landen?
- 4** Für moderne Segelflugzeuge sind folgende Gleitverhältnisse angegeben:
A: 1 : 27, B: 3 : 76, C: 4%, D: 0,03.
Welches ist der beste Gleiter? Stelle eine Reihenfolge auf!
- 5** Ein Drachenflieger hat ein Gleitverhältnis 1 : 2. Wie weit ist der horizontal zurückgelegte Weg bei einer Starthöhe von 100 m? Wie groß ist der tatsächlich zurückgelegte Weg?
- 6** Otto Lilienthal war einer der Pioniere der Luftfahrt. Zwischen 1883 und 1896 unternahm er über 2500 Flüge mit einem Drachenflieger, um die Flugeigenschaften auszutesten. Eines Tages flog er aus 25 m Höhe 185 m weit. Anschließend veränderte er sein Fluggerät und unternahm einen neuen Versuch. Nun flog er aus 20 m Höhe 155 m weit. Hatte die Veränderung wirklich eine Verbesserung gebracht?

Die oben angegebenen Gleitverhältnisse sind optimale Werte, die typisch für das jeweilige Flugzeug sind. Selbstverständlich ist es möglich steiler zu fliegen, wenn man das Höhenruder entsprechend einstellt. Wird der Gleitwinkel größer, so wird die Geschwindigkeit in der Regel größer (siehe rechte Seite der Tabelle). Werden gleichzeitig die Flugeigenschaften verschlechtert, z.B. durch Ausfahren der Landeklappen, so kann auch die Geschwindigkeit kleiner werden (linke Seite der Tabelle).

Die Funktion *Geschwindigkeit* → *Gleitverhältnis* für das Segelflugzeug *TWIN II*.

Geschw. in km/h	75	80	90	100	120	140	160	180	200
Gleitverhältnis	1:25	1:33	1:36	1:37	1:37	1:33	1:28	1:24	1:20

- 7** Stelle die oben dargestellte Funktion tabellarisch dar. Dabei wird das Gleitverhältnis durch einen Dezimalbruch dargestellt (z.B. $1 : 25 = 0,04$).
- 8** Während eines Wettkampfes ist ein Segelflieger mit seiner TWIN II auf 1750 m Höhe noch 49 km vom Ziel entfernt. Es gibt praktisch keinen Wind und keine Thermik.
- Wie hoch ist er am Ziel, wenn er mit dem optimalen Gleitverhältnis $1 : 37$ fliegt? Wie lange dauert der Flug?
 - Welches ist das größte Gleitverhältnis, mit dem er gerade noch das Ziel erreicht?
 - Welche Flugzeit wird mindestens benötigt, wenn es darum geht, möglichst schnell zum Ziel zu gelangen? Wie groß ist dann das Gleitverhältnis?
- 9** Wenn der Pilot im Cockpit sitzt, kann er natürlich nicht das Gleitverhältnis ablesen, wohl aber die Geschwindigkeit. Wie dies möglich ist, erfahren wir später. Zeichne eine Graphik für den TWIN II, in der für eine Starthöhe von 1000 m die Flugweite (Hochachse) als Funktion der Geschwindigkeit (Rechtsachse) dargestellt wird. Die oben tabellierten Daten, bzw. die Graphik aus Aufgabe 1 müssen dafür benutzt werden.
- 10** Ein TWIN II-Segelflugzeug ist in 1500 m Höhe und soll noch 35 km zurücklegen. Welche Geschwindigkeit muß der Pilot wählen, und wie lange dauert der Flug minimal (bzw. maximal)?
- 11** 5 Segelflieger starten — jeder mit einer TWIN II — aus 1400 m Höhe. Unterwegs können sie alle 7 - 8 km mit Aufwinden rechnen, die ihnen ein Steigen von 1 m/s ermöglichen. In 30 km Entfernung sehen sie eine Cumuluswolke (Haufenwolke), von der sie 3 m/s Steigung erwarten. Jeder Pilot richtet seinen Flug anders ein. Alle wollen in der Wolke ihre Ausgangshöhe von 1400 m zurückgewinnen. Die Piloten (1) bis (4) verzichten darauf, in den Aufwinden unterwegs Höhe zu gewinnen, Pilot (5) steigt jedoch unterwegs in jedem der Aufwinde auf die Ausgangshöhe von 1400 m zurück. Die Fluggeschwindigkeiten werden durch folgende Tabelle gegeben:

Pilot	1	2	3	4	5
Geschw. in km/h	105	135	180	200	105

5 Höhen- und Tiefenmessung

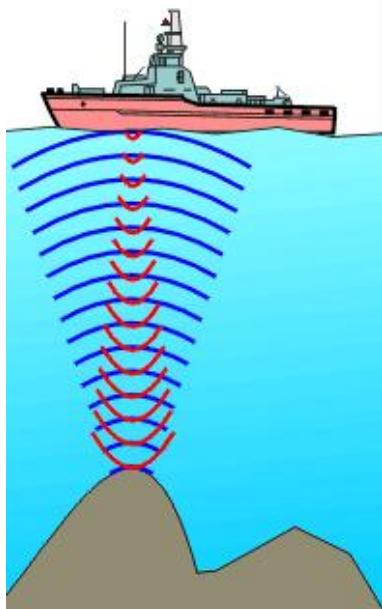
Die Höhenmessung ist bei der Fliegerei eine extrem wichtige Angelegenheit, da eine falsche Einschätzung der Höhe schwerwiegende Unfälle zur Folge haben kann. Leider sind Höhenmessungen im Luftraum tatsächlich mit Schwierigkeiten behaftet. Wir werden hier verschiedene Methoden untersuchen. Man nennt Geräte, mit denen man Höhen messen kann, auch **Altimeter**.

Die Sonarmethode (Echolot)

Diese Methode wird in der Seefahrt, aber kaum in der Luftfahrt verwendet. Trotzdem werden wir sie kennenlernen, da wir verstehen müssen, warum sie in der Luftfahrt nicht zweckmäßig ist. Auf einem Schiff wird damit der Abstand zum Meeresboden bestimmt. Man könnte also auf die Idee kommen, auf die gleiche Weise auch den Abstand eines Flugzeugs vom Erdboden so zu bestimmen. Wir werden aber sehen, dass das aus verschiedenen Gründen nicht geht bzw. mit Schwierigkeiten behaftet ist.

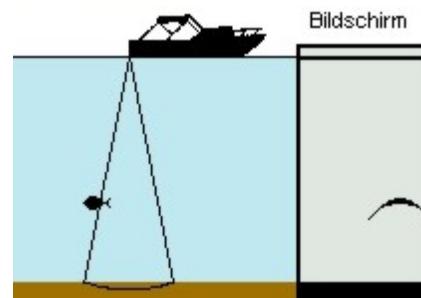
- 1** Beschaffe dir aus Fachbüchern, Lexika oder aus dem Internet Informationen über die Echolotmethode und schreibe einen kleinen Aufsatz darüber.
- 2** Auf dem gleichen Prinzip beruhen auch Entfernungsmesser, mit denen Handwerker den Abstand zu einer Wand, oder von einer Wand zur anderen messen können. Erkläre, wie dies möglich ist.
- 3** In Luft beträgt die Schallgeschwindigkeit ca. $330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Ein Ballonfahrer benutzt ein selbstgebautes Ultraschallaltimeter. Es sendet einen kurzen Ultraschallimpuls nach unten aus und empfängt das Echo, das durch Reflexion am Boden entstanden ist, nach 1,2 Sekunden. Berechne daraus die Höhe des Ballonfahrers über Grund.
- 4** Die Schallgeschwindigkeit hängt von der Dichte des Mediums ab, in dem sich der Schall ausbreitet. Warum führt dies in der Luftfahrt, insbesondere bei größeren Höhen, zu wesentlich größeren Problemen als bei Messungen im Wasser?
- 5** Wir betrachten ein Flugzeug, das in 2000 m Höhe über Grund mit einer Geschwindigkeit von $300 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ fliegt.
 - a) Wie viel Zeit vergeht zwischen Aussendung des Ultraschallsignals und Empfang des Echoes bei diesem Abstand zum Boden. Obwohl wir wissen, dass das nicht ganz richtig ist, rechnen wir mit $c = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Wie würde der tatsächliche Wert vom berechneten abweichen?
 - b) Berechne die Strecke, die das Flugzeug in dieser Zeit zurücklegt in Metern. Welches Problem entsteht dadurch?
- 6** In der Luftfahrt verwendet man eine Methode, die nach dem gleichen Prinzip wie das Echolot funktioniert, aber mit Radarstrahlen anstelle von Ultraschall arbeitet. Radarstrahlen breiten sich wie das Licht mit c.a. $300\,000\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus. Führe die gleiche Rechnung wie in Aufgabe 5 für Radarstrahlen durch.

Aus der Praxis: Echolot und Sonar in der Schifffahrt



Ein Echolot ist ein Gerät, mit dem man mit Hilfe von Ultraschall-Signalen die Tiefe von Gewässern ermittelt. Die Bezeichnung SONAR ist eine Abkürzung für SOUND, NAVIGATION and RANGING („Schall, Navigation und Reichweite“). Das Sonar-System wurde im 2. Weltkrieg für die Ortung von U-Booten entwickelt. Beide Verfahren basieren auf dem gleichen Prinzip, das für das Echolot in der nebenstehenden Abbildung dargestellt ist: Ein Ultraschallsignal wird von einem Sender am Kiel des Schiffes ausgesendet, von Fischen oder vom Meeresboden reflektiert und schließlich von einem Empfänger am Schiffsdeck aufgenommen. Die Schallgeschwindigkeit in Wasser bei 10°C beträgt etwa 1450 m/s.

Die Abbildung zeigt ein modernes Echolot mit LCD-Display und einem typischen Bild. Das Gerät enthält einen kleinen Computer, der aus der Länge der Laufzeit, die vom Aussenden des Signals bis zum Eintreffen des Echoes vergeht, die Tiefe des Gegenstandes berechnet, der das Echo verursacht hat (Fisch oder Meeresboden). Die Echo gebenden Gegenstände werden dann in der berechneten Tiefe auf dem Bildschirm dargestellt (s. o.).



- 1** Das Echo kommt nach ca. 20 ms vom Meeresboden zurück. Wie tief ist das Meer an dieser Stelle?
- 2** Welche Auswirkungen hat es, wenn der Meeresboden uneben ist?
- 3** Auf dem Bildschirm des Gerätes sieht man Fische und andere Gegenstände in Form kleiner Sicheln, d. h. das linke und das rechte Ende scheint etwas tiefer zu liegen, obwohl dies in Wirklichkeit nicht so ist. Versuche dieses Phänomen an Hand des rechten Bildes zu erklären.
- 4** Ein exakt gehendes Echolot benötigt Informationen über den Salzgehalt und die Temperatur des Wassers. Was könnte der Grund dafür sein?

Aus der Praxis: Barometrische Höhenmessung

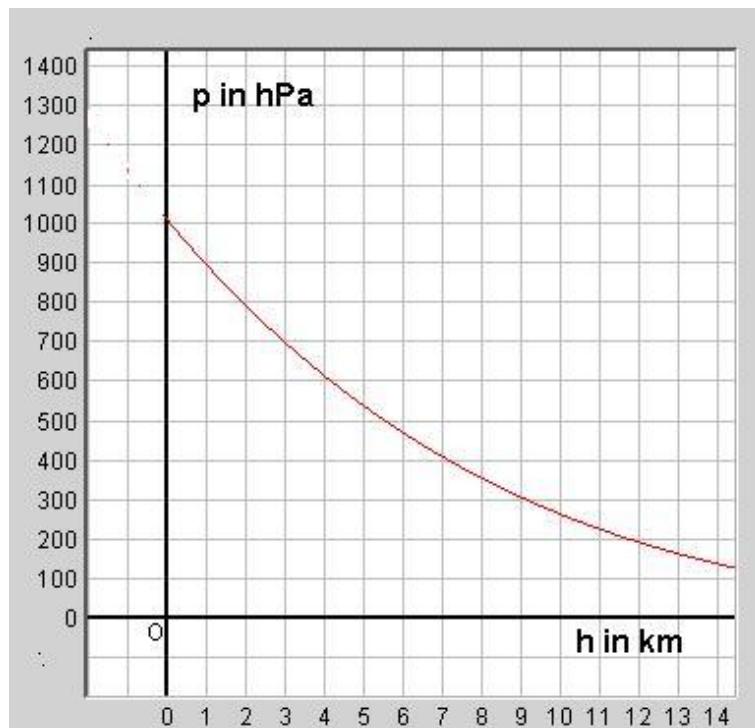
Eine relativ einfache und schnelle Höhenmessung ist mit Hilfe eines Barometers, also eines Luftdruckmessers möglich. Allerdings ist diese Methode mit zahlreichen Ungenauigkeiten und Fehlerquellen verbunden. Sie beruht darauf, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt. Leider ist der Zusammenhang zwischen Höhe und Luftdruck nicht so einfach wie der Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Wasserdruck. Für diesen Fall hast du bereits die Gesetzmäßigkeit kennengelernt:

$$p = \varrho gh$$

Der Wasserdruck wird von den über der Messstelle lastenden Wassermassen erzeugt. Er nimmt deswegen proportional zur Wassertiefe h zu. In der Atmosphäre liegen die Verhältnisse wesentlich komplizierter, da die Luft zusammendrückbar ist, d. h. die Dichte ϱ hat keinen festen Wert wie im Wasser, sondern nimmt nach oben auf komplizierte Weise ab. Dabei spielt auch die jeweilige Temperatur eine wesentliche Rolle, denn warme Luft ist dünner als kalte. Auch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst das Geschehen. Eine exakte mathematische Beschreibung ist deshalb kaum möglich. Trotzdem haben die Fachleute eine Formel ermittelt, die ganz ordentliche Mittelwerte für den Druck in unterschiedlichen Höhen liefert:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{h}{44,33 \text{ km}}\right)^{5,255}$$

Darin ist p_0 der durchschnittliche Luftdruck auf Meereshöhe (1 013,25 hPa). Wie man auf diese Formel kommt und wie man sie ggf. an andere Temperaturverhältnisse anpasst, kann hier nicht beschrieben werden. Die folgende Graphik zeigt den Verlauf dieser Funktion.



Fortsetzung: Barometrische Höhenmessung

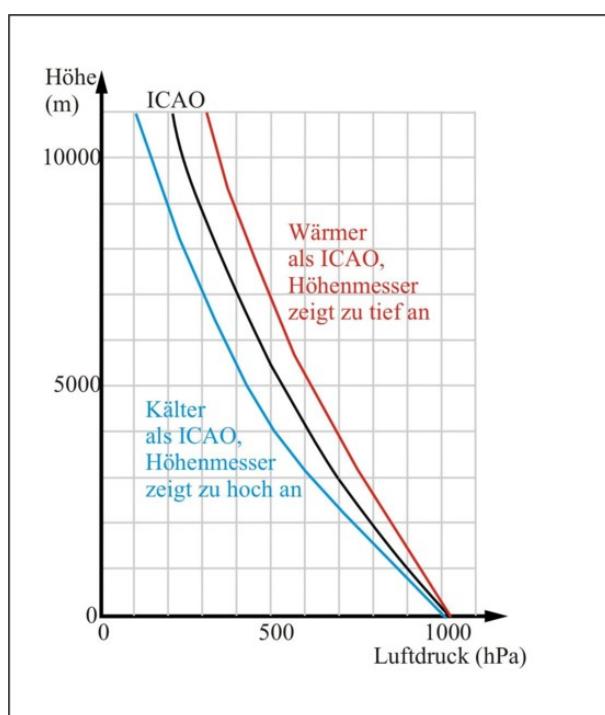
Die barometrische Höhenformel für eine idealisiert gedachte Atmosphäre dient als Grundlage für die Höhenmessung mit dem Barometer. Das Messgerät im Flugzeug zeigt allerdings nicht den Druck an, sondern direkt eine Höhe in Fuß, die sich daraus ergibt (s. u.).

- 1 Falls du über hinreichende Kenntnisse in der Potenzrechnung verfügst, zeige, dass man die Höhe mit der Formel

$$h = 44,33 \text{ km} \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0,1903} \right]$$

berechnen kann. Dafür musst du allerdings grundlegende Kenntnisse über gebrochene Exponenten und Wurzeln haben. Sonst verwende die obige Formel ohne Beweis bei den folgenden Aufgaben

- 2 Berechne die Höhe bei einem Druck von 472 hPa (bzw. 533 hPa).
- 3 Auf einem gebräuchlichen Barometer kann man Luftdruckveränderungen von 1 hPa noch ablesen. Berechne, welche Höhendifferenz einem Luftdruckabfall von 1000 hPa auf 999 hPa entspricht, um festzustellen, ob ein solcher Effekt im Schulgebäude nachweisbar ist. Falls ein solcher Höhenunterschied im Schulgebäude existiert, prüfe nach, ob sich der Barometerausschlag tatsächlich ändert, wenn man seinen Standort entsprechend verändert.



Die nebenstehende Graphik veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Höhe bei unterschiedlichen Temperaturen. Man erkennt daraus, dass eine von der Durchschnittstemperatur abweichende Temperatur zu erheblichen Fehlanzeigen führt, die man aber in Kauf nimmt, da sie für alle Flugzeuge gleich ist. Auch die Wetterlage hat einen starken Einfluss auf die Anzeige. Wenn sich das Flugzeug in einem Tiefdruckgebiet befindet, zeigt der Höhenmesser eine größere Höhe an als das Flugzeug real hat. Ein Flugzeug, das ohne Höhenveränderung in ein Tiefdruckgebiet hineinfiegt, scheint zu steigen, da der Druck geringer wird.

Für den Flugverkehr ist es trotz dieser Fehlanzeigen sicherer, wenn man sich am Luftdruck orientiert, da dieser für alle anderen Flugzeuge in der Nähe bei gleicher Höhe gleich ist.

Fortsetzung: Barometrische Höhenmessung

Würde man die barometrisch gemessenen Höhen auf reale Höhen umrechnen, brauchte man ganz exakte Kenntnisse über die Druck- und Temperaturverhältnisse vor Ort und müsste diese durch eine komplizierte Umrechnung einbringen. Würden zwei Flugzeugführer das nicht in genau der gleichen Weise machen, bestünde die Gefahr von Zusammenstößen, da die beiden Flugzeuge möglicherweise auf gleicher Höhe wären, obwohl ihre Piloten davon ausgehen, dass sie auf unterschiedlicher Höhe sind. Wenn die barometrischen Höhenmesser aber unterschiedliche Werte anzeigen, sind die Flugzeuge definitiv auf unterschiedlichen Höhen und es kann keinen Zusammenstoß geben.

Bei der Landung kann es aber zu Problemen kommen, da der Pilot beim Landevorgang die exakte Höhe braucht. Deshalb muss er rechtzeitig vor der Landung die nötigen Daten per Funk anfordern um seinen Höhenmesser auf die Platzhöhe einzustellen. Der Höhenmesser wird nur beim Start- und Landevorgang auf die „Platzhöhe“ eingestellt. Wenn eine bestimmte Höhe erreicht ist, wird der Höhenmesser von der Platzhöhe auf die Standardhöhe umgestellt.

Zusätzlich werden bei Starts und Landungen noch alternative Höhenmesser eingesetzt, die die Höhe über Grund liefern. Ein solches Verfahren ist das oben besprochene Radarechoverfahren.



Hinweis: Moderne Navigationsverfahren wie GPS sind im Prinzip auch geeignet, um Höhenmessungen vorzunehmen. Technisch ist das überhaupt kein Problem. Trotzdem wird dieses Verfahren im Luftverkehr nicht eingesetzt, allenfalls zur Kontrolle. Der Grund ist eher politisch. Das System wurde vom US-Militär entwickelt und wird auch von ihm kontrolliert. Es kann jederzeit abgeschaltet oder so verschlüsselt werden, dass ein freier Zugang nicht mehr möglich ist. Deshalb kann man sich nicht auf ein solches System stützen.

- 4** Ein Flugzeug ist mit einem Luftdruck-Höhenmesser ausgestattet. Im Bereich zwischen 0 und 2000 m über NN nimmt der Luftdruck um ca. 11 Pa/m ab. Das Bordbarometer zeigt eine Druckabnahme von 990 hPa auf 910 hPa. In welcher Höhe über dem Startort befindet sich das Flugzeug ungefähr?
- 5** Zeige mit Hilfe der barometrischen Höhenformel (s.o.), dass die Angabe 11 Pa/m für die durchschnittliche Druckabnahme aus Aufgabe 4 korrekt ist.
- 6** Ein Flugzeug fliegt von einem Hoch- in ein Tiefdruckgebiet. Der Pilot orientiert sich an seinem barometrischen Höhenmesser und bleibt auf der gleichen vom Fluglotsen zugewiesenen Flugfläche, d. h. auf einer Fläche gleichen Luftdrucks. Erläutere, wie sich seine tatsächliche Flughöhe (in Meter über NN gemessen) ändert. Warum kann es trotzdem nicht zu Kollisionen mit anderen Flugzeugen kommen?

Exkurs: Physik mit dem Computer

Die oben genannte barometrische Höhenformel ist für uns ziemlich undurchschaubar geblieben. Das Hauptproblem war dabei die Veränderung der Dichte bei steigender Höhe, aber auch die Veränderung der Temperatur spielt eine Rolle. Wir lernen nun eine Methode kennen, mit der man Schritt für Schritt den Druck berechnen kann. Dabei gehen wir davon aus, dass sich die Dichte auf einer Strecke von 500 m so wenig ändert, dass man keinen großen Fehler macht, wenn man sie als konstant ansieht. Dann kann man für diese 500 m die bekannte Formel $\Delta p = \varrho g \Delta h$ verwenden, wobei man für ϱ den für diese Schicht gültigen Wert verwendet. Die Verringerung der Dichte nach oben hin röhrt daher, dass in größeren Höhen weniger Luft auf die darunter befindliche Schicht drückt. Da Luft zusammendrückbar (kompressibel) ist, wird sie in tieferen Schichten stärker zusammengedrückt als in höheren. Je geringer der Druck, desto geringer die Dichte:

$$\frac{\varrho}{\varrho_0} = \frac{p}{p_0} \quad \text{oder} \quad \varrho = \varrho_0 \cdot \frac{p}{p_0}$$

Darin sind ϱ_0 und p_0 Dichte und Druck am Boden. Setzt man die zweite Formel in die erste ein, so erhält man:

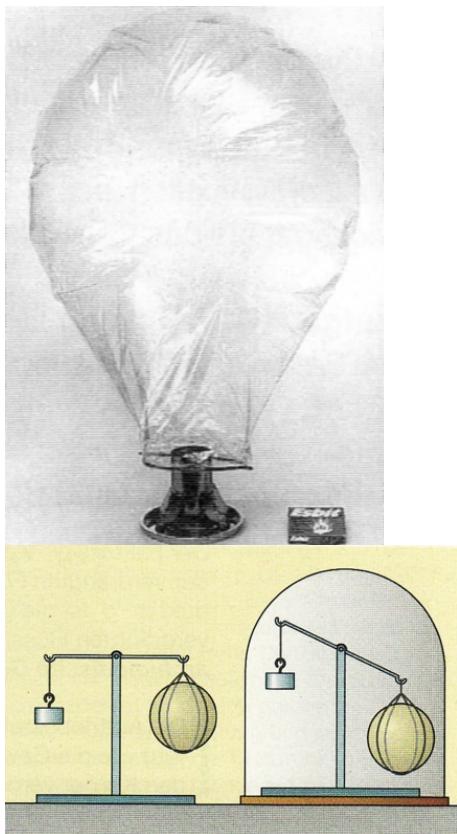
$$\Delta p = \varrho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot g \Delta h$$

Wenn die Dichte am Boden bekannt ist und man den Druck p für eine Schicht bereits ausgerechnet hat, kann man mit dieser Formel berechnen, wie stark sich der Druck in dieser Schicht ändert und damit den Druck in der nächsten Schicht berechnen, indem man die Veränderung abzieht: $p_{neu} = p_{alt} - \Delta p$. Mit $\varrho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $p_0 = 1000 \text{ hPa}$, $g = 9,81 \text{ N/kg}$ und $\Delta h = 500 \text{ m}$ ergibt sich daraus $\Delta p = 5886 \cdot p/p_0$

Dies kann man nun in eine Tabellenkalkulation eingeben. Zunächst erzeugt man zwei Spalten für die Eingabe der Höhe (von - bis), dann eine Zelle für den Startdruck (hier C3 mit 1000 hPa) und eine Zelle für die Berechnung der ersten Änderung (D3 mit $=5886/100$). Die Division durch 100 wird ausgeführt, weil der Luftdruck in hPa und nicht in Pa angegeben werden soll. Der Faktor p/p_0 entfällt, weil in der ersten Schicht $p = p_0$ ist. Anschließend berechnet man den zweiten Druckwert in C4 mit $=C3-D3$ und die zweite Druckveränderung in D4 mit $=5886*C3/(\$C$3*100)$. Die Dollarzeichen bei \$C\$3 sorgen dafür, dass hier stets p_0 eingesetzt wird, während bei dem einfachen C3 die Nummerierung später an die jeweilige Zeilenummer angepasst wird. Schließlich werden die Zellen C4 und D4 markiert und die übrige Rechnung wie gewohnt ausgeführt.

	A	B	C	D
1	Höhe über NN in km		Druck	
2	von	bis	p in hPa	Δp in hPa
3	0	0,5	1000	58,86
4	0,5	1	941,14	55,42
5	1	1,5	885,72	52,16
6	1,5	2	833,56	49,09
7	2	2,5	784,47	46,2

6 Statischer Auftrieb und Ballonfahrten

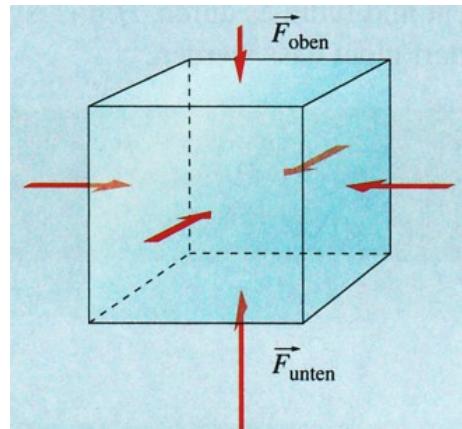


Experimente:

- 1** Tauche eine leere Sprudelflasche kopfüber mit der Öffnung knapp unter Wasser. Umschließe die Flasche mit beiden Händen und warte ab. Erkläre deine Beobachtungen. Am besten geht das Experiment bei kalter Luft und warmen Händen.
- 2** Heize die Luft im Innern eines Ballonmodells aus unbrennbarer Kuststofffolie (siehe Abb.) mit einem geeigneten Brenner auf und lass den Ballon los, wenn ein Zug nach oben zu spüren ist. Erkläre deine Beobachtungen.
- 3** Bringe zwei Körper mit deutlich unterschiedlichem Volumen in Luft an einer Waage ins Gleichgewicht (siehe Abbildung), stelle die Anordnung anschließend unter einen Rezipienten (Glasglocke) und evakuiere ihn. Was beobachtet man im Vakuum? Erkläre die Veränderung.

Aufgaben:

- 1** Die nebenstehende Abbildung soll einen Styropor-Würfel mit 1 m Kantenlänge darstellen. Im letzten Kapitel haben wir erfahren, dass der Luftdruck nach oben zwischen 0 und 2000 m um durchschnittlich 11 Pa/m abnimmt. Bei geringen Höhen beträgt der Wert ca. 12 Pa/m. Berechne die Druckkraft auf die Unterseite des Würfels, wenn dort ein Luftdruck von 1000 hPa herrscht. Berechne auch die Druckkraft, die gleichzeitig auf die Oberseite des Würfels wirkt.
- 2** Was lässt sich über die Druckkräfte auf die Seitenflächen aussagen?
- 3** Styropor hat eine Dichte von 30 g/dm^3 . Berechne die Masse und die Gewichtskraft des Würfels bei einem Ortsfaktor von $9,81 \text{ N/kg}$.
- 4** Welche Kraft würde man messen, wenn man den Styropor-Würfel an einen Kraftmesser hängt?
- 5** Führe die gleichen Rechnungen für einen Würfel mit 2 bzw. 5 m Kantenlänge durch.



- 6** Präzise Gewichtsmessungen kleiner Mengen werden im Vakuum durchgeführt. Warum treibt man diesen Aufwand?
- 7** In Flüssigkeiten gilt das archimedische Prinzip: *Der Auftrieb ist gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit*. Luft hat bei den genannten Bedingungen eine Dichte von ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$ (abhängig von der Temperatur). Berechne den Auftrieb nach dem archimedischen Prinzip. Kann man dieses Prinzip ohne Einschränkung auf Gase übertragen?

Auftrieb in Luft

In Luft gilt das Prinzip des Archimedes nur näherungsweise, da die Dichte der Luft nicht konstant ist. Bei den üblichen Körpermaßen macht sich die Dichteveränderung aber kaum bemerkbar, sodass man näherungsweise wie bei einer Flüssigkeit rechnen kann. Bei einem Ballon von 10 m Durchmesser muss man aber schon mit einem geringfügigen Fehler rechnen, da sich die Dichte zwischen oberem und unterem Ende des Ballons um ca. 1 Promille ändert. Wir rechnen für den Auftrieb also mit:

$$F_A \approx \varrho_L \cdot V \cdot g$$

Hinweis: Die Gas- oder Luftfüllung **im Ballon** gehört zur Masse des Ballons.

- 8** Ein Heißluftballon hat ein Volumen von 2500 m^3 und startet bei einer Außentemperatur von 20° C . Die Dichte der Luft beträgt bei dieser Temperatur $1,2 \text{ kg/m}^3$. Vor dem Start wird die Luft im Innern auf ca. 100° C aufgeheizt. Bei dieser Temperatur hat die Luft eine Dichte von $0,944 \text{ kg/m}^3$. Berechne die Masse der kalten und der warmen Luft im Balloninnern. Welche Gesamtmasse (Ballonhülle + Korb + Ausrüstung + Insassen) kann der Heißluftballon höchstens tragen? Begründe deine Antwort.
- 9** Führe die gleichen Rechnungen für eine Außentemperatur von 0° C und 89° C durch. Die Luftpichten betragen in diesem Fall $1,29 \text{ kg/m}^3$ bzw. $1,00 \text{ kg/m}^3$. Vergleiche das Ergebnis mit dem aus Aufgabe 8. Welche Schlüsse lassen sich daraus ziehen?
- 10** Welche Tageszeiten sind für Heißluftballonfahrten günstiger?
- 11** Ein Heißluftballon wird in 100 m Höhe bei einer Temperaturdifferenz von 80° C gerade in der Schwebefestigkeit gehalten. Reichen bei einer Höhe von 500 m und gleicher Außentemperatur auch 80° C aus?
- 12** Anstelle heißer Luft verwendet man als Gas im Innern eines Ballons häufig auch Helium. Die Dichten von Helium und Luft bei 0° C betragen $0,178 \text{ kg/m}^3$ bzw. $1,29 \text{ kg/m}^3$. Berechne, welche Gesamtmasse ein Heliumballon mit einem Volumen von 1000 m^3 tragen kann.
- 13** Berechne das Volumen eines Heliumballons, der die gleiche Gesamtmasse wie der Heißluftballon aus Aufgabe 9 tragen kann.

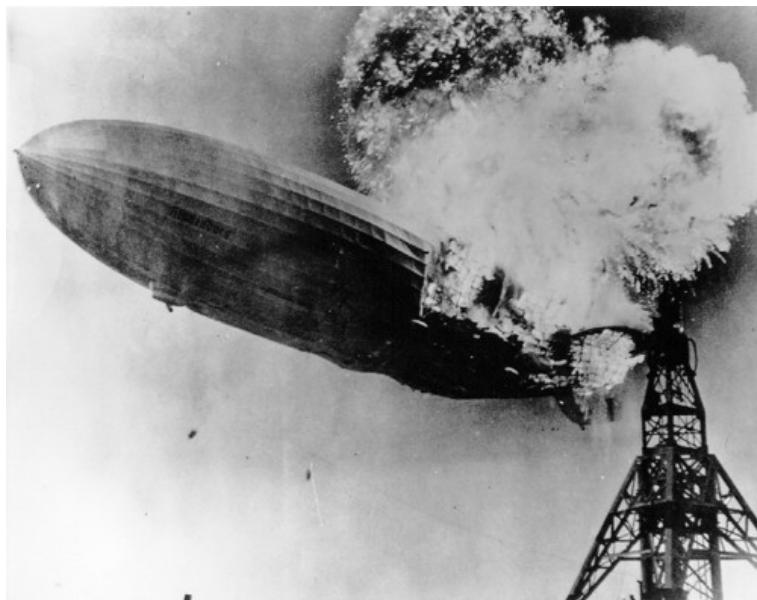
- 14** Das größte je gebaute Luftschiff „Hindenburg“ besaß ein maximales Gasvolumen von $200\,000 \text{ m}^3$ und ein Leergewicht von 118 t. Es war mit Wasserstoffgas gefüllt. Die Dichten von Luft und Wasserstoff betragen $1,29 \text{ kg/m}^3$ bzw. $0,09 \text{ m}^3$ (bei 0°C). Berechne, welche zusätzliche Last das Luftschiff aufnehmen konnte.

Hinweis: Es konnte maximal 88 000 l Dieselkraftstoff mitgeführt werden. Außerdem benötigte man zum Navigieren Wasserballast. Die Wassertanks fassten 40 000 l. Wie viel Nutzlast konnte geladen werden, wenn die Treibstoff- und Wassertanks vollständig gefüllt waren? Wozu benötigte man Wasserballast?

Tragische Unglücke: Das Ende der Luftschifffahrt

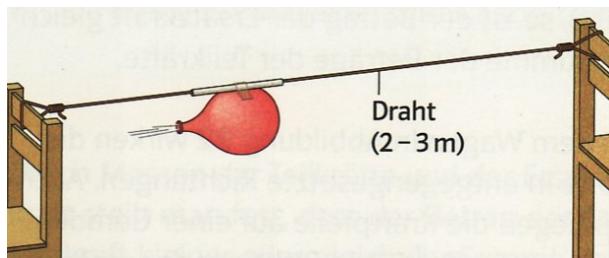
Zwischen 1900 und 1937 war in Deutschland die Zeit der Luftschiffe des Grafen Zeppelin. Es gab noch keine geräumigen Flugzeuge für den Passagiertransport und die Luftschiffe waren deutlich schneller als Seeschiffe. Deshalb entwickelten sich die Luftschiffe zu einem beliebten Beförderungsmittel für Fernreisen. Im Jahre 1929 gelang mit dem Luftschiff LZ 127 „Graf Zeppelin“ die erste Erdumrundung in 298 Flugstunden. 1936 wurde das größte Luftschiff aller Zeiten, die „Hindenburg“ in Betrieb genommen. Es war 245 m lang und hatte einen Durchmesser von 41 m, vier Motoren mit je 1050 PS Leistung und eine Reisegeschwindigkeit von 125 km/h. Für die Fahrt von Frankfurt nach New York benötigte es 60 Stunden. Der Fahrpreis betrug c.a. 1000 Reichsmark. Dafür wurde den Reisenden Hotelkomfort geboten, ähnlich wie auf einem Luxusdampfer unserer Tage.

Am 6. Mai 1937 kam es dann auf dem Landeplatz Lakehurst südlich von New York zur Katastrophe. Beim Landen fing das Heck aus immer noch unklaren Gründen plötzlich Feuer. Da zu jener Zeit noch nicht ausreichend Helium zur Verfügung stand, waren die Luftschiffe mit dem leicht brennbaren Wasserstoffgas gefüllt. Die Folge war, dass das Luftschiff in wenigen Sekunden völlig ausbrannte (siehe Filmdokument „hindenburg.flv“ auf der CD). Wie durch ein Wunder kamen von den 96 Personen an Bord noch 61 mit dem Leben davon. Die anderen starben im Flammeninferno. Diese Katastrophe bedeutete das Ende der Luftschifffahrt weltweit.

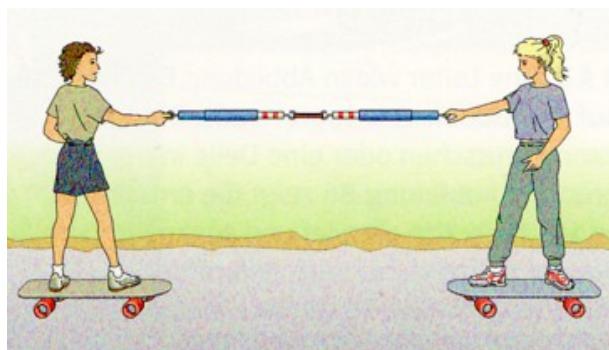


7 Dynamischer Auftrieb und Kräfte beim Flugzeug

7.1 Reaktionsprinzip und dynamischer Auftrieb



Experimente:



1 Fädel einen dünnen Draht durch einen Trinkhalm und spanne den Draht zwischen zwei Stühlen. Blase einen Luftballon auf, halte die Öffnung zu und klebe ihn mit einem Klebestreifen an den Trinkhalm. Lass den Ballon los und beobachte was passiert.

2 Befestige ein flexibles Plastikrohr mit Klebestreifen wie im zweiten Bild dargestellt auf zwei Wagen und blase mit einem Fön von der Seite Luft ins Rohr. Beobachte die Bewegung der Wagen. Was lässt sich über die Kräfte aussagen, die auf die Luft und den Wagen wirken?

3 Zwei Personen stehen einander auf zwei Skateboards gegenüber. Sie halten ein gespanntes Seil mit Kraftmessern zwischen sich. Zunächst soll nur eine von beiden ziehen, die andere nur festhalten. Was beobachtet man am Kraftmesser?

Das Reaktionsprinzip

Wirkt ein Körper A auf einen Körper B mit der Kraft \vec{F}_1 , so wirkt B auf A mit einer Kraft \vec{F}_2 und es gilt

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

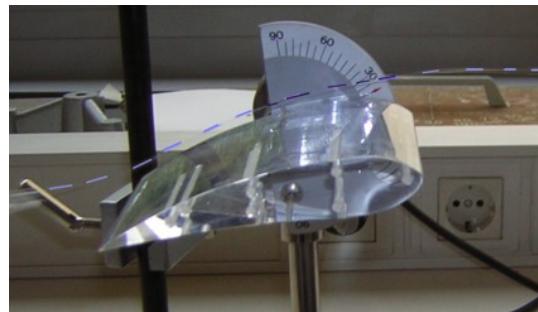
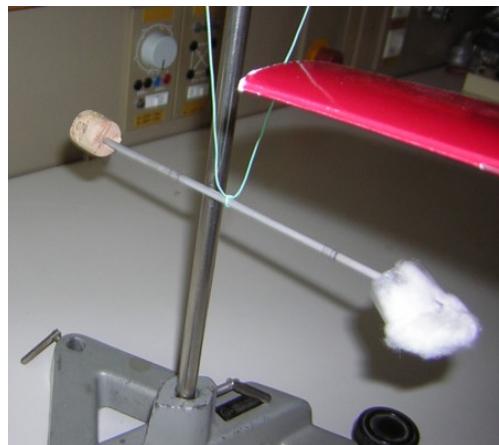
Die beiden Kräfte sind dem Betrage nach gleich, aber entgegengesetzt gerichtet. Man darf dies nicht mit dem Gleichgewicht zweier Kräfte verwechseln. Da gilt auch $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, aber beide Kräfte wirken auf den selben Körper.

Aufgaben:

- 1 Suche und beschreibe weitere Beispiele für die Anwendung des Reaktionsprinzips.
- 2 Auch beim Gehen spielt das Reaktionsprinzip eine grundlegende Rolle. Erörtere sie.

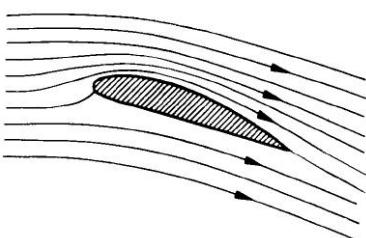
Experimente:

- 4 Ein Wattebausch ist am Ende eines dünnen Aluminium- oder Holzstabes angebracht. Am anderen Ende befindet sich ein Stückchen Kork als Gegengewicht. Der Stab wird so aufgehängt, dass er im Gleichgewicht ist. Ziehe ein Heft, wie in der Abbildung dargestellt, zügig über den Wattebausch hinweg und beobachte seine Bewegung.
- 5 Ein Tragflächenprofil wird leicht schräg angestellt in den Luftstrom eines Winderzeugers gebracht. Ein Plastiklamettafaden, der in den Luftstrom gehalten wird, zeigt den Strömungsverlauf an. Beobachte und beschreibe, wie die Luft abgelenkt wird. Welche Folgerungen ergeben sich daraus für die Tragfläche?



GRUNDLAGEN: Dynamischer Auftrieb I

Wenn ein Flugzeug sich bewegt, strömt die Luft an der Tragfläche vorbei. Zum Zwecke der Untersuchung verwendet man allerdings häufig unbewegte Tragflächenmodelle, die sich im Luftstrom eines Winderzeugers befinden. Für die Wirkungen ist es egal, ob sich die Luft bewegt oder die Tragfläche. Die schräg angestellte Tragfläche hat die Aufgabe den Luftstrom umzulenken. Dies erkennt man in den Experimenten daran, dass der Wattebausch im Versuch 4 nach unten gezogen wird, wenn ihn das Heft passiert hat. Noch deutlicher sieht man es am Lamettafaden, der zeigt, dass sich der Luftstrom dem Tragflächenprofil anschmiegt und so nach unten geht. Die Tragfläche übt also auf den Luftstrom eine Kraft nach unten aus (s. Abb.).



Als Reaktion übt die Luft eine Kraft auf die Tragfläche nach oben aus. Man bezeichnet diese Kraft als **dynamischen Auftrieb**, da sie anders als der statische Auftrieb nur auftritt, wenn ein hinreichend schneller Luftstrom an der Tragfläche vorbeiströmt.

Aufgabe:

- 3 Das nebenstehende Stromlinienbild ist mit einer langsam fließenden Flüssigkeit in einem Strömungskanal gemacht worden. Erkläre, warum es bei einem solchen Strömungsverlauf praktisch keinen Auftrieb geben kann.



Experimente:

- 6 Halte das Startgerät der Hubschraube so, dass die Drehachse senkrecht ist, und ziehe kräftig an dem weißen Zahnriemen (bzw. bei anderen Geräten an der Schnur), sodass die Luftschaube schnell rotiert. Beobachte die Wirkung und erkläre sie mit dem dynamischen Auftrieb. Achte insbesondere darauf, wie die Rotorblätter schräg gestellt sind und wie sich der Rotor dreht.

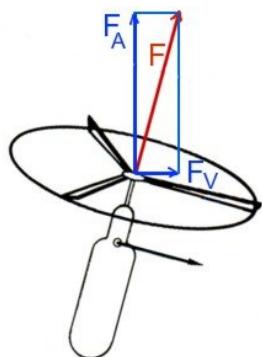


- 7 Halte das Startgerät der Hubschraube so, dass die Drehachse gegenüber der Vertikalen leicht geneigt ist (siehe Abbildung) und ziehe kräftig an dem weißen Zahnriemen (bzw. bei anderen Geräten an der Schnur), sodass die Luftschaube schnell rotiert. Beobachte, was sich jetzt an der Bewegung der Schraube ändert und erkläre dies (wenn möglich mit einem Kräftebild). Probiere verschiedene Kippwinkel aus.



GRUNDLAGEN: Auftrieb an der Hubschraube

Die Hubschraube ist im Prinzip nichts anderes als eine Kombination von mehreren Tragflächen (im Bild oben von drei Tragflächen). Die Rotorblätter sind aber nicht fest am Flugzeug angebracht, sondern drehen sich mit großer Geschwindigkeit um eine senkrechte Achse. Auf diese Weise wird erreicht, dass auch ohne Eigenbewegung des gesamten Fluggerätes ein Luftstrom an der Tragfläche vorbeiströmt, wobei die Luft nach unten ablenkt und so ein Auftrieb erzeugt wird.

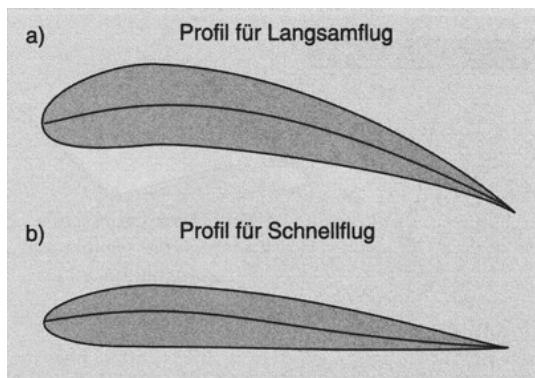


Ist die Drehachse der Hubschraube schräg orientiert, so wird die Luft nicht nach unten, sondern in Richtung der Drehachse abgelenkt. Die Reaktionskraft wirkt entgegengesetzt, also nun schräg nach oben (roter Pfeil). Sie kann in zwei Komponenten zerlegt werden, eine vertikale Auftriebskomponente F_A und eine horizontale Vortriebskomponente F_V . Die Hubschraube steigt nun nicht nur, sondern bewegt sich auch voran. Auf ähnliche Weise kann ein Hubschrauber sowohl steigen, als auch bei gleich bleibender Höhe vorwärts fliegen.

Aufgabe:

- 4 Kann ein Hubschrauber auch rückwärts fliegen?

7.2 Druckverhältnisse an gekrümmten Flächen



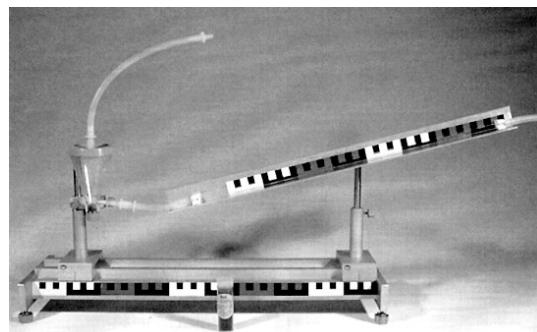
Tragflächen sind im Allgemeinen keine flachen Bretter, obwohl auch diese einen Auftrieb erzeugen würden, sondern haben spezielle Formen, die der beabsichtigten Nutzung des Flugzeugs angepasst werden. Langsam fliegende Flugzeuge haben stark gewölbte Formen (siehe (a) in der Abbildung), während schnell fliegende Flugzeuge eher stromlinienförmige Profile aufweisen (siehe (b) in der Abbildung).

Die Gründe für die optimierten Formgebungen erkennt man bei einer genaueren Untersuchung des Strömungsverlaufs. Zu diesem Zweck macht man durch verschiedene Verfahren **Stromlinien** sichtbar. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung leichter Fäden, hier in der Schule durch Plastiklamettafäden. In professionellen Strömungslabors mit Windkanal verwendet man dazu auch Rauch, der in den Luftstrom eingeblasen wird.

Da wir vom statischen Auftrieb wissen, dass die Druckverhältnisse ober- und unterhalb des Körpers, der einen Auftrieb erfährt, entscheidend sind, interessiert man sich auch für den Luftdruck an der Tragfläche. Man misst ihn mit geeigneten Drucksonden und einem Schrägrohrmanometer.

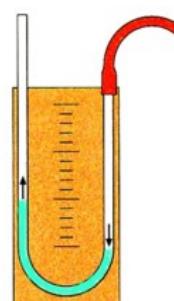
Experimente:

- Baue das Schrägrohrmanometer der Abbildung entsprechend auf und befülle es mit gefärbtem Wasser. Der Steigungswinkel sollte etwa 20° betragen und das Flüssigkeitsniveau im Manometerrohr etwa in der Mitte der Skala stehen. Im Vorratsgefäß muss über dem Wasser noch ein ausreichender Luftraum vorhanden sein.



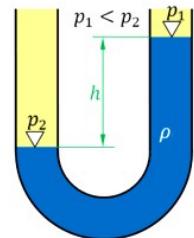
Der Deckel des Vorratsgefäßes wird geschlossen und ein kurzer Schlauch aufgesteckt. Halte das offene Ende des Schlauches mit dem Finger zu und drücke den Schlauch mehrmals zusammen. Beobachte dabei das Wasser im Manometerrohr. Blase vorsichtig in das offene Schlauchende und beobachte die Manometerflüssigkeit.

- Führe die gleichen Experimente mit einem U-Rohr-Manometer (siehe nebenstehende Abbildung) durch und beschreibe die Unterschiede. Welche Vorteile hat das Schrägrohrmanometer?



GRUNDLAGEN: U-Rohr- und Schrägrohrmanometer

Das Schrägrohrmanometer ist wie das bekanntere U-Rohr-Manometer ein Flüssigkeitsmanometer. Der Druck wird beim U-Rohr-Manometer gemessen, indem man den Niveau-Unterschied h der Flüssigkeitssäulen in den beiden Schenkeln eines U-Rohrs misst und entsprechend der Formel $p = \rho gh$ den Druck berechnet. Manchmal gibt man ihn auch einfach in mm WS (Millimeter Wassersäule) an.

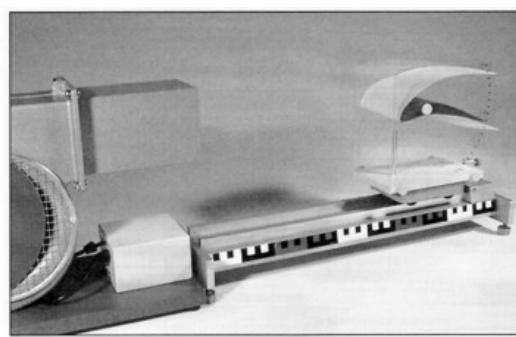
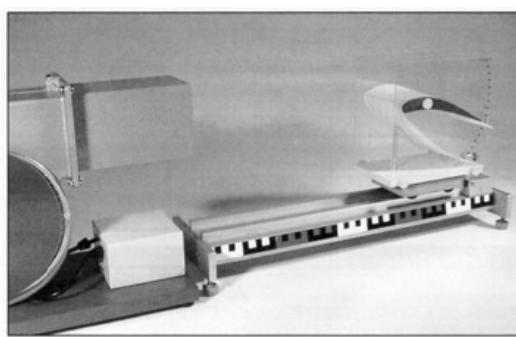


Beim Schrägrohrmanometer tritt an die Stelle des einen Schenkels das Vorratsgefäß und an die Stelle des anderen Schenkels das Schrägrohr. Auch hier ist der gemessene Druck durch den Niveau-Unterschied im Vorratsgefäß und im Steigrohr bestimmt. Durch den geringen Neigungswinkel erhält man aber für den gleichen Druck eine erheblich längere Wegstrecke im Anzeigerohr. Bei einem Neigungswinkel von $19,5^\circ$ ist die Empfindlichkeit dreimal so groß wie bei einem U-Rohr-Manometer, weil der Weg dreimal so lang ist. Auf diese Weise können kleinere Druckdifferenzen sichtbar gemacht werden.

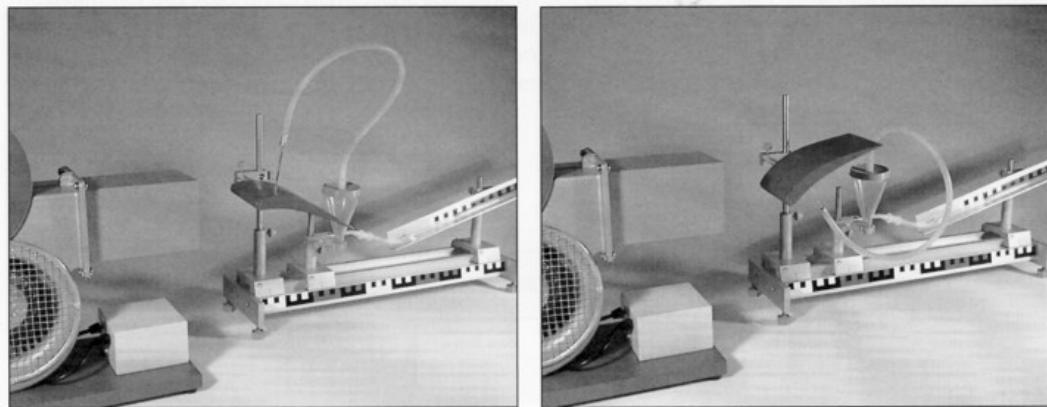
Gemessen werden Druckdifferenzen zum Umgebungs-Luftdruck, wenn das obere Ende des Steigrohres offen ist, d.h. mit der Umgebungsluft verbunden ist. Dies ist die übliche Verwendungsweise. Auf weitere Möglichkeiten gehen wir später ein.

Experimente:

- 3** Baue den in der nebenstehenden Abbildung dargestellten Versuch auf und untersuche damit die Druckverhältnisse an einer von Luft umströmten Styropor-Halbkugel. Die Halbkugel enthält drei Messstellen: Vordeseite, Scheitelpunkt und Rückseite. Wo findet man Über- bzw. Unterdruck?



- 4** Baue den in der obigen Abbildung dargestellten Versuch auf und hänge über das Tragflächenprofil ein passendes Stück Papier (linke Abbildung). Beobachte die Veränderungen beim Einschalten der Windmaschine (rechte Abbildung). Was lässt sich daraus über die Druckverhältnisse an der Tragfläche erschließen?

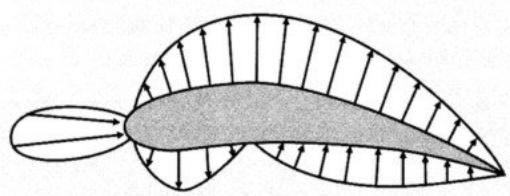


- 5** In diesem Versuch wird an Stelle des Papiers eine Drucksonde verwendet, die von unten oder von oben in die Bohrungen des Tragflächenprofils gesteckt und auf der anderen Seite mit dem Manometer verbunden wird. Auf diese Weise kann für verschiedene Anstellwinkel (siehe Winkelskala) der Unter- oder Überdruck gemessen werden. Skizziere eine Tragfläche mit einem entsprechenden Anstellwinkel und stelle die Größe des Druckes durch einen Pfeil senkrecht zur Oberfläche des Profils an der jeweiligen Messstelle dar. Die Länge des Pfeiles gibt den Druck an. Bei Unterdruck weist der Pfeil von der Oberfläche weg, bei Überdruck auf die Oberfläche zu.

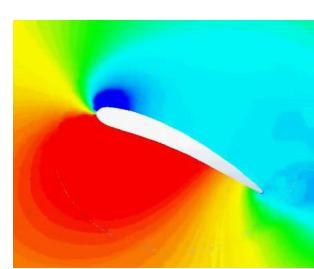
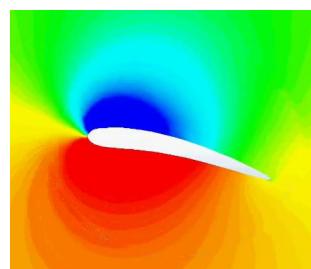
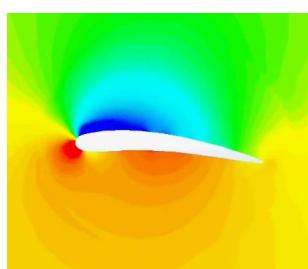
GRUNDLAGEN: Druckverhältnisse an gekrümmten Flächen

Beim Umströmen gekrümmter Flächen verändert sich im Luftstrom der Luftdruck. Bei der Halbkugel herrscht auf der Vorderseite ein leichter Überdruck, weil sich dort die Luft etwas staut, während am Scheitelpunkt ein Unterdruck festzustellen ist. Auf der Rückseite findet man fast wieder Normaldruck oder ganz schwachen Unterdruck. Der Lamettafaden zeigt deutlich den nach unten gekrümmten Stromlinienverlauf, den wir schon vom Experiment 5 des vorigen Abschnitts kennen.

Bei einem Tragflächenprofil findet man relativ komplizierte Druckverhältnisse. Auf der Oberseite herrscht mehr oder weniger starker Unterdruck, während auf der Unterseite überwiegend Überdruck herrscht. Je nach Anstellwinkel kann es aber auch Bereiche mit leichtem Unterdruck geben (siehe Abbildung).



Vor der Tragfläche herrscht ein Überdruck, da dort die Luft aufgestaut wird. Die folgenden Bilder zeigen die Druckverhältnisse für verschiedene Anstellwinkel. Die Farben grün bis blau kennzeichnen Gebiete mit Unterdruck, während gelb bis rot Überdruck anzeigen. Je roter oder blauer die Farbe ist, desto größer ist die Abweichung vom Umgebungsluftdruck.

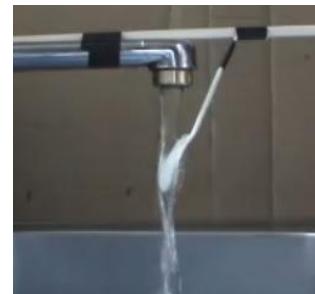


7.3 Der Coanda-Effekt und das Euler'sche Prinzip

Um zu verstehen, wie die Unter- und Überdruckbereiche entstehen, müssen wir nun die Strömungsverhältnisse genauer betrachten. Schon in den vorigen Abschnitten haben wir gesehen, dass sich die Luftströmung bis zu einem gewissen Grade der gekrümmten Fläche, an der sie entlang strömt, anschmiegt und dadurch eine Richtungsänderung erfährt. Wir werden hierfür noch weitere Beispiele kennenlernen.

Experimente:

- 1 Ein Plastiklöffel wird beweglich an einem Wasserhahn aufgehängt, sodass er frei schwingen kann (siehe Abbildung). Dann dreht man den Wasserhahn auf, sodass ein kräftiger Strahl austritt, und drückt den Löffel mit der gewölbten Seite in den Strahl. Beschreibe die Beobachtungen.



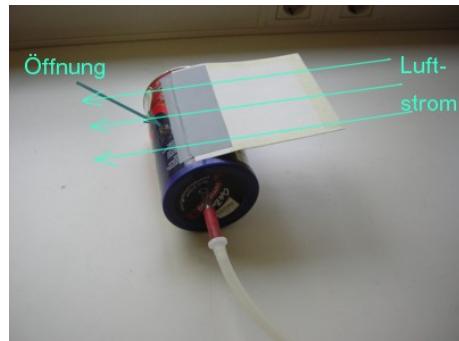
- 2 Halte ein Becherglas quer in einen kräftigen Wasserstrahl, sodass das Wasser nur auf einer Seite des Glases entlangströmt (siehe Abbildung). Beobachte den Strömungsverlauf auf der Unterseite und beschreibe ihn mit Wort und Bild.

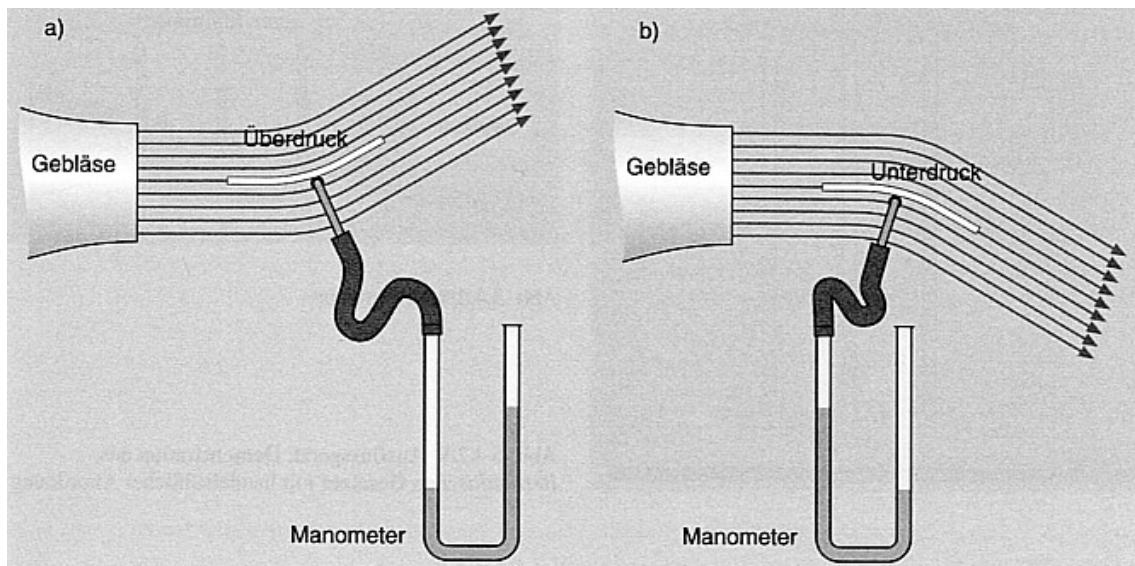


- 3 Stelle eine Kerze hinter einen Glaszyylinder (hohes Becherglas, Flasche o. Ä.) und blase auf einer Seite am Zylinder so vorbei, dass sich die Flamme im Windschatten des Zylinders befindet. Beobachte und beschreibe die Wirkung. Welche Schlüsse kann man daraus ziehen?



- 4 Blase einen kräftigen Luftstrom (z. B. aus einem Staubsauger) über einen speziell präparierten Zylinder mit ange setzter Führungsfläche (siehe Abbildung). Auf der Windschattenseite befindet sich eine Öffnung, die durch das Innere des Zylinders mit einem Schlauchansatz verbunden ist, an den das Schrägrohrmanometer angeschlossen wird. Beobachte die Druckveränderung beim Einschalten des Luftstroms.



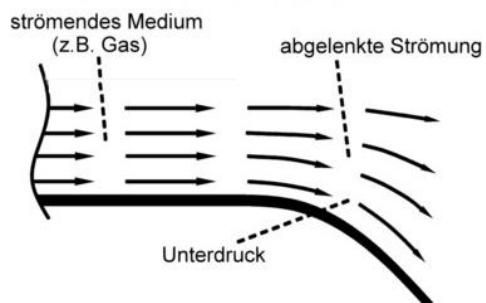


- 5** Klebe in die Mitte eines Stückes biegsamer Pappe einen Trinkhalm und verbinde ihn mit dem Schrägrohrmanometer. Halte jetzt die Pappe wie im obigen Bild dargestellt in den Luftstrom (volle Stärke) und verbiege sie. Beobachte dabei das Manometer.

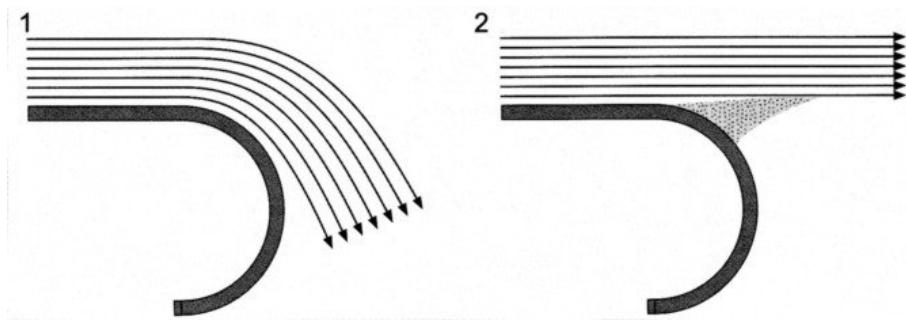
GRUNDLAGEN: Der Coanda-Effekt

Gas- und Flüssigkeitsströmungen folgen unter bestimmten Umständen in der näheren Umgebung eines Hindernisses der geometrischen Form des Hindernisses. Dies tritt nur ein, wenn die Richtungsänderungen nicht zu abrupt sind, und dann auch nur bis zu einem gewissen Grade. Irgendwann löst sich die Strömung wieder von dem Körper: Sie reißt ab. Dieses Verhalten bezeichnet man als **Coanda-Effekt** nach dem rumänischen Flugzeugbauer Henri Coandă, der dieses Verhalten erstmals genauer beschrieben hat, ohne es allerdings zu erklären.

Einen wichtigen Hinweis auf seine Deutung finden wir durch den Versuch 4, der zeigt, dass im Windschatten des Hindernisses ein Unterdruck herrscht. Durch den Druckunterschied wird die Luft in den Bereich niedrigen Druckes gesaugt, also abgelenkt, wie im nebenstehenden Bild dargestellt. Dadurch gelangt z. B. der Luftstrom zu der brennenden Kerze und löscht sie aus.

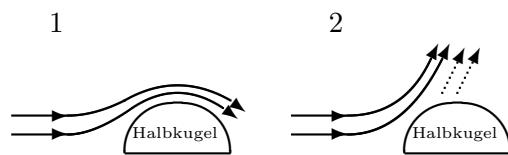


Zur Erklärung dieses Effekts betrachten wir die folgenden zwei Bilder. Bild 1 zeigt den bereits bekannten Strömungsverlauf und Bild 2 einen vorgestellten Strömungsverlauf zu Beginn des Vorganges. Zunächst strömt die Luft also geradeaus, wie man es erwarten würde. Da es aber zwischen den Luftsichten Reibung gibt, wird Luft aus dem grau schraffierten Bereich mitgerissen. Jeder hat schon mal die Erfahrung gemacht, dass er einen kräftigen Luftzug verspürt, wenn er am Straßenrand steht und ein LKW vorbeifährt. Die Luft wird so stark mitgerissen, dass man es auch in einiger Entfernung noch spürt.

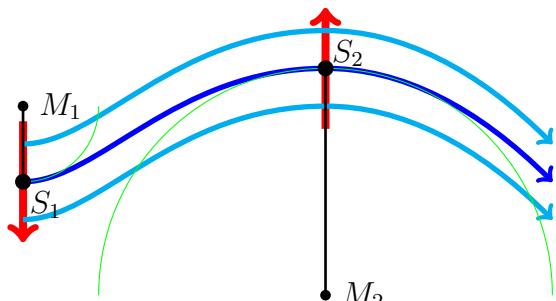


Durch diesen Mitnahmeeffekt entsteht ein Unterdruck im Windschatten des Hindernisses und damit eine Kraft auf die Luft, die zur Ablenkung führt. Die Luft bewegt sich jetzt auf einer gekrümmten Bahn. Ebenfalls aus Erfahrung wissen wir, dass man beim Kurvenfahren eine Zentrifugalkraft spürt, denn alle Körper haben eigentlich die Tendenz sich geradeaus zu bewegen (Trägheit). Durch diese Zentrifugalkraft bleibt die Druckminderung im Windschatten auch weiterhin erhalten, sodass sich eine stabile gekrümmte Strömung einstellt.

Dieses Prinzip lässt sich auch auf andere gekrümmte Flächen übertragen, die ebenfalls die Wirkung haben den Luftstrom nach unten abzulenken, wie z. B. unser Halbkugel-Beispiel oder das Tragflächenprofil (siehe Abbildung).



GRUNDLAGEN: Das Prinzip von Euler



Druckdifferenzen quer zur Stromlinie

Leonard Euler war einer der ersten, der Strömungen unter idealisierten Bedingungen berechnete. Insbesondere fand er heraus, dass der Druck sich quer zu gekrümmten Stromlinien verändert. Dies ist in der nebenstehenden Abbildung dargestellt. Das Krümmungsverhalten der Stromlinien an einer bestimmten Stelle beschreibt man durch Kreisbögen, die der Kurve an dieser Stelle optimal angepasst werden (siehe grüne Bögen in der Zeichnung für S_1 und S_2). Die Kreismittelpunkte nennt man dann Krümmungsmittelpunkte.

Die roten Pfeile zeigen für zwei Punkte S_1 und S_2 der mittleren Stromlinie die Richtung an, in der der Druck ansteigt. Auf der Seite der Krümmungsmittelpunkte ist der Druck also niedriger als auf der Außenseite der Kurve. Wie bereits oben erläutert, hängt dies damit zusammen, dass das strömende Medium beim Durchlaufen der Kurve von der Zentrifugalkraft nach außen gezogen wird (vom Krümmungsmittelpunkt weg). Dadurch sinkt auf der Innenseite der Kurve der Druck so lange ab, bis ein stabiler Zustand erreicht wird, in dem die aus dem Unterdruck resultierende Kraft zum Krümmungsmittelpunkt hin die Zentrifugalkraft kompensiert. Man kann dies vergleichen mit einer Kugel, die an einem Gummiband befestigt auf einer Kreisbahn umläuft. Das Gummiband wird dabei so weit gedehnt, bis die rückziehende Kraft (Zentripetalkraft) die Zentrifugalkraft kompensiert.

Wenn wir davon ausgehen, dass in dem obigen Bild am oberen Rand der Umgebungsluftdruck herrscht, dann steigt auf der linken Seite in dem Bereich, in dem die Stromlinien nach links gekrümmmt sind, der Druck nach unten hin an. Dort haben wir also einen Überdruck. In dem Bereich der Rechtskrümmung sinkt der Druck auf einem Weg von oben nach unten jedoch ab. Gegenüber dem Umgebungsluftdruck haben wir dort demnach einen Unterdruck. Dies entspricht genau den im Experiment festgestellten Druckverhältnissen.

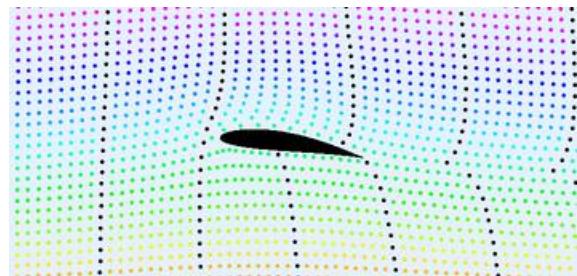
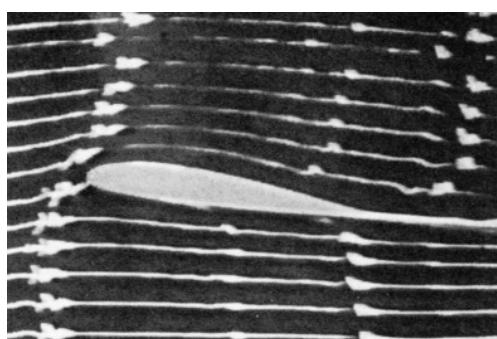
Aufgaben:

- 1** Erläutere mit Worten und einer geeigneten Skizze, warum sich an einer Tragfläche der Luftstrom dem Profil anschmiegt und so nach unten abgelenkt wird. Gehe dabei auch auf die Druckverhältnisse ein.
- 2** Erläutere ebenso, warum dieser Effekt auch bei einer schräg angestellten Platte (ohne Wölbung) auftritt (allerdings mit einem geringeren Auftrieb). Die Wölbung ist also nicht entscheidend für den Auftrieb, sondern dient nur der Optimierung.

7.4 Strömungsgeschwindigkeit an der Tragfläche

Beobachtungen und Experimente:

Da die direkte Beobachtung der Geschwindigkeit mit schulischen Mitteln schwierig ist, ziehen wir Bilder und Simulationen zu Rate. Das linke Bild ist die Momentaufnahme eines Stromlinienbildes, das mit Hilfe von Rauch erzeugt wurde. Dabei wurden kurze Rauchimpulse gegeben, die durch eine Verdickung der Stromlinien erkennbar sind. Die kräftigeren Rauchimpulse wurden für alle Stromlinien gleichzeitig gegeben. Im rechten Bild ist der gleiche Vorgang vom Computer berechnet worden. Die von oben nach unten laufenden dunklen Punktstreifen sind gleichzeitig links gestartet und entsprechen den stärkeren Rauchimpulsen im linken Bild.



- 1** Betrachte die beiden Bilder oben und erläutere, welche Rückschlüsse man daraus über die Geschwindigkeiten in der Strömung ziehen kann.
- 2** Betrachte die Simulation F2 auf der CD und kontrolliere die Strömungsgeschwindigkeit.

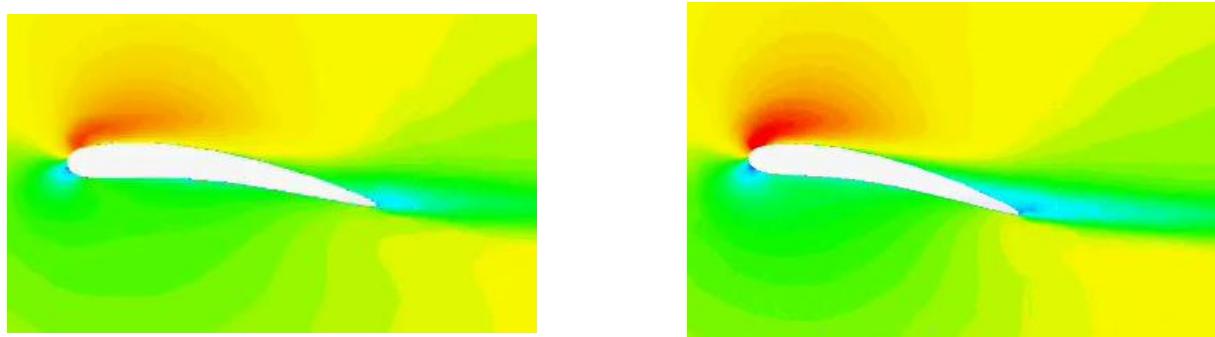
- 3** Halte das Flügelradanemometer³ in den Luftstrom der Windmaschine und miss die Geschwindigkeit. Nähere anschließend von unten ein Tragflächenprofil und miss wieder die Geschwindigkeit

Aufgabe:

- 1** Erkläre die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe der Kenntnisse über die Druckverhältnisse an der Tragfläche.

GRUNDLAGEN: Die Strömungsgeschwindigkeit an der Tragfläche

Da sich über der Tragfläche ein Unterdruckgebiet herausbildet, wird die Luft in dieses Gebiet hineingesaugt. Dies hat zur Folge, dass die Luft beschleunigt und ihre Strömungsgeschwindigkeit größer wird, wenn sie sich in dieses Gebiet hineinbewegt. Die Luft strömt deshalb auf der Oberseite der Tragfläche schneller als auf der Unterseite. Dies ist aber nicht die Ursache der Druckverminderung, wie man in manchen Büchern liest (s. u.), sondern deren Folge. Die folgenden Abbildungen stellen die Strömungsgeschwindigkeiten bei zwei unterschiedlichen Anstellwinkeln dar. Die roten Bereiche zeichnen sich durch Strömungsgeschwindigkeiten über der Fluggeschwindigkeit, die blauen durch Strömungsgeschwindigkeit unter der Fluggeschwindigkeit aus.



Das Ausweichen der Luft nach oben beginnt bereits in einem Abstand vor der Tragfläche, wie man in den Bildern und Simulationen sieht. Dabei strömt ein Teil der Luft, die bei einer Geradeausbewegung unterhalb der Tragfläche bleiben würde, oberhalb vorbei. Bei schnell fliegenden Flugzeugen, deren Geschwindigkeit knapp unter der Schallgeschwindigkeit liegt, kann diese Beschleunigung dazu führen, dass die Strömungsgeschwindigkeit über der Tragfläche die Schallgeschwindigkeit überschreitet, was sich sehr nachteilig auf das Flugverhalten auswirkt (s. u.).

- 2** Hinter der Tragfläche finden wir eine Zone (blau), in der die Geschwindigkeit des Fahrtwindes sehr niedrig ist (Windschatten). Erläutere, warum dies so ist.
- 3** Erläutere, warum die maximale Geschwindigkeit über der Tragfläche beim größeren Anstellwinkel (rechtes Bild) größer ist als beim kleineren Anstellwinkel.

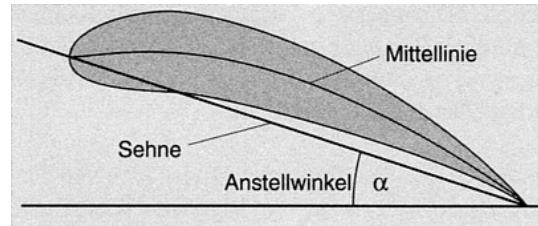
³Windgeschwindigkeitsmesser

7.5 Kräfte an der Tragfläche

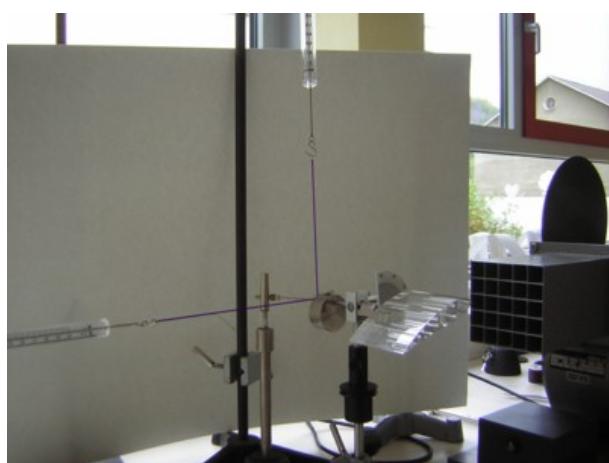
GRUNDLAGEN: Auftrieb und Luftwiderstand (I)

Die Tragfläche hat die Aufgabe einen dynamischen Auftrieb zu erzeugen. Aus dem Druckdiagramm auf Seite 72 kann man jedoch erkennen, dass die Gesamtkraft auf die Tragfläche auf relativ komplizierte Weise aus den Druckunterschieden entsteht. Da es auf der Vorder- und Unterseite der schräg angestellten Tragfläche einen Überdruck gibt, ist die Gesamtkraft schräg nach oben und hinten gerichtet. Man zerlegt sie allerdings gedanklich in zwei Komponenten: den Auftrieb senkrecht nach oben und den Luftwiderstand waagerecht nach hinten. Der Grund für diese Zerlegung ist einfach: Der Auftrieb muss die Gewichtskraft kompensieren, die senkrecht nach unten wirkt, der Luftwiderstand kompensiert den Vortrieb des Propellers, der in Flugrichtung wirkt.

Wie groß diese Komponenten im Verhältnis zueinander sind, hängt vor allem vom Anstellwinkel ab. Da dies für die Flugeigenschaften von großer Bedeutung ist, hat man spezielle Verfahren entwickelt, um diese Komponenten direkt zu messen. Für eine gleichzeitige Messung beider Komponenten verwendet man die so genannte **Zwei-Komponenten-Waage**.



Experiment



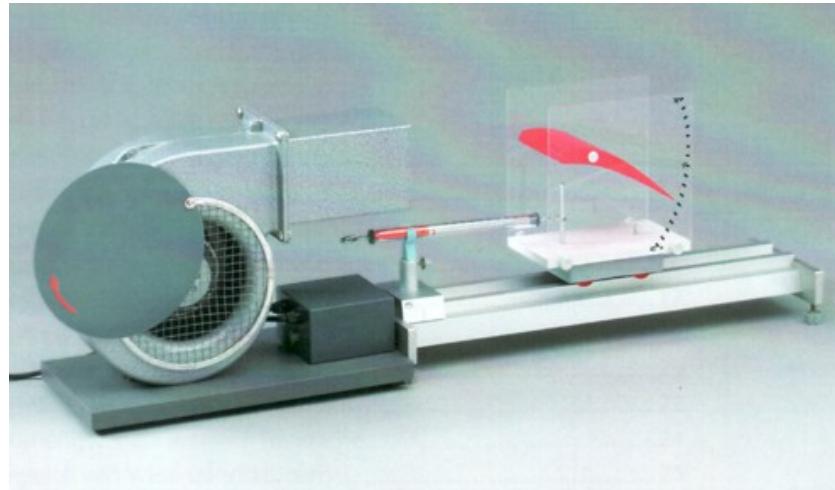
1 Zwei-Komponenten-Waage

Baue den nebenstehenden Versuch wie im Foto dargestellt auf. Die Waage besitzt eine kardanische Aufhängung. Sie ist um zwei Achsen frei drehbar. Auf einer Seite wird das Tragflächenprofil befestigt auf der anderen ein Gegengewicht, so dass der Waagebalken im Gleichgewicht ist. Am Ende des Balkens werden die Kraftmesser mit dünnen Drähten oder Fäden befestigt. Nach dem Einschalten des Luftstroms verändert die Waage ihre Lage.

Die Kraftmesser werden dann so nachgestellt, dass beim Waagebalken die Anfangsposition wieder eingenommen wird (Kompensationswaage). Erst jetzt kann man die Kräfte korrekt ablesen. Damit dies genau möglich ist, sollte eine Marke die genaue Position des Endes des Waagebalkens anzeigen (z. B. Spitze einer Nadel, s. Abb.). Der Anstellwinkel kann an der Winkelskala der Komponentenwaage abgelesen werden. Führe die Messung für verschiedene Anstellwinkel bei maximaler Leistung des Winderzeugers durch.

Anstellw. in °	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
F_A / N												
F_W / N												

Alternativexperiment



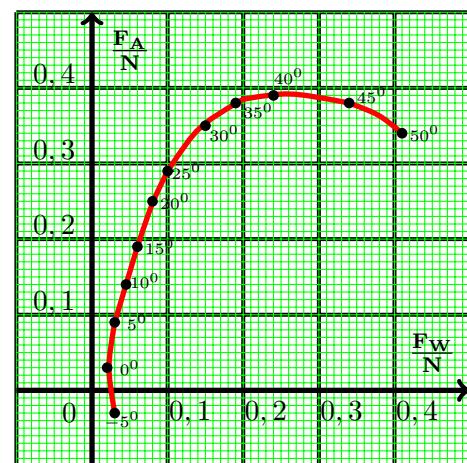
Anstelle der Zweikomponentenwaage kann man auch beide Komponenten einzeln mit dem oben dargestellten Aufbau messen. Das Tragflächenprofil kommt dabei auf einen Wagen, der auf einer Laufschiene beweglich ist. Der Kraftmesser misst hier den Luftwiderstand. Um den Auftrieb zu messen stellt man das Gestell auf eine elektronische Schnellwaage, die vor dem Einschalten des Luftstroms auf 0 abgeglichen wird. Man misst dann den Auftrieb als Gewichtsminderung (Vorsicht: Umrechnung in Newton nicht vergessen).

GRUNDLAGEN: Auftrieb und Luftwiderstand (II)

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine mögliche Messreihe für ein Experimentierprofil:

α in 0	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
F_A / N	-0,03	0,03	0,09	0,14	0,19	0,25	0,29	0,34	0,37	0,39	0,38	0,34
F_W / N	0,03	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,15	0,19	0,24	0,34	0,41

Das Ergebnis einer solchen Messung wird üblicherweise in einem so genannten **Polaridigramm** dargestellt. Auf der Rechtsachse wird dabei der Luftwiderstand und auf der Hochachse der Auftrieb abgetragen. Im nächsten Kapitel werden wir noch eine andere Art des Polardiagramms kennenlernen. Für unsere Messreihe ist das Polardiagramm in der nebenstehenden Abbildung dargestellt. Auffallend ist die starke Zunahme des Luftwiderstandes ab ca. 25^0 und die Abnahme des Auftriebs ab ca. 45^0 , für die wir noch eine Erklärung finden müssen.



Hinweis: Bei Polardiagrammen von großen Flugzeugtragflächen sieht die Kurve zwar ähnlich aus, jedoch wird das Maximum bereits bei deutlich kleineren Winkeln erreicht, im Allgemeinen unter 20^0 .

Experimente und Beobachtungen

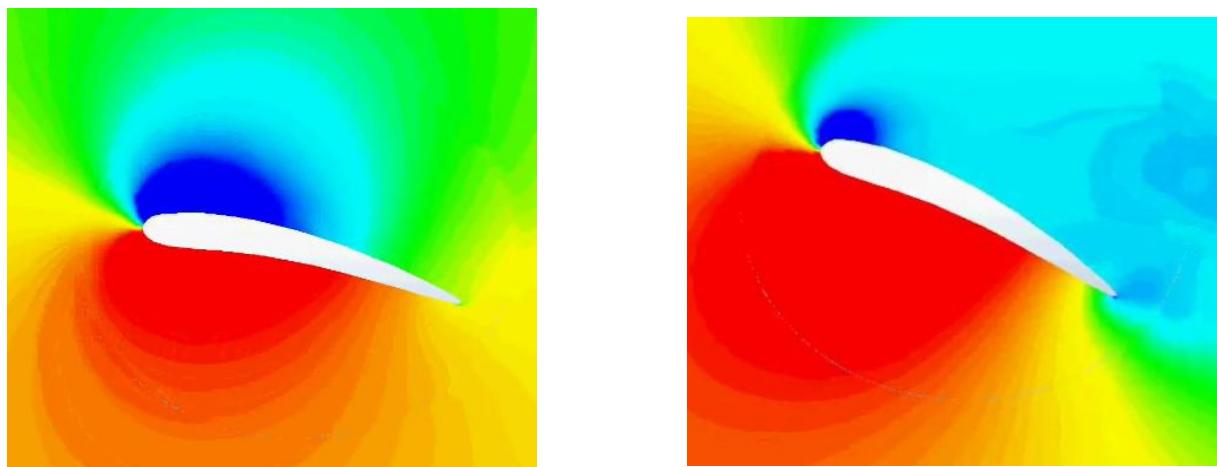
- 2 Baue ein Experiment wie in V5 auf Seite 68 auf und vergrößere den Anstellwinkel allmählich. Beobachte dabei den Lamettafaden und beschreibe den Strömungsverlauf. Wann verändert sich das Strömungsverhalten deutlich?
- 3 Schaue den Videofilm „rauchkanal1.flv“ (bzw. elektr. Arbeitsblatt F3) aufmerksam an. Beschreibe die Veränderungen im Strömungsverhalten bei zunehmendem Anstellwinkel mit Worten und Skizzen. Was könnte der Ausdruck „Strömungsabriss“ in diesem Kontext bedeuten? Versuche eine Erklärung dafür zu finden, warum der Auftrieb bei größeren Anstellwinkeln wieder abnimmt.
- 4 Führe Druckmessungen an der Tragflächenober- und -unterseite bei verschiedenen Anstellwinkeln aus.

GRUNDLAGEN: Strömungsabriss

Bei jeder Tragfläche gibt es einen kritischen Winkelbereich, in dem es zu einer deutlichen Veränderung des Strömungsverhaltens kommt. Der Luftstrom kann ab diesem Winkel nicht mehr dem Tragflächenprofil folgen, sondern löst sich frühzeitig ab und verwirbelt hinter der Tragfläche. Die folgenden Bilder 1 - 3 zeigen zunächst die anliegende Strömung, dann eine beginnende Ablösung und schließlich den völligen Strömungsabriss.



Die Druckverhältnisse kann man an den beiden folgenden Darstellungen ablesen (berechnete Darstellungen, nicht gemessene). Blau stellt wie bekannt Unterdruck dar und Rot Überdruck.



Die Zone mit ausgeprägtem Unterdruck ist bei einer steil angestellten Tragfläche bereits sehr klein. Im Wirbelbereich dahinter ist nur noch ein geringer Unterdruck vorhanden, der wenig zum Auftrieb beiträgt. Die Überdruckzone ist hingegen sehr ausgedehnt, erzeugt aber vor allem auch einen erheblichen Luftwiderstand und relativ wenig Auftrieb. Deshalb kommt es bei großen Anstellwinkeln zu einer deutlichen Verringerung des Auftriebs bei gleichzeitiger Vergrößerung des Luftwiderstands.

7.6 Formeln für Auftrieb und Luftwiderstand

GRUNDLAGEN: Formeln für Auftrieb und Luftwiderstand

Wie wir gesehen haben, ist der Auftrieb eine Reaktionskraft: Luft wird von den Tragflächen nach unten abgelenkt. Deshalb übt die Luft seinerseits eine Gegenkraft auf die Tragfläche nach oben aus. An einem einfachen Beispiel wollen wir uns verdeutlichen, wie man eine solche Reaktionskraft berechnet. Dazu stellen wir uns einen Wagen vor, der dadurch angetrieben wird, dass jemand fortlaufend kleine Sandsäcke nach hinten wirft. Nach dem Rückstoßprinzip gibt dies jetzt einen Vortrieb des Wagens. Wenn nun die Zahl der Säcke, die pro Minute hinausgeworfen werden, verdoppelt wird, verstärkt sich der Vortrieb, er wird ebenfalls verdoppelt. Je mehr Masse pro Minute oder Sekunde nach hinten hinausfliegt, d.h. je größer der **Massendurchsatz** ist, desto größer ist die antreibende Kraft. Eine weitere Steigerung kann man erzielen, wenn man die Abwurfgeschwindigkeit der Säcke vergrößert, also den Schwung mit dem man sie hinauswirft. Eine Verdopplung der Abwurfgeschwindigkeit führt zu einer weiteren Verdopplung der Reaktionskraft. Kommen beide Effekte zusammen, so ergibt dies bereits eine Vervierfachung der Kraft.

Übertragen wir dies nun auf die Tragfläche oder die Hubschraube, so erkennen wir, dass die Flug- oder Strömungsgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle spielt. Je schneller die Luft an der Tragfläche vorbeiströmt, desto mehr Luft strömt auch vorbei, desto größer ist also der Massendurchsatz. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit entspricht also einer Verdopplung der Zahl der Sandsäcke bei unserem einfachen Beispiel. Außerdem strömt die Luft aber auch mit einer größeren Geschwindigkeit nach unten, was der Verdopplung der Abwurfgeschwindigkeit der Sandsäcke entspricht. Die Verdopplung der Strömungs- oder Fluggeschwindigkeit führt also zu einer Vervierfachung der Reaktionskraft. Entsprechend führt eine Verdreifachung der Fluggeschwindigkeit zu einer Verneinfachung der Reaktionskraft usw. In der gesuchten Formel erscheint deswegen die Geschwindigkeit im Quadrat.

Für den Massendurchsatz ist aber nicht nur die Geschwindigkeit wichtig, sondern auch die Dichte. Wenn die Säcke in unserem primitiven Beispiel, nur halbsoviel wiegen, halbiert sich auch die Antriebskraft. Also muss auch die Dichte der Luft in der Formel als Faktor erscheinen. Einen weiteren Faktor liefert die Fläche der Tragfläche oder der Hubschraube, denn je größer die Fläche ist, desto größer ist wiederum die Masse der Luft, die abgelenkt wird. Auf diese Weise haben wir bereits eine ziemlich klare Vorstellung von der gesuchten Formel für die **Auftriebskraft** F_A gewonnen. Sie sieht folgendermaßen aus:

$$F_A = \frac{1}{2} c_A \rho A v^2$$

Überraschend ist noch der Anfang der Formel. Der Faktor $\frac{1}{2}$ erscheint dort, weil während der Zeit, in der die Luft z. B. durch die Hubschraube geht, die Geschwindigkeit erst

langsam auf die Endgeschwindigkeit beschleunigt wird. Sie ist am Anfang gleich 0 und erreicht erst am Ende, wenn die Luft unten aus der Hubschraube herauskommt den Wert v . Für den Massendurchsatz ist das zwar nicht von Bedeutung, wohl aber für den Schwung. Im Schnitt hat man deshalb nicht den Schwung, den v liefern würde, sondern nur die Hälfte davon. In dem Faktor c_A stecken nun alle anderen Eigenschaften der Tragfläche oder der Rotoren der Hubschraube, vor allem z. B. der Anstellwinkel, von dem wir bereits wissen, dass er den Auftrieb ganz entscheidend beeinflusst, aber auch die spezielle Form der Tragfläche oder der Rotorblätter usw. Man bezeichnet c_A als **Auftriebsbeiwert**.

Für die **Luftwiderstandskraft** F_W können wir nahezu die gleichen Überlegungen anstellen und gelangen deshalb auch zu einer sehr ähnlichen Gleichung:

$$F_W = \frac{1}{2} c_W \rho A v^2$$

Hier heißt c_W jetzt **Widerstandsbeiwert**. Wir können diese Formel jetzt durch einige Experimente wenigstens in einigen Punkten überprüfen (s. u.).

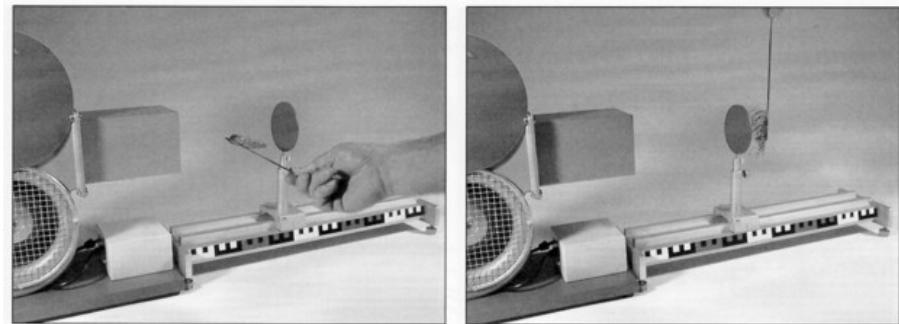
Experimente

- 1** Der Luftwiderstand wird mit der Komponentenwaage in der bekannten Weise gemessen (siehe Versuch 1 auf Seite 78). Allerdings benötigen wir jetzt nur die waagerechte Komponente, da es keinen Auftrieb gibt. Miss die Kraft zunächst an der kleinen Kreisscheibe und dann an der großen Kreisscheibe (doppelte Fläche) bei maximaler Windgeschwindigkeit und vergleiche die Werte.

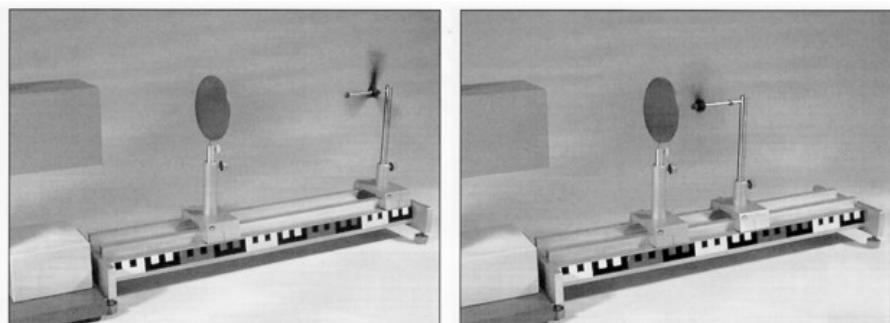


Hinweis für den Lehrer: Der Versuch muss genau wie die folgenden unbedingt mit der Komponentenwaage durchgeführt werden. Ein Aufbau mit einem Wagen auf der Laufschiene liefert wegen zu großer Reibung so ungenaue Werte, dass die Formel nicht bestätigt werden kann.

- 2** Führe Luftwiderstandsmessungen mit weiteren Körpern durch (Kugel, Stromlinienkörper usw.), die alle die gleiche Querschnittsfläche wie die kleine Scheibe haben, und vergleiche die Werte der verschiedenen Körper miteinander. Miss die Windgeschwindigkeit mit dem Flügelradanemometer bei diesen Experimenten (siehe Aufgaben weiter unten).
- 3** Bestimme die Windgeschwindigkeit des Winderzeugers bei voll geöffneter Windzufuhr. Schließe anschließend die Luftzufuhr so weit, dass die Windgeschwindigkeit auf den halben Wert sinkt und stelle jetzt die Luftwiderstandsmessung durch. Öffne anschließend die Luftzufuhr wieder vollständig, sodass die maximale Windgeschwindigkeit erreicht wird, und führe die Widerstandsmessung durch. Vergleiche die beiden Kräfte miteinander.
- 4** Die kreisförmige Scheibe wird jetzt fest auf der Laufschiene montiert (s. Abb.) und die Luftströmung in der Umgebung der Scheibe mit einem Fadenkamm untersucht. Beschreibe die Beobachtungen und versuche ein Stromlinienbild zu erstellen.



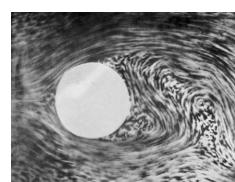
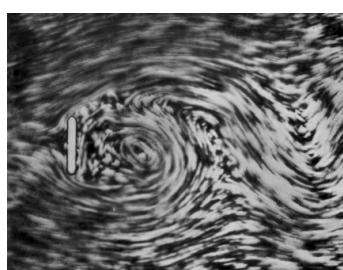
- 5** Der Aufbau ist im Wesentlichen der gleiche wie im vorigen Versuch. Jetzt wird aber hinter dem Widerstandskörper eine Luftschaube angebracht, die zunächst in größerer Entfernung hinter der Scheibe steht und dann näher heran geführt wird. Beobachte das Verhalten der Luftschaube und erkläre es.



- 6** Führe vergleichbare Versuche mit anderen Körpern (Kugel, Stromlinienkörper) durch.

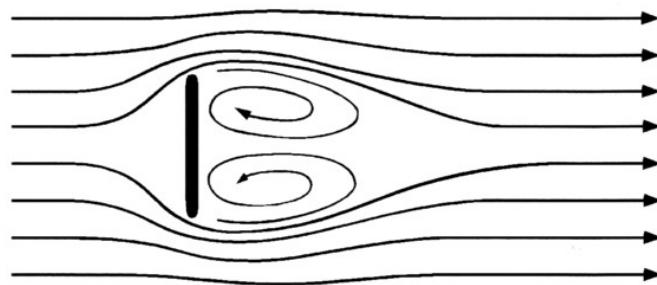
Aufgaben:

- 1** Berechne mit Hilfe der in Versuch 2 gewonnenen Daten den c_W -Wert für die verschiedenen Körper. Die Dichte der Luft beträgt bei Zimmertemperatur ca. $1,20 \text{ kg/m}^3$. Die Formeln liefern die Kraft in N, wenn man die Einheiten kg, m und s verwendet. Die Geschwindigkeit ist ggf. umzurechnen.
- 2** Betrachte die drei Stromlinienbilder auf der folgenden Seite und versuche eine Erklärung für die unterschiedlichen c_W -Werte der Scheibe, der Kugel und des Stromlinienkörpers zu finden.



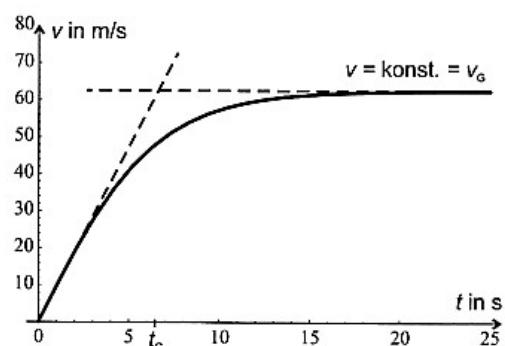
GRUNDLAGEN: Widerstandsbeiwerte und Strömungsverhalten

Bei der Kreisscheibe ermittelt man in der Regel Widerstandsbeiwerte in der Größenordnung von 1, bei der Kugel etwa 0,3 bis 0,4 und beim Stromlinienkörper etwa 0,01 ... 0,09 je nach Ausformung. Die Bilder zeigen deutlich, dass die Wirbel hinter dem Körper eine wesentliche Rolle spielen. Je stärker die Wirbelbildung ist, desto größer ist der Widerstandsbeiwert. Die Wirbel kann man mit dem Fadenkamm deutlich sichtbar machen. Insbesondere den Rückstrom unmittelbar hinter der Platte kann man erkennen. Die zeigt auch das Verhalten der Luftschaube, die bei Annäherung an die Platte kurz stehen bleibt und dann anders herum rotiert, also einen Rückstrom anzeigt (siehe Abbildung). Ein Stromlinienkörper füllt den Raum, in dem sonst Wirbel entstehen könnten aus, sodass die Wirbelbildung sehr gering ist.



Aufgaben:

- 3 Bei Radrennen mit Mannschaftszeitfahren beobachtet man häufig, dass die Angehörigen einer Mannschaft genau hintereinander fahren und der Fahrer an der Spitze ständig abgelöst wird. Wozu dient dieses Verhalten?
- 4 Ein in Luft fallender Körper wird durch die Erdanziehung zunächst immer schneller. Nach einiger Zeit nimmt die Geschwindigkeit aber kaum noch zu (siehe Graphik rechts). Wodurch wird die Erdanziehung in dieser Phase des Falles fast vollständig kompensiert?



- 4** Was lässt sich über den Betrag der Gewichtskraft und der Luftwiderstandskraft aussagen, wenn ein Körper in Luft mit konstanter Geschwindigkeit fällt? Nutze diesen Sachverhalt aus, um die maximale Fallgeschwindigkeit eines Menschen zu bestimmen, dessen Körperachse quer zur Fallrichtung liegt. Behandle die Körperfläche näherungsweise wie ein Rechteck mit c_W -Wert 1. Die Dichte der Luft beträgt ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$.



- 5** Das nebenstehende Bild zeigt einen Springer mit einem Rundkappenfallschirm in Kreisform (s. Abb.), der heute nur noch selten verwendet wird. Gehe von einer Körpergröße von 1,8 m aus und schätze damit den Durchmesser des Schirmes. Berechne seine Fläche und die maximale Fallgeschwindigkeit für einen c_W -Wert von 1,4 (typischer Wert bei solchen Schirmen). Springer und Fallschirm haben zusammen ein Gewicht von 100 kg.



- 6** Heute werden oft rechteckige Flächenfallschirme verwendet, die zusätzlich zum Luftwiderstand auch noch Auftrieb erzeugen. Mit einem solchen Fallschirm gleitet man wie ein Segelflieger zu Boden. Deswegen verwendet man hier den Auftriebsanstelle des Widerstandsbeiwertes. Bei einem solchen Fallschirm mit nur 10 m^2 Fläche hat der Springer am Ende eine Geschwindigkeit von 7 m/s . Berechne den c_A -Wert für eine Masse von 100 kg (Springer und Fallschirm).



- 7** Sammle Informationen über das Fallschirmspringen und über verschiedene Fallschirmtypen aus dem Internet und schreibe darüber einen Bericht.

- 8** Betrachte den Videofilm „ohneschirm.flv“ auf der CD und studiere die Bewegungen, die Scott Plamer während der „Freifallphase“ macht. Was fällt auf?

Unerhörte Begebenheiten: Sturz aus einem Flugzeug

Es gibt mehrere Berichte von Menschen, die aus großer Höhe ohne Fallschirm abgestürzt sind und diesen Sturz z. T. ohne ernsthafte Verletzungen überlebt haben.

Der bekannteste Fall ist vermutlich der der 17-jährigen Juliane Koepcke, die am Heiligabend 1971 als Einzige den Absturz einer 4-motorigen Turboprop-Maschine über dem peruanischen Regenwald überlebte. Ihre Eltern betrieben eine biologische Forschungsstation in Peru und sie war zusammen mit ihrer Mutter, die das Unglück nicht überlebte, auf dem Weg zu ihrem Vater, um dort die Weihnachtstage zu verbringen. Das Bild zeigt sie einige Monate nach dem Unglück.



Das Flugzeug wurde in 3000 m Höhe von einem Blitz getroffen, wodurch ein Brand in einem der Motoren ausbrach. Kurz darauf brach das Flugzeug auseinander und Juliane wurde mitsamt dem Sitz, in dem sie noch angeschnallt war, herausgeschleudert. Der Aufprall am Boden wurde offenbar durch die Regenwald-Vegetation so stark abgebremst, dass sie überlebte. Sie wurde zwar bewusstlos und erwachte erst am nächsten Tag aus der Bewusstlosigkeit, hatte aber nur einen Schlüsselbeinbruch und eine Fleischwunde an der Wade. Später stellte sich heraus, dass auch die Kreuzbänder am Knie gerissen waren, wovon sie aber nichts gemerkt hat. Auf der biologischen Forschungsstation ihres Vaters hatte sie gelernt, wie man im Urwald überlebt. Sie folgte den Flussläufen flussabwärts und stieß nach 10 Tagen auf eine Gruppe von Jägern, die sie in die Zivilisation zurückbrachten.

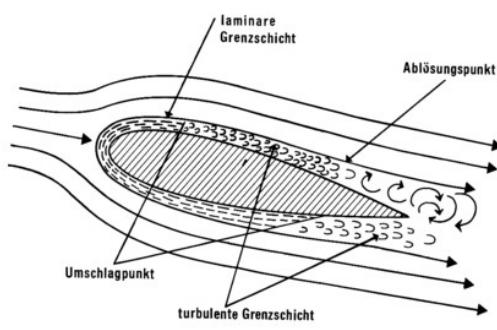
Die Geschichte ist zweimal verfilmt worden, zuletzt unter dem Titel „Wings of Hope“ (deutsch: „Julianes Sturz in den Dschungel“). Auf der CD findest du den Link zu einem Interview, das Dr. Juliane Diller, wie sie heute heißt, vor einigen Jahren gegeben hat. Sie ist heute als Biologin tätig und lebt in München.

Nicholas Alkemade ließ im 2. Weltkrieg nach dem Abschuss seines Flugzeugs über Deutschland seinen brennenden Fallschirm zurück und fiel 5500 Meter weiter unten in einen Wald. Unterholz und hoher Schnee bremsten seinen Aufprall zusätzlich. Er verdrehte sich dabei lediglich das Knie und zog sich einige Schürfwunden zu. Ebenfalls im 2. Weltkrieg wurde Alan Magee in 6000 Metern aus seinem Bomber geschleudert. Er stürzte präzise durch das Oberlicht des Bahnhofs von St. Nazaire in Frankreich und wurde dabei schwer verletzt, erholte sich davon aber wieder. Den Rekord hält Ivan Chisov. Der Russe fiel im Krieg aus 6700 Metern exakt an den Rand einer verschneiten Schlucht, in die er hinunterrollte und die so seinen Sturz vergleichsweise sanft abbremste.

„Spitzenreiterin“ ist allerdings Vesna Vulovic, die Stewardess bei der jugoslawischen Fluggesellschaft war, als ihre Maschine 1972 von einer Bombe auf der Reiseflughöhe von 10 000 Metern auseinandergerissen wurde. Sie stürzte allerdings nicht im freien Fall zur Erde, sondern prallte mit einem Teil des Rumpfs auf einen schneebedeckten Abhang auf. Wie sie als einzige Überlebende diesen 10-Kilometer-Sturz überstand, obgleich mit schweren Verletzungen, ist nicht ganz klar. Vesna Vulovic hat keine Erinnerung daran. Es gibt allerdings erhebliche Zweifel an der Richtigkeit dieser Geschichte.

Exkurs: Verschiedene Widerstandsarten

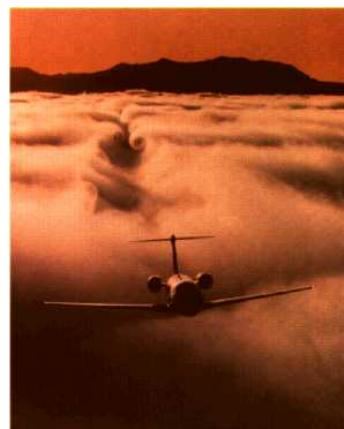
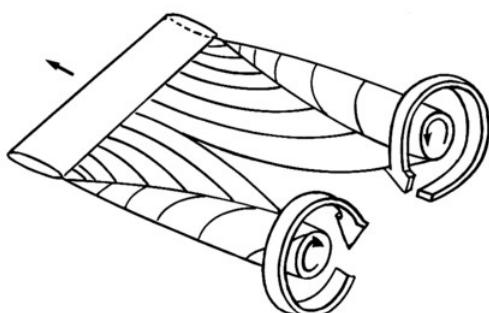
Bisher haben wir nur den vom Druckunterschied erzeugten Luftwiderstand der Tragfläche kennengelernt, der auch den Hauptanteil ausmacht. Es gibt aber noch weitere Widerstandsarten, die kleinere Beiträge liefern. Da ist zunächst der **Reibungswiderstand** zu nennen. In einer dünnen Schicht um die Oberfläche des Flugzeugs bzw. um die Tragfläche herum (1-2 cm) wird die Luft mitgerissen. Man bezeichnet diese Schicht als **Grenzschicht**. Die dafür aufzubringende Kraft bezeichnet man als Reibungswiderstand.



Man unterscheidet zwischen einer **laminaren** und einer **turbulenten** Grenzschicht. In einer laminaren Strömung gleiten die Flüssigkeitsteile nebeneinander her, während sich in einer turbulenten Strömung die nebeneinander gleitenden Schichten durch unregelmäßige Querbewegungen vermischen. Der Reibungswiderstand einer turbulenten Grenzschicht ist größer als der einer laminaren.

Im vorstehenden Bild gibt es im vorderen Teil der Tragfläche einen Umschlagpunkt, an dem die Grenzschicht von laminarer zu turbulent Strömung wechselt. Weiter hinten kommt es dann zur Strömungsablösung mit großräumiger Verwirbelung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine turbulente Grenzschicht nicht so schnell zum Strömungsabriss neigt wie eine laminare. Deshalb kann es von Vorteil sein, wenn die Strömung schon relativ weit vorn turbulent wird. Man hat dann einen etwas größeren Reibungswiderstand, aber man kann größere Anstellwinkel nutzen, ohne dass es zum Strömungsabriss kommt. Beide Widerstandsarten zusammen bezeichnet man als **Profilwiderstand**.

Eine weitere Widerstandsart, der **induzierte Widerstand**, entsteht durch eine weitere Wirbelbildung an den Enden der Tragflächen. Der Grund liegt darin, dass von der Tragflächenunterseite, an der Überdruck herrscht, Luft zur Tragflächenoberseite strömt, da dort ein Unterdruck herrscht. Dies geschieht bei der Vorwärtsbewegung fortlaufend, sodass eine Wirbelschlepp entsteht (siehe Abbildungen).

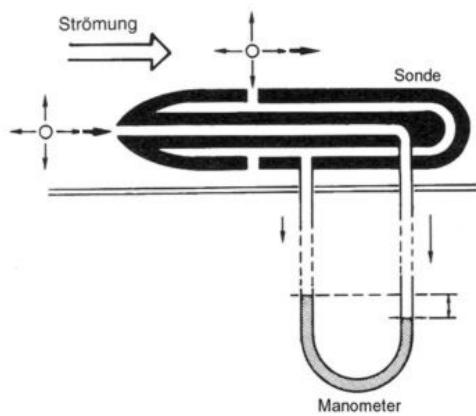
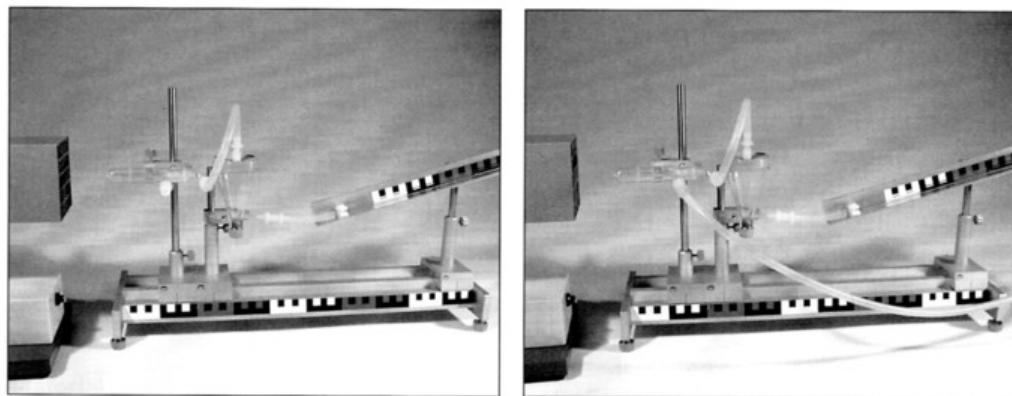


Im rechten Bild kann man die Luftbewegungen an der Wirkung auf die Wolken deutlich erkennen. Die Luft wird hinter dem Flugzeug nach unten gerissen, wodurch sich in der Wolke eine Art Rinne gebildet hat, an deren Rand Wirbel zu erkennen sind. Bei großen Flugzeugen kann die Wirbelschlepp mehrere Kilometer lang sein und stellt insbesondere für kleinere Flugzeuge eine große Gefahr dar. Da für die Erzeugung der Wirbel Energie aufgewendet wird, die dem Vortrieb fehlt, wirkt sich dies als Luftwiderstand aus.

7.7 Staudruck und Geschwindigkeitsmessung

Experimente

- 1** Ein Staurohr wird über einen Schlauch mit dem Vorratsgefäß des Schrägrohrmanometers verbunden und in den Luftstrom des Winderzeugers gehalten (linkes Bild). Mit Hilfe der Abdeckscheibe des Winderzeugers wird die Strömungsgeschwindigkeit variiert und dabei der gemessene Druck beobachtet.
- 2** Der Versuch wird wiederholt. Jetzt wird aber die äußere Druckkammer des Staurohrs über einen Schlauch mit dem oberen Anschluss des Schrägrohrmanometers verbunden. Ergeben sich Veränderungen?



Aufgaben:

- 1** Erkläre zunächst qualitativ, warum sich der gemessene Druck im Staurohr erhöht, wenn man die Öffnung in den Luftstrom hält.
- 2** Erkläre, warum zusätzlich zum normalen Luftdruck ein sog. **Staudruck** $p_{st} = \frac{1}{2} \rho v^2$ auftritt. Hinweis: Das Staurohr ist so gebaut, dass $c_W = 1$ ist.
- 3** Die äußere Druckkammer des Staurohrs muss bei einem Flugzeug mit dem „oberen“ Eingang des Manometers verbunden sein, da es zu Messfehlern kommen würde, wenn der Luftdruck im Innern des Flugzeugs höher ist als außen. Warum ist dies insbesondere bei Flügen in großen Höhen notwendig?
- 4** Warum ergibt sich beim Versuch im Labor meistens kein Unterschied zwischen den beiden Versuchsvarianten?

GRUNDLAGEN: Geschwindigkeitsmessung mit dem Staurohr

Trifft eine Strömung mit einer Geschwindigkeit v auf ein Hindernis, so ergibt sich dort eine Luftwiderstandskraft $F_W = \frac{1}{2} c_w \varrho A v^2$. Hier ist das Hindernis die Luft im Staurohr, die zusammengedrückt wird. Da bauartbedingt $c_w = 1$ ist, baut sich im Rohr ein zusätzlicher Druck

$$p_{st} = \frac{F_W}{A} = \frac{1}{2} \varrho v^2$$

auf, der zum normalen Luftdruck hinzukommt. Da das obere Ende des Schrägrohrmanometers in Verbindung zur äußeren Luft steht, dort also auch der normale, statische Luftdruck wirksam ist, zeigt das Schrägrohrmanometer nur den Staudruck an. In einem Flugzeug kann der Innendruck höher als der Außendruck sein. In größeren Höhen ist das sogar die Regel, da man sonst im Flugzeug nicht mehr vernünftig atmen könnte. Deshalb muss das „obere“ Ende des Manometers mit der Außenluft verbunden sein, wie im zweiten Versuch. Im Flugzeug werden allerdings keine Flüssigkeitsmanometer verwendet, sondern Druckdosen mit Membranen.

Die Geschwindigkeit lässt sich jetzt aus dem Staudruck berechnen:

$$v = \sqrt{\frac{2p_{st}}{\varrho}}$$

Das Ergebnis wird in m/s geliefert, wenn man die üblichen Einheiten verwendet (Pa, kg, m usw.). Zu beachten ist, dass die Dichte der Luft in größeren Höhen geringer wird. Die Dichte ist bei gleicher Temperatur proportional zum Luftdruck.

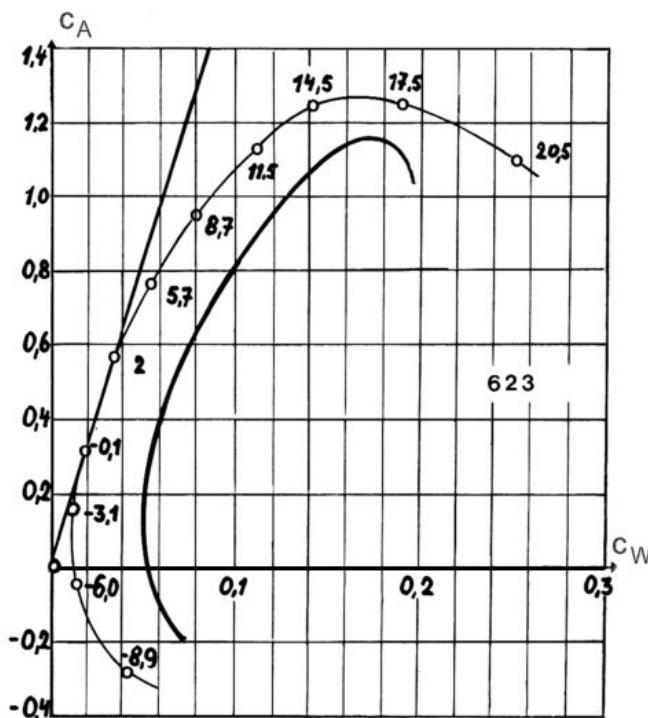
Aufgaben:

- 5** Bei einem äußeren Luftdruck von 1010 hPa (Hekto-Pascal) wird ein Staudruck von 55 hPa gemessen. Die Dichte der Luft beträgt in diesem Fall $1,2 \text{ kg/m}^3$. Berechne die Geschwindigkeit des Flugzeugs.
- 6** Nach einem längeren Steigflug kommt das Flugzeug in größerer Höhe an. Der Außendruck beträgt jetzt 505 hPa. Überlege, welchen Einfluss diese Tatsache auf die Geschwindigkeitsberechnung hat und berechne die Geschwindigkeit für $p_{st} = 60 \text{ hPa}$. Der Einfluss einer möglicherweise geänderten Temperatur soll vernachlässigt werden.
- 7** Ein großes Frachtflugzeug fliegt in größerer Höhe bei einer Luftdichte von $0,5 \text{ kg/m}^3$ mit einer Geschwindigkeit von 720 km/h. Berechne den zu erwartenden Staudruck.
- 8** Bei einer Luftdichte von $0,9 \text{ kg/m}^3$ wird ein Staudruck von 100 hPa gemessen. Berechne die Geschwindigkeit des Flugzeugs.
- 9** Ist die mit Hilfe des Staudruckes gemessene Geschwindigkeit die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs oder die Geschwindigkeit über Grund?
- 10** Warum muss das Staurohr eines Flugzeugs mit einer Heizung versehen werden und warum muss es regelmäßig gereinigt werden?

7.8 Polardiagramm und Flugphasen

GRUNDLAGEN: Beiwerte und Polardiagramme

Auf Seite 80 haben wir das Polardiagramm für die Auftriebskraft und die Widerstandskraft kennengelernt und zwei Seiten später die Formeln für diese beiden Kräfte. Da beide Formeln den Term $\frac{1}{2} \rho A v^2$ enthalten, dieser also für die Gestalt des Polardiagramms keine Bedeutung hat, teilt man häufig durch ihn und trägt statt der Kräfte nur die Beiwerke gegeneinander auf (siehe Abb.).



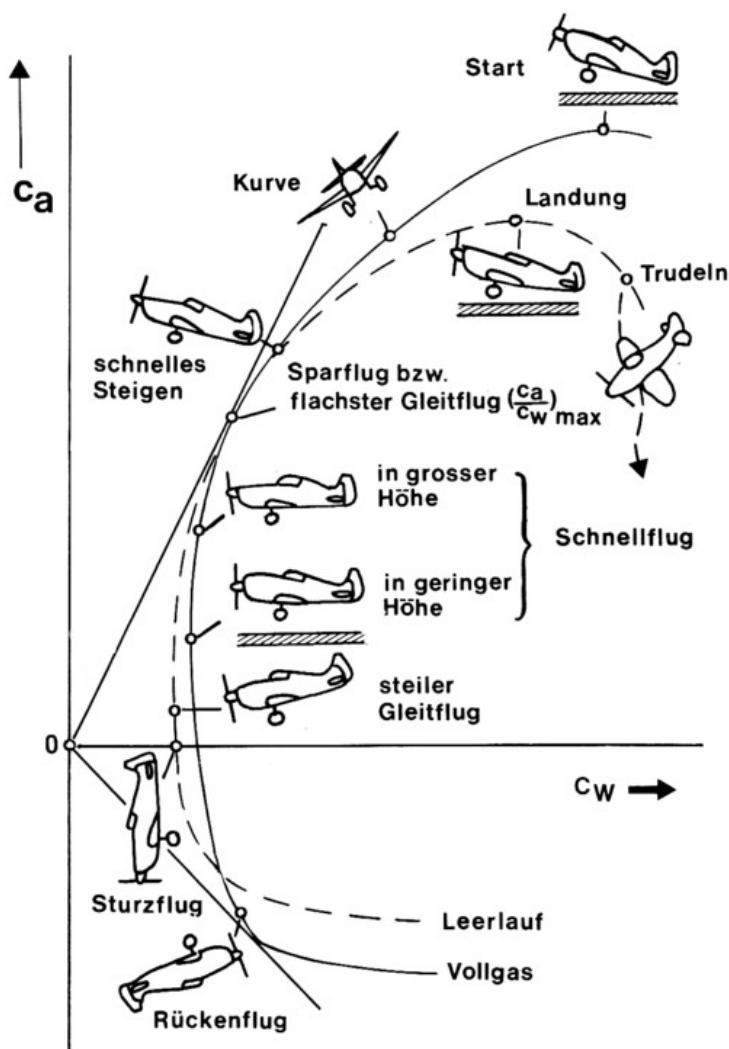
Bei sonst gleichen Bedingungen verhalten sich die Beiwerke genauso zueinander wie die Kräfte. Bei den folgenden Ausführungen werden wir deshalb stets Beiwertdiagramme betrachten. Das bei dem hier dargestellten Profil bereits bei einem wesentlich geringeren Anstellwinkel der Strömungsabriss erfolgt, hängt mit den kleineren Abmessungen bei dem früher untersuchten Modellprofil (s. S. 80) zusammen. Die zweite etwas dicker gezeichnete, nach rechts verschobene Kurve gilt für das Flugzeug insgesamt.

Aufgaben:

- 1** Ein Maß für die aerodynamische Güte eines Tragflächenprofils ist das Verhältnis c_A/c_W . Erläutere, warum dies so ist. Bearbeite dazu das dynamische Arbeitsblatt „F4: Polardiagramm“ auf der CD.
- 2** Welcher Bereich des Polardiagramms (bzw. welche Anstellwinkel) sind für den schnellen Geradeausflug und welcher beim Start und bei der Landung optimal. Begründe deine Antwort.
- 3** Warum benötigt man in größeren Höhen einen etwas größeren Anstellwinkel beim schnellen Geradeausflug als in geringen Höhen? Ziehe dafür die Formel zu Rate.

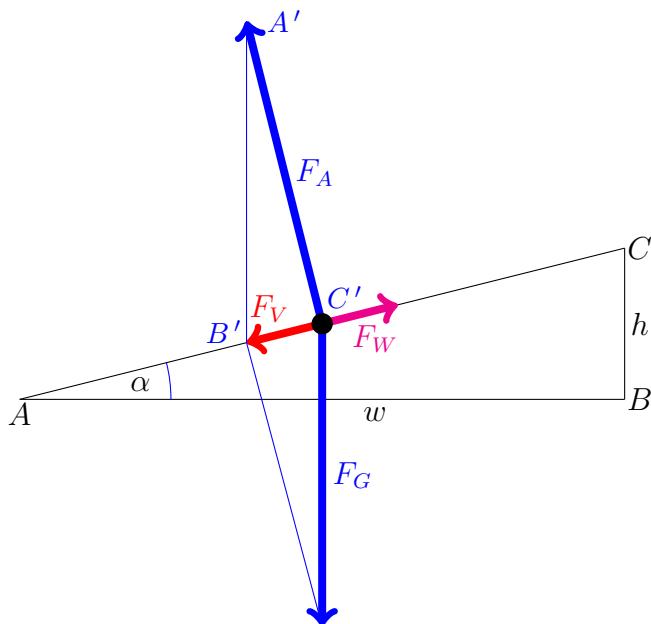
GRUNDLAGEN: Polardiagramm und verschiedene Flugphasen

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick darüber, welche Bereiche des Polardiagramms für welche Flugphase ideal sind. Beim Start benötigt man naturgemäß einen höheren Auftrieb als beim Geradeausflug. Dies kann man im Prinzip auch durch eine große Geschwindigkeit erreichen, was aber sehr lange Startbahnen erfordern würde, um auf diese Geschwindigkeit zu kommen. Einfacher ist es den Anstellwinkel zu vergrößern. Auch bei der Landung wird ein hoher c_A -Wert benötigt, da die Geschwindigkeit vergleichsweise gering sein muss. Beim Schnellflug kommt man mit geringen Anstellwinkeln aus, da durch die hohe Geschwindigkeit genügend Auftrieb geliefert wird. In diesem Fall sollte aber der Luftwiderstand möglichst klein sein, um Sprit zu sparen.



In größerer Höhe benötigt man einen größeren c_A -Wert, da die Dichte der Luft geringer ist. Da das Flugzeug nicht leichter wird, muss zum Ausgleich der c_A -Wert größer werden oder die Geschwindigkeit erhöht werden. Wie der c_A -Wert verändert wird, erfahren wir im nächsten Kapitel. Die vom Nullpunkt ausgehende Tangente an die Polarkurve liefert den Punkt des Diagramms mit der höchsten **aerodynamischen Güte**, also den Punkt, an dem das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand maximal wird. Die Steigung der Tangente ist gleich c_A/c_W .

Exkurs: Polardiagramm und Segelflug



Der „Treibstoff“ eines Segelflugzeugs ist seine Lageenergie, also in gewissem Sinn seine Höhe über Grund. Das Flugzeug gleitet auf einer geneigten Bahn ähnlich zu Boden, wie eine Kugel auf einer schiefen Ebene herabrollt. Deshalb sieht auch der Kräfteplan ähnlich aus (siehe Abbildung). Der Vortrieb entsteht aus dem Zusammenspiel von Gewichtskraft und Auftrieb (blau) und wird bei gleich bleibender Geschwindigkeit durch den Luftwiderstand kompensiert. Im Bild ist h die Anfangshöhe und w die maximale Flugweite bei dieser Höhe.

- 1 Vergleiche das Dreieck ABC des Lageplans (schwarz) mit dem Dreieck $A'B'C'$ des Kräfteplans. Was lässt sich über die beiden Dreiecke sagen?
- 2 Begründe, warum $h : w = F_V : F_A = F_W : F_A$ ist.
- 3 Begründe, warum das Gleitverhältnis $g = c_w : c_A$ ist.
- 4 Mit Hilfe der Trigonometrie kann man den Gleitwinkel α berechnen. Erläutere, wie das geht und berechne den Winkel für das Gleitverhältnis $1 : 36$.
- 5 Das Segelflugzeug *TWIN II* hat ein optimales Gleitverhältnis von $1 : 37$ bei einer Geschwindigkeit von 108 km/h und (beladen) eine Masse von ca. 500 kg . Berechne zunächst den Gleitwinkel und dann mit Hilfe der Gewichtskraft Auftrieb, Vortrieb und Luftwiderstand bei gleichförmigem Flug. Berechne die angegebene Geschwindigkeit in m/s um und dann mit Hilfe der bekannten Formel den c_w -Wert des Flugzeugs und den c_A -Wert. Die Flügelfläche beträgt $17,8 \text{ m}^2$ und die Dichte der Luft $1,2 \text{ kg/m}^3$ (bei 20°C).

Wie wir aus Kapitel 4 bereits wissen, sind verschiedene Gleitverhältnisse mit jeweils dazu gehörigen Fluggeschwindigkeiten möglich. Das beste Gleitverhältnis liegt dann vor, wenn bei einem bestimmten Anstellwinkel das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand möglichst groß ist (siehe elektronisches Arbeitblatt F4). Dieses optimale Gleitverhältnis ist für den jeweiligen Flugzeugtyp charakteristisch und hängt von der Bauweise ab.

Auch Motorflugzeuge können bei abgestelltem Motor gleiten. Sie stürzen keinswegs einfach ab, wenn der Pilot sich richtig verhält. Allerdings ist das Gleitverhältnis relativ ungünstig, sodass der Gleitwinkel groß ist.

Unerhörte Begebenheiten: Verkehrsflugzeuge im Gleitflug

Am 15. Januar 2009 fielen bei dem Flug „US-Airways 1549“ kurz nach dem Start beide Triebwerke durch Vogelschlag aus. Da das Flugzeug zu diesem Zeitpunkt nur eine Höhe von 975 m hatte, entschloss sich der Pilot zu einer Notwasserung im Hudson-River. Das spektakuläre Manöver gelang und alle Insassen überlebten ohne ernsthafte Verletzungen. Der Flug dauerte vom Start bis zur Wasserung insgesamt 6 Minuten.



Den längsten Gleitflug eines Verkehrsflugzeuges schaffte ein Airbus A330 (Flug „Air-Transat 236“) am 24. 8. 2001 auf dem Weg von Kanada nach Portugal. Durch ein Leck verlor das Flugzeug Treibstoff, was schließlich zu einem Ausfall beider Triebwerke über dem Atlantik führte. Dem Piloten gelang es in einem 20 Minuten dauernden Gleitflug das Flugzeug auf dem Luftwaffenstützpunkt Lajes auf den Azoren zu landen, nachdem es 120 km ohne Treibstoff zurückgelegt hatte. Auch hier überlebten alle 306 Insassen ohne ernsthafte Verletzungen.

- 1 Beim Ausfall beider Triebwerke befand sich das Flugzeug in einer Höhe von ca. 10 500 m über dem Meer. Es legte 120 km im Gleitflug zurück. Berechne die Gleitzahl (bzw. das Gleitverhältnis) für diesen Flug.

Verfilmt worden ist die Geschichte des Gleitfluges „Air-Canada 143“ von Montreal nach Edmonton (in Kanada). Wegen Treibstoffmangel musste das Flugzeug nach einem 23 km langen Gleitflug auf dem ehemaligen Stützpunkt Gimli notlanden. Leider feierte auf der stillgelegten Landebahn an diesem Tag ein Motorsportverein sein Sommerfest mit Kartrennen usw. Das Flugzeug kam etwa 30 m vor der Veranstaltungszone zum Stehen.

7.9 Gemischte Aufgaben

Autotyp	c_w -Wert
VW Käfer	0,48
VW Golf I (1974)	0,41
Peugeot 206	0,33
VW Golf VI	0,31
Mercedes E (2009)	0,25
Toyota Prius III	0,25

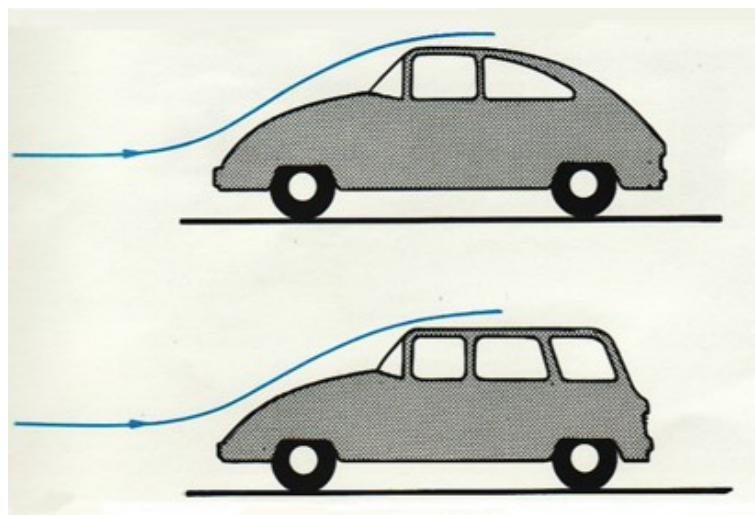
Strömungswiderstände spielen nicht nur in der Flugphysik eine Rolle, sondern auch beim Autofahren. Bei größeren Geschwindigkeiten hat der Luftwiderstand den größten Anteil an den bremenden Reibungskräften. Deshalb versucht man die Autos so zu konstruieren, dass der Luftwiderstand klein bleibt. Die folgende Tabelle gibt einige typische Widerstandsbeiwerte von PKW's an.

- 1** Ein PKW hat die Querschnittsfläche $2,8 \text{ m}^2$ und den Widerstandbeiwert 0,38.
- Berechne den Luftwiderstand bei einer Geschwindigkeit von 108 km/h (bzw. 180 km/h) bei einer Luftdichte von $1,2 \text{ kg/m}^3$ (Wert für 20°C). Rechne die Geschwindigkeit zunächst in m/s um.
 - Der Rollwiderstand des Autos (Rollreibung der Räder usw.) beträgt weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit ca. 300 N. Der Motor muss beide Kräfte überwinden. Berechne die nötige Gesamtleistung bei 108 bzw. 180 km/h. Hinweis: Leistung = Kraft \times Weg / Zeit.
 - Bei Temperaturen knapp unter 0°C beträgt die Dichte der Luft $1,3 \text{ kg/m}^3$. Um wie viel Prozent erhöht sich die Leistung, die der Motor aufbringen muss, gegenüber den Werten von Aufgabe b)?
 - Die Leistung des Autos berechnet sich nach folgender Formel: $P = a \cdot v^3 + b \cdot v$. Begründe dies und bestimme die Faktoren a und b für die in a) und b) angegebenen Daten. Stelle die Funktion mit einem Plotprogramm graphisch dar und ermittle daraus die theoretische Höchstgeschwindigkeit für eine Motorleistung von 60 kW.
- 2** Betrachte die Videos „pkw.flv“ und „lkw.flv“ eines Pkw- bzw. Lkw-Modells im Rauchkanal. Woran erkennt man im Stromlinienverlauf, dass der c_w -Wert beim Pkw niedriger ist als beim Lkw?
- 3** In 10 km Höhe beträgt die Luftdichte nur etwa ein Viertel des Wertes am Boden.
- Welche Folgen hat das für den Luftwiderstand und den Auftrieb bei sonst gleichen Werten (Fläche, Geschwindigkeit usw.)?
 - Um den gleichen Auftrieb zu bekommen wie am Boden, muss das Flugzeug schneller fliegen als dicht über dem Boden. Wieviel mal so schnell muss es fliegen? Was hat dies für Folgen für den Luftwiderstand in 10 km Höhe, verglichen mit dem Wert in niedriger Höhe?
 - Warum fliegen Flugzeuge bei Fernreisen in ca. 10 km Höhe, obwohl dort die Strahlbelastung durch kosmische Strahlung wesentlich größer ist als in niedrigen Höhen?
- 4** Ein Großraumflugzeug hat eine Masse von ca. 300 000 kg, deren Gewichtskraft vom Auftrieb kompensiert werden muss. Die Fläche der Flügel ist 500 m^2 groß und der c_A -Wert beträgt 0,52. Berechne die Geschwindigkeit, die dafür in 10 km Höhe notwendig ist. Die Dichte der Luft beträgt dort $0,33 \text{ kg/m}^3$. Verwende den Ortsfaktor 10 N/kg .

- 5** Bei einem Jumbo (Boeing 747) ist das ideale Verhältnis der Beiwerte $\frac{c_W}{c_A} = \frac{1}{27}$. Wie weit kann das Flugzeug theoretisch noch im Gleitflug fliegen, wenn in 10 km Höhe alle Triebwerke ausfallen. In der Realität gelingt es allerdings gewöhnlich nicht mit diesem idealen Gleitverhältnis zu fliegen (siehe Aufgabe 1 auf Seite 93).

Weitere Kontrollfragen:

- 6** Was lässt sich über die Strömungsgeschwindigkeit an der Tragflächenoberseite im Vergleich zur Tragflächenunterseite sagen?
- 7** Was lässt sich über den Luftdruck an der Tragflächenoberseite im Vergleich zur Tragflächenunterseite sagen?
- 8** Warum haben die Tragflächen langsam fliegender Flugzeuge eine gewölbte Form?
- 9** Früher hat man bei kleineren Flugzeugen manchmal Doppeldecker (zwei Tragflächen übereinander) gebaut. Was ist der Vorteil?
- 10** Was versteht man unter dem Coanda-Effekt?
- 11** Wie heißen die Kräfte, die auf ein Flugzeug wirken?
- 12** Warum kann ein Flugzeug nicht mit einer beliebigen Geschwindigkeit fliegen, sondern muss eine der jeweiligen Flughöhe und seinem Gewicht angepasste Geschwindigkeit einhalten?
- 13** Was ist ein Strömungsabriss und warum muss ein Pilot ihn unbedingt vermeiden? Skizziere den ungefähren Strömungsverlauf an einer Tragfläche in dieser Situation.
- 14** Warum kann ein frei fallender Mensch nicht beliebig schnell werden?
- 15** Warum haben Rennräder einen nach unten gebogenen Lenker?
- 16** Skizziere einen Körper, der einen besonders niedrigen Luftwiderstand hat.
- 17** Vervollständige im folgenden Bild die Stromlinien in der richtigen Weise.

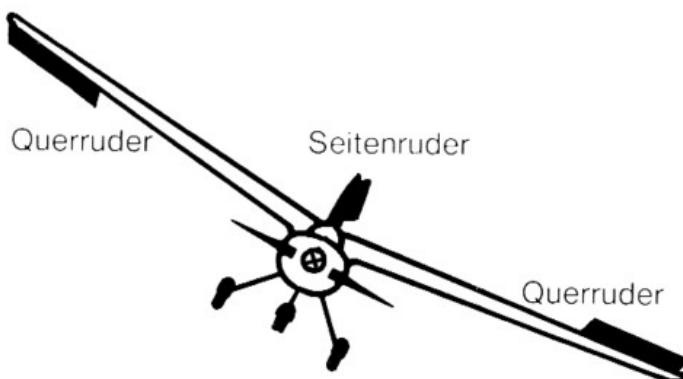


8 Steuerung, Stabilität und Antrieb beim Flugzeug

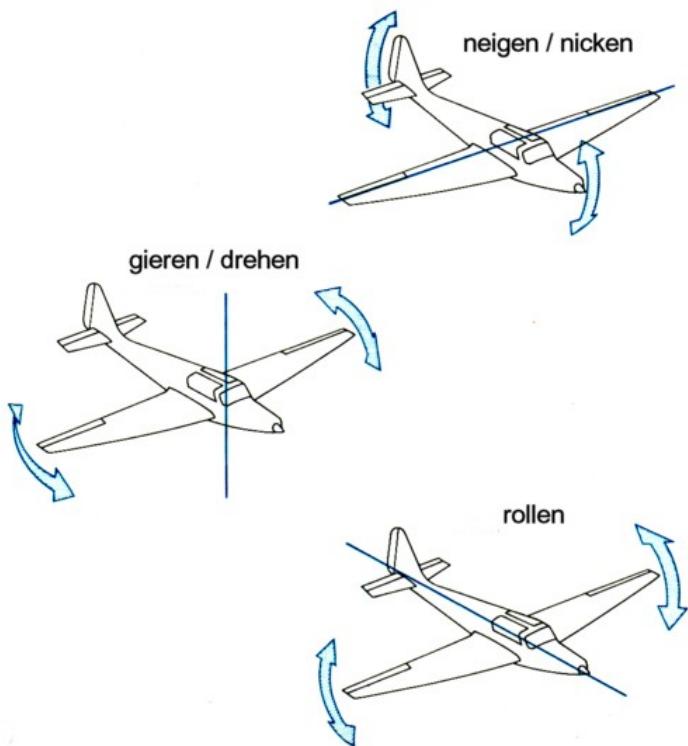
8.1 Steuerung und Kurvenflug

Aufgaben:

- 1 Versuche dir an einem Flugzeugmodell klar zu machen, welche Drehbewegungen beim Flugzeug möglich sind.
- 2 Bearbeite das dynamische Arbeitsblatt F5 (Steuerruder I) auf der CD und stelle fest, welche Drehbewegung mit welchem Steuerruder erzielt wird. Dokumentiere deine Ergebnisse und beschreibe dabei, bei welcher Stellung der Ruder welche Bewegung bewirkt wird.
- 3 Erkläre an einem Beispiel, warum die gewählte Ruderstellung die genannte Wirkung hat. Verwende dafür die früher gewonnenen Erkenntnisse über Strömungen an Tragflächen.
- 4 Berarbeite das dynamische Arbeitsblatt F6 (Steuerruder II) auf der CD und stelle fest, wie die Ruder betätigt werden.
- 5 Beim Kurvenflug wirkt auf das Flugzeug außer der Auftriebskraft und der Gewichtskraft noch eine Zentrifugalkraft ein. Deshalb benötigt man für den Kurvenflug eine Schräglage. Zeichne in eine Kopie des folgenden Bildes ein Kräftebild dieser drei Kräfte. Dabei soll die Resultierende von Gewichts- und Fliehkraft gezeichnet werden, sodass deutlich wird, wie sie sich zur Auftriebskraft verhält. Das Kreuz am Propeller kann (vereinfachend) als Angriffspunkt der Kräfte verwendet werden.



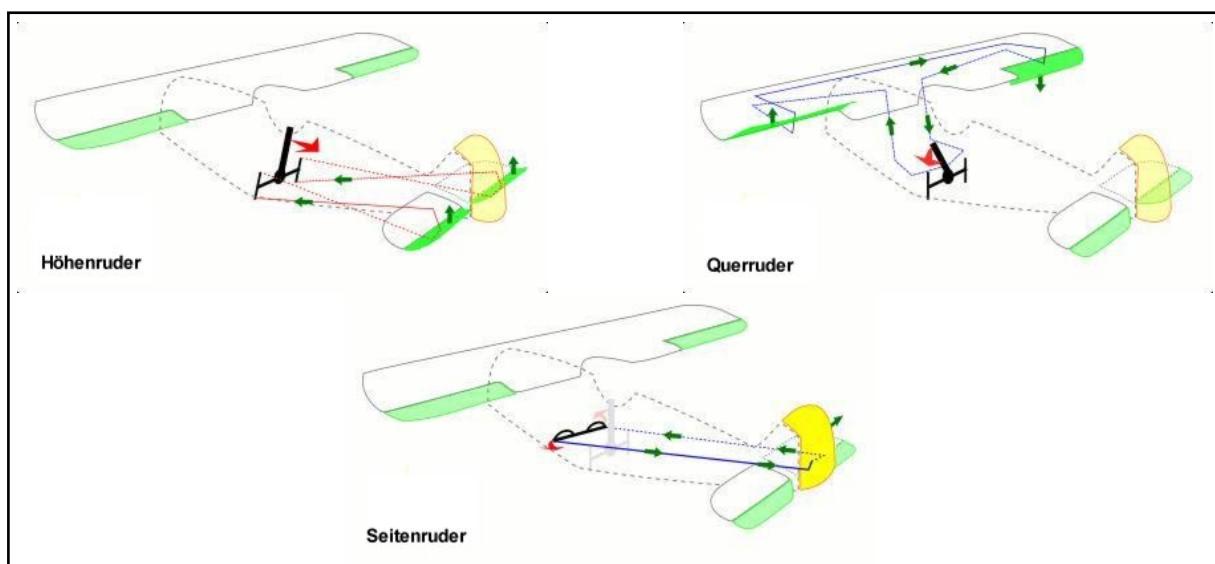
GRUNDLAGEN: Dreh- und Steuerbewegungen



Neben der eigentlichen Vorwärtsbewegung des Flugzeugs gibt es noch verschiedene Drehbewegungen, die insbesondere für die Steuerung von Bedeutung sind. Man unterscheidet hier drei Bewegungstypen nach den drei denkbaren Drehachsen (siehe Abbildung):

- Querachse: **Nickbewegung**
- Hochachse: **Gierbewegung**
- Längsachse: **Rollbewegung**

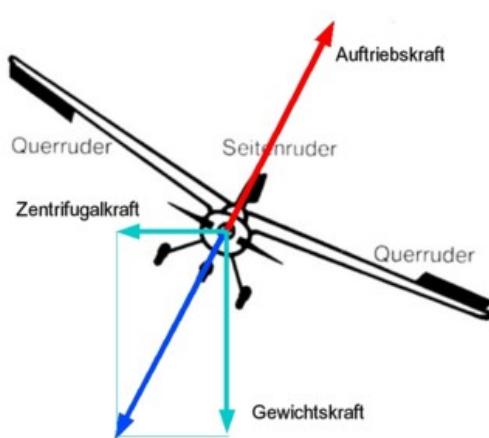
Die Nickbewegung wird mit Hilfe der **Höhenruder** am Heck des Flugzeugs (Höhenleitwerk) gesteuert, die Gierbewegung mit Hilfe des **Seitenruders** ebenfalls am Heck (Seitenleitwerk) und die Rollbewegung mit Hilfe der **Querruder** an den Tragflächen. Klappt man während der Vorwärtsbewegung die Höhenruder herunter, so hebt sich das Heck und die Spitze des Flugzeugs neigt sich nach unten und umgekehrt. Klappt man das Seitenruder nach links, so dreht sich das Heck nach rechts und die Spitze nach links und umgekehrt. Klappt man das rechte Querruder nach unten und das linke nach oben, so hebt sich die rechte Tragfläche und die linke senkt sich und umgekehrt.



Höhen- und Querruder werden mit dem Steuerknüppel bedient, während das Seitenruder mit Hilfe von Fußpedalen eingestellt wird. Drückt man den Steuerknüppel nach vorn, so senkt sich das Höhenruder nach unten und das Heck des Flugzeugs hebt sich, die Spitze senkt sich, zieht man ihn nach hinten, so wird die umgekehrte Bewegung erzeugt. Mit einer seitlichen Bewegung des Steuerknüppels betätigt man die Querruder, mit denen man das Flugzeug in die nötige Schräglage beim Kurvenflug bringt.

Die Wirkungsweise der Ruder soll am Beispiel des Höhenruders erläutert werden: Klappt man das Ruder nach unten, so strömt die Luft auf der Unterseite des Höhenleitwerkes gegen das Ruder, sodass sich dort ein Überdruck aufbaut. Insgesamt bekommt das Höhenleitwerk auch eine größere Wölbung, so dass die Luft auf der Oberseite stärker nach unten abgelenkt wird. Dies führt bekanntlich zu einem Unterdruck auf der Oberseite. Aus beiden Effekten resultiert eine Auftriebskraft, die das Heck des Flugzeugs nach oben zieht und den Bug nach unten bewegt. Klappt man das Ruder nach oben, so hat man genau den gegenteiligen Effekt.

GRUNDLAGEN: Kräfte beim Kurvenflug



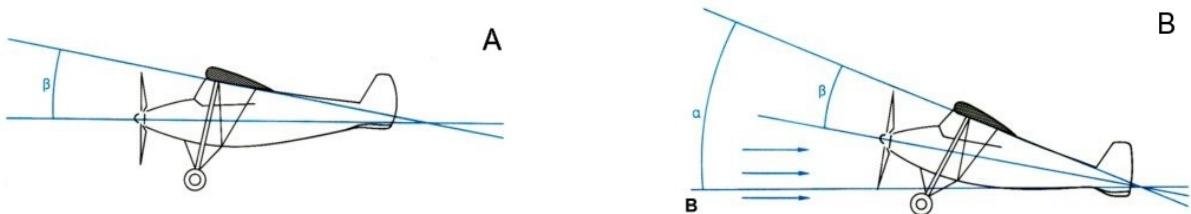
Wenn das Flugzeug beim Kurvenflug keine Schräglage einnimmt, wird die Zentrifugalkraft nicht kompensiert, das Flugzeug driftet unkontrolliert aus der Kurve. Durch die Schräglage bekommt der Auftrieb eine andere Richtung. Der Neigungswinkel muss so gewählt werden, dass die Auftriebskraft die Resultierende von Gewichtskraft und Zentrifugalkraft genau kompensiert (siehe Zeichnung). Dies erreicht man durch eine wohl dosierte Bewegung des Steuerknüppels nach rechts oder links mit Hilfe der Querruder.

Aufgaben:

- 6** Beschreibe, welche Stellung die Ruder bei einer Rechtskurve (bzw. Linkskurve) haben müssen.
- 7** Beim Geradeausflug ist die Auftriebskraft genauso groß wie die Gewichtskraft. Erläutere, warum die Auftriebskraft beim Kurvenflug größer als die Gewichtskraft ist. Woran erkennt man es im Kräftediagramm?
- 8** Zeichne das Kräftediagramm für eine Rechtskurve.

8.2 Start- und Landehilfen

Aufgaben:



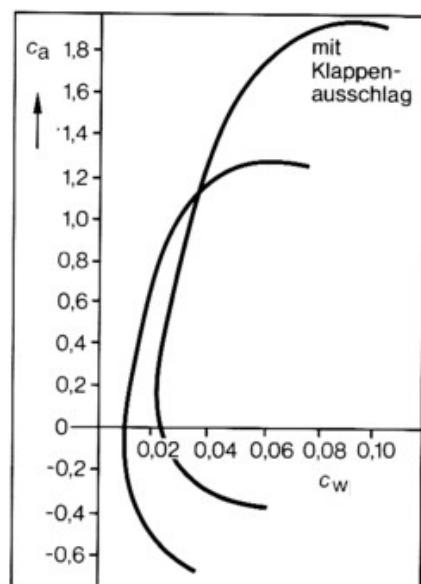
- 1** Beim Start muss im Moment des Abhebens der Auftrieb stark vergrößert werden. Wie dies geschieht, kann man an den beiden Bildern auf der Vorseite unten ablesen. Links ist das Flugzeug bei einer normalen Flugbewegung dargestellt (A), rechts das Flugzeug in einer Lage, die es einnimmt, wenn der Pilot den Steuerknüppel zu sich heranzieht, wenn also das Höhenruder nach oben klappt (B). Erläutere, warum in der Situation B der Auftrieb deutlich größer ist.
- 2** In der folgenden Abbildung ist eine andere Möglichkeit dargestellt, wie man den Auftrieb beim Start und bei der Landung vergrößern kann. Man bezeichnet die blau dargestellten Teile als **Landeklappen**. Erläutere, welche Größen in der Formel $F_A = 0,5 c_A \rho A v^2$ dadurch verändert werden und wieso sie verändert werden.

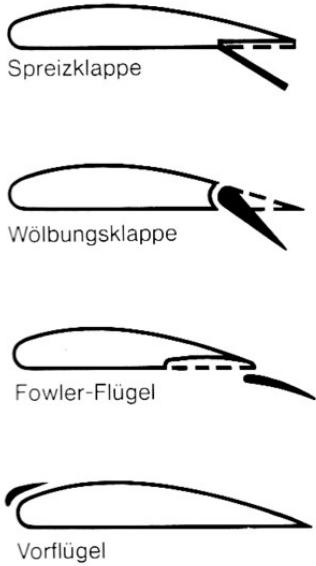


- 3** Nach dem Aufsetzen wird die Landeklappe am hinteren Ende der Tragfläche hochgeklappt. Warum macht man das?

GRUNDLAGEN: Start- und Landehilfen

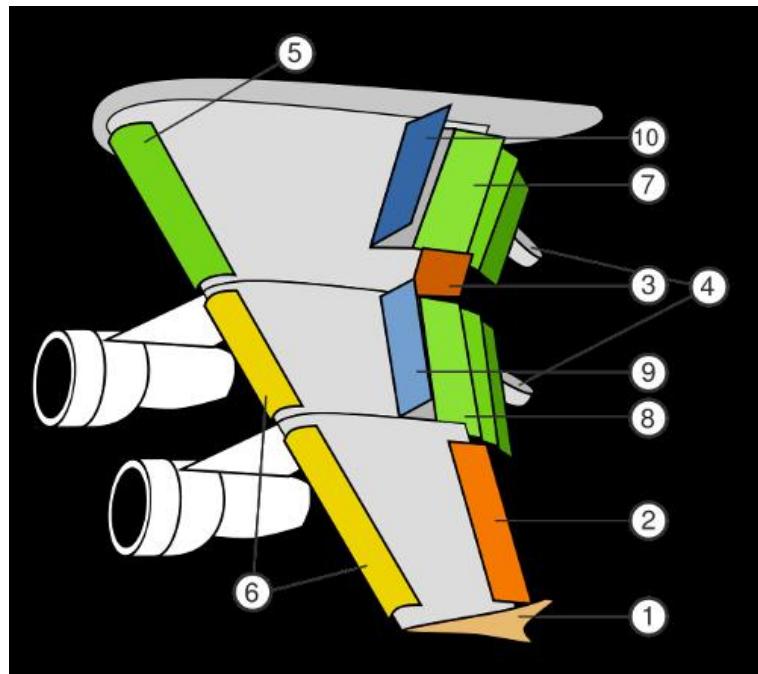
Beim Start muss beim Abheben der Auftrieb deutlich vergrößert werden. Wie wir aus den Überlegungen zum Polardiagramm wissen, kann man dies durch die Vergrößerung des Anstellwinkels erreichen. Da die Tragflächen fest am Flugzeugrumpf montiert sind, ist dies aber nur in engen Grenzen möglich. Durch das Absenken des Hecks mit Hilfe des Höhenruders bekommt man automatisch einen größeren Anstellwinkel, also auch einen größeren Auftrieb, sodass das Flugzeug zu steigen beginnt. Allerdings reicht dies insbesondere bei größeren Flugzeugen häufig nicht aus. Eine weitere Möglichkeit den Auftrieb zu vergrößern besteht in einer Vergrößerung der effektiven Fläche durch Ausfahren von Klappen an der Vorder- oder Rückseite der Tragfläche.





Auch eine Vergrößerung der Wölbung durch Herunterklappen einer Klappe führt zu einem höheren Auftriebsbeiwert. Die obenstehende Abbildung zeigt, wie sich das Polardiagramm durch Ausfahren der Start- und Landehilfen verändert. Dass die Kurve dabei insgesamt auch etwas nach rechts verschoben wird, liegt daran, dass die nach unten weisende Fläche der Landeklappen natürlich auch einen größeren Luftwiderstand erzeugt. In manchen Fällen werden die Klappen so angeordnet, dass sie gleichzeitig die effektive Fläche der Tragfläche und die Wölbung vergrößern (s. Abb.). Die durch die Slitzen zwischen Tragfläche und Klappe strömende Luft sorgt außerdem noch dafür, dass es nicht so leicht zum Strömungsabriss an der stark gekrümmten Gesamttragfläche kommt.

Die folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Klappen an der Tragfläche eines Großflugzeugs.

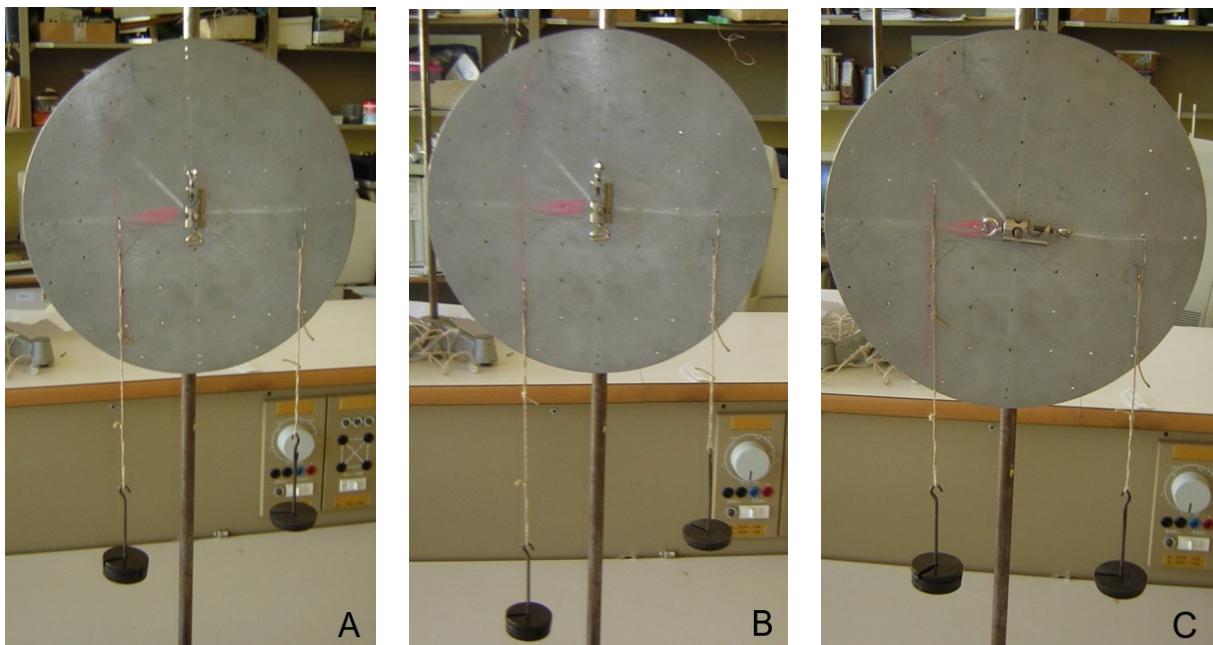


1: Winglet, 2: äußeres Querruder, 3: High-Speed-Querruder, 4: Landeklappen-Führung, 5: Krügerklappe, 6: Vorflügel, 7/8: Landeklappen (3-fach geschlitzt), 9/10: Störklappen.

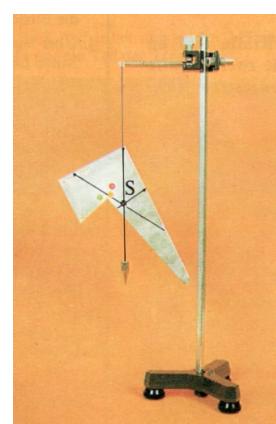
Die Winglets verhindern einen Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite der Tragfläche an den Flügel spitzen. Die Störklappen werden zum „Bremsen“ beim Sinkflug und beim Ausrollen auf der Landebahn eingesetzt. Vorflügel ermöglichen steilere Anstellwinkel ohne Strömungsabriss. Krügerklappen erhöhen den Auftrieb der Tragfläche.

8.3 Drehmomente und Stabilität

Experimente



- 1** Die Momentenscheibe ist eine Aluminiumscheibe mit zahlreichen Bohrungen, die im Abstand von 3 cm in einem quadratischen Raster angelegt sind. Die Löcher dienen zum Einhängen von Gewichtsstücken (siehe Abbildungen). Die in der Abbildung verwendeten Gewichte haben eine Gewichtskraft von 0,5 N.
- Suche unterschiedliche Anordnungen, bei denen die Scheibe im Gleichgewicht bleibt.
 - Stelle die im Bild dargestellten Anordnungen ein und prüfe, was passiert, wenn man das Gleichgewicht stört, indem man die Scheibe geringfügig dreht. Im Fall C sollte bereits eine kräftige Erschütterung des Tisches ausreichen, um zu zeigen, welche besondere Art von Gleichgewicht vorliegt. Stelle fest, längs welcher Linie man den Angriffspunkt der Gewichtskraft verschieben kann, ohne das Gleichgewicht zu stören.
- 2** Eine beliebig geformte Scheibe wird nacheinander an mindestens drei verschiedenen Aufhängepunkten drehbar aufgehängt. Vom Aufhängepunkt hängt jeweils ein Lot nach unten, dessen Lage auf der Scheibe mit einem Bleistift markiert wird. Auf diese Weise erhält man mehrere Schwerelinien (siehe Abbildung). Was lässt sich über die Lage der Schwerelinien feststellen?
- 3** Der Schnittpunkt der Schwerelinien wird als Schwerpunkt bezeichnet. Lege die Scheibe aus Versuch 2 so auf den Zeigefinger, dass sich der Schwerpunkt genau auf der Fingerkuppe befindet. Was stellt man fest?

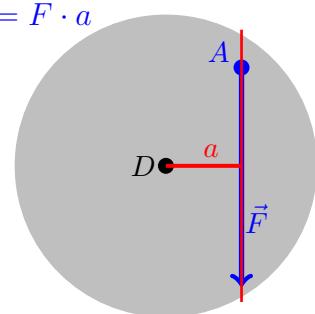


GRUNDLAGEN: Drehmomente

Ob ein starrer Körper (z. B ein Hebel oder eine Scheibe) im Gleichgewicht bleibt oder sich dreht, wenn Kräfte an ihm angreifen, hängt davon ab, ob sich die zugehörigen Drehmomente ausgleichen oder nicht.

Der Angriffspunkt einer Kraft kann längs einer Linie, der sog. **Wirkungslinie** verschoben werden, ohne dass sich das zugehörige Drehmoment ändert. Die Wirkungslinie geht durch den Angriffspunkt in Richtung der angreifenden Kraft. Das zugehörige Drehmoment M wird definiert als Produkt **Kraft** \times **Kraftarm**, wobei der Kraftarm der Abstand des Drehpunktes von der Wirkungslinie ist (Länge des Lotes von Drehpunkt auf die Wirkungslinie).

$$M = F \cdot a$$

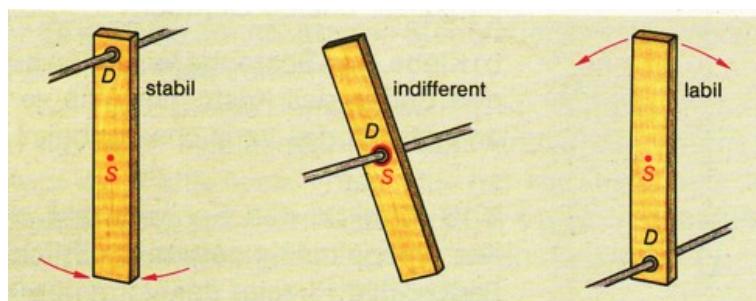


Im oben dargestellten Beispiel haben wir auf der linken Seite stets eine Gewichtskraft von 1,5 N mit unterschiedlichen Angriffspunkten, aber stets gleicher Wirkungslinie, die vom Drehpunkt einen Abstand von 6 cm hat. Das zugehörige Drehmoment beträgt also 0,09 Nm (Newtonmeter). Auf der rechten Seite haben wir eine Gewichtskraft von 1 N im Abstand von 9 cm, also ebenfalls ein Drehmoment von 0,09 Nm. Die beiden Drehmomente neutralisieren sich demnach und die Scheibe ist im Gleichgewicht.

GRUNDLAGEN: Schwerpunkt und Gleichgewichtsarten

Die Schwerkraft greift an einem Körper nicht an einem bestimmten Punkt an, sondern über den gesamten Körper verteilt. Ein drehbar aufgehängter Körper verhält sich aber so, als ob die Schwerkraft an einem ganz bestimmten Punkt angreifen würde. Man bezeichnet diesen Punkt als **Schwerpunkt** des Körpers.

Befindet sich der Schwerpunkt eines Körpers genau unterhalb des Aufhängepunktes, so bleibt der Körper in einem **stabilen Gleichgewicht**, da die Wirkungslinie der Schwerkraft (Schwerelinie) durch den Drehpunkt geht, das Drehmoment also gleich 0 ist. Bewegt man den Körper geringfügig zur Seite, sodass die Schwerelinie nicht mehr durch den Aufhängepunkt geht, so gibt es ein rücktreibendes Drehmoment, das bewirkt, dass der Körper in die stabile Gleichgewichtslage zurückkehrt. Befindet sich der Schwerpunkt genau oberhalb des Aufhängepunktes, so ist das Drehmoment ebenfalls gleich 0. Eine seitliche Auslenkung liefert jetzt aber ein Drehmoment, das die Auslenkung vergrößert. Das Gleichgewicht ist deswegen **labil**. Wenn Drehpunkt und Schwerpunkt zusammenfallen, gibt es nie ein Drehmoment, sodass jede beliebige Lage eingenommen werden kann. Man bezeichnet dies als **indifferentes Gleichgewicht**.



Aufgaben:

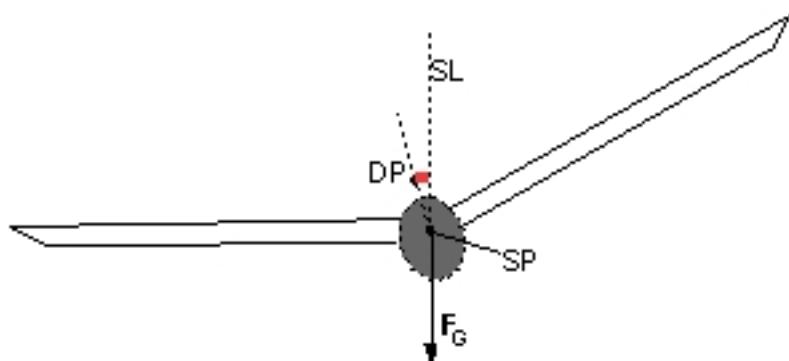
- 1 Überlege, warum für ein Flugzeug, das gut steuerbar sein soll, das indifferenten Gleichgewicht optimal ist.
- 2 Anders als bei unseren Probekörpern wird ein Flugzeug nicht an einem Haken aufgehängt. Welche Kraft übernimmt die Funktion der Haltekraft des Hakens?
- 3 Warum wird bei einem Balsa-Gleitflieger, wie wir ihn früher gebaut haben, ein stabiles Gleichgewicht angestrebt. Wie erreicht man es?

GRUNDLAGEN: Druckpunkt, Schwerpunkt und Stabilität

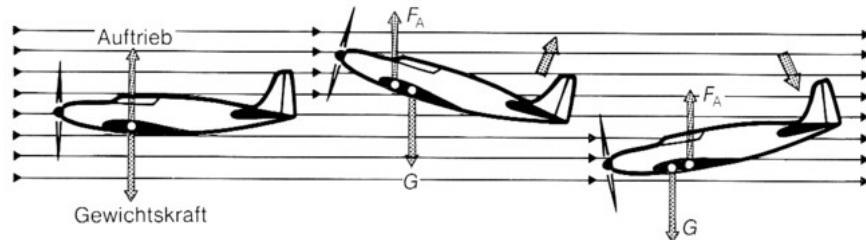
Auch die Druckkräfte an den Tragflächen greifen nicht an einem Punkt an, sondern über die gesamte Tragfläche verteilt. Ähnlich wie bei der Schwerkraft verhalten sich aber die Tragflächen so, als ob die Druckkräfte an einem bestimmten Punkt angreifen würden. Man bezeichnet diesen gewöhnlich als **Druckpunkt**. Da die Druckkräfte u. a. dafür sorgen, dass das Flugzeug nicht abstürzt, hat der Druckpunkt eine ähnliche Funktion wie der Aufhängepunkt im vorigen Abschnitt. Allerdings hat der Druckpunkt keine feste Lage, da die Druckkräfte erheblich vom Anstellwinkel abhängen. Je nach Anstellwinkel wandert er also hin und her.

Für ein gut steuerbares Flugzeug ist es wichtig, dass es so ausgetrimmt ist, dass es sich nahe am indifferenten Gleichgewichtszustand befindet. Eine leichte Tendenz zum stabilen Gleichgewicht kann auch wünschenswert sein. Es spricht dann aber nicht so gut auf Steuerbewegungen an. Insbesondere bei Modellsegelfliegern benötigt man eine stabile Gleichgewichtslage, wenn sie nicht steuerbar sind.

Das indifferenten Gleichgewicht stellt sich ein, wenn Schwerpunkt und Druckpunkt zusammenfallen. Liegt der Druckpunkt (DP) oberhalb des Schwerpunktes (SP) wie in der Abbildung unten, so erhalten wir ein stabiles Gleichgewicht. Die Schwerelinie (SL) geht rechts am Druckpunkt vorbei, d.h. die Gewichtskraft (F_G) erzeugt ein Drehmoment im Uhrzeigersinn bezüglich des Druckpunktes. Das Flugzeug kehrt dadurch automatisch in die Gleichgewichtslage zurück, wenn es diese durch eine Störung verlassen hat. Dies ist insbesondere bei den nicht steuerbaren Gleitflugmodellen wichtig. Eine Verlagerung des Druckpunktes nach oben erreicht man durch die **V-Stellung der Tragflächen**. Er liegt etwa in der Mitte zwischen den beiden Tragflächenmitteln auf der Symmetriearchse des Flugzeugs. V-Flügel sorgen insgesamt für eine deutlich stabilere Fluglage hinsichtlich Drehungen um die Längsachse.



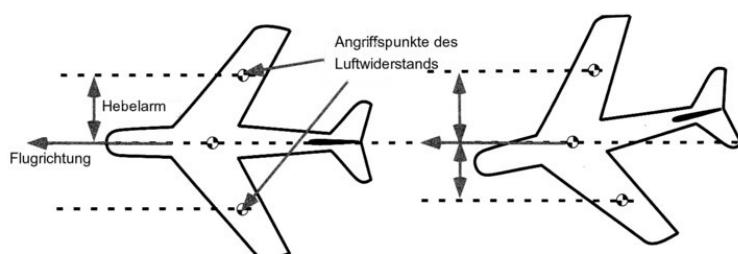
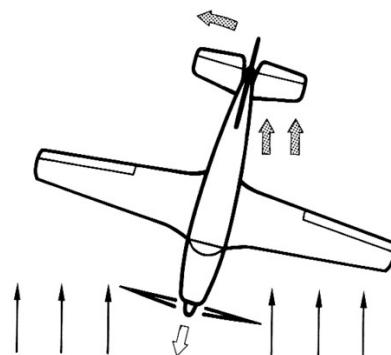
Mindestens genauso wichtig ist aber auch eine Stabilität hinsichtlich Drehungen um die Querachse, insbesondere weil der Druckpunkt sich je nach Anstellwinkel mehr nach vorn oder hinten verlagert, während der Schwerpunkt eine feste Lage hat. Diese Schwankungen kann man mit dem Heckleitwerk ausgleichen, das wegen seiner geringen Größe nur sehr wenig zum Auftrieb beiträgt, wegen des langen Hebelarms aber ein nennenswertes Drehmoment erzeugt.



In der linken Abbildung bei Geradeausflug fallen Druck- und Schwerpunkt nahezu zusammen. In der mittleren Abbildung liegt der Druckpunkt vor dem Schwerpunkt, sodass ohne Heckleitwerk die Spitze des Flugzeugs noch weiter nach oben und das Heck nach unten gehen würde. Dies wird durch den Auftrieb am Heck verhindert, der ein entgegengesetztes Drehmoment erzeugt und so das Flugzeug in einer stabilen Lage hält oder zurückführt. In der rechten Abbildung ist es genau umgekehrt. Da jetzt der Schwerpunkt vor dem Druckpunkt liegt, würde die Spitze des Flugzeugs weiter nach unten und das Heck nach oben gehen. Dies wird durch die Stellung des Heckleitwerkes verhindert, an dem eine Kraft nach unten erzeugt wird. Auf diese Weise erreicht man eine **Querstabilität**, die zur Vermeidung von unkontrollierten Nickbewegungen wichtig ist.

Ganz analog erhält man eine Stabilität bezüglich der Hochachse, die sog. **Richtungsstabilität**. Macht ein Flugzeug etwa durch eine kurze Windbö eine ungewollte Gierbewegung, so wird das Seitenleitwerk am Heck schräg angeblasen. Der Fahrtwind drückt dann das Heck wieder zurück in die gewünschte Lage.

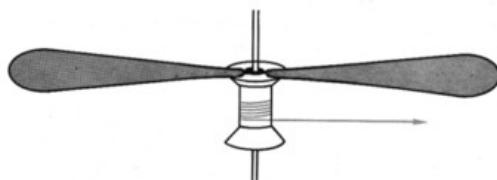
Ebenfalls zur Stabilität bezüglich Drehungen um die Hochachse tragen **gepfeilte Tragflächen** bei (siehe Aufgabe 4).



- 4** Erläutere an Hand der obigen Abbildung, warum sich das Flugzeug im rechten Bild auf Grund der Pfeilform der Tragflächen wieder in die normale Flugrichtung dreht. Argumentiere mit den Drehmomenten, die von den Widerstandskräften der beiden Tragflächen erzeugt werden.

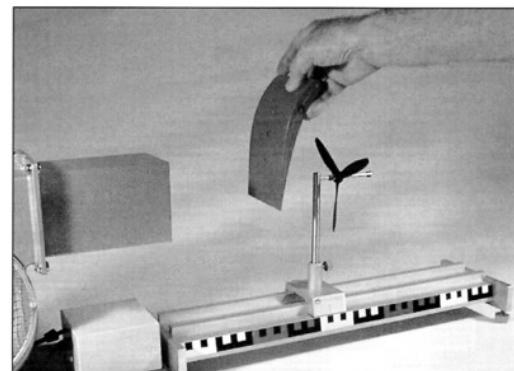
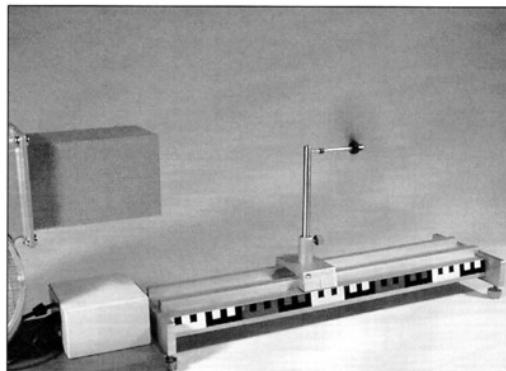
8.4 Propeller- und Düsenantrieb

Experimente



1 Schneide einen Propeller mit zwei Blättern aus Pappe aus und klebe ihn auf eine Garnrolle (siehe Abb.). Befestige ein Zugseil an der Garnrolle und schiebe sie auf eine lange Stricknadel oder dünne Röhre. Bringe den Propeller dann in schnelle Drehung und prüfe seine Winderzeugung mit einer Kerzenflamme.

2 Verdrehe jetzt die beiden Propellerblätter etwas in sich, so dass sie einen kleinen Anstellwinkel bekommen und wiederhole den Versuch 1. Hat sich etwas geändert?



- 3** Baue den Versuch der obigen Abbildung entsprechend auf. Die Luftschaube wird auf die Achse gesteckt und mit den Klemmschrauben so fixiert, dass sie über die gesamte Länge der Achse gleiten kann. Die Profilschiene wird vor den Winderzeuger gestellt, die Schraube in die dem Winderzeuger nächstgelegene Position geschoben und die Windgeschwindigkeit durch allmähliches Öffnen der Abdeckung so lange erhöht, bis die Schraube schnell rotiert. Was passiert dabei?
- 4** Während die Schraube noch schnell rotiert, wird der Luftstrom unterbrochen (siehe rechtes Bild). Beobachte das Verhalten der Luftschaube.

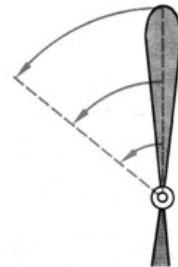
GRUNDLAGEN: Propellerantrieb (I)

Die Propellerblätter „erfassen“ beim Rotieren die Luftteilchen und schleudern sie nach hinten. Dabei entsteht als Gegenkraft nach vorn der so genannte **Schub**, der das Flugzeug antreibt. Der Anstellwinkel der Blätter ist wesentlich für das Funktionieren des Propellers, da nur dadurch die Ablenkung der Luft gewährleistet wird. Man kann den Propeller als rotierende Tragfläche auffassen. Auf Grund seiner Anordnung wirkt der Auftrieb jetzt aber als Vortrieb. Moderne Propeller sind nicht starr mit der Drehachse verbunden, sondern so, dass der Anstellwinkel verstellt werden kann. Beim Schnellflug benötigt man

auf Grund der anderen Strömungsverhältnisse andere Anstellwinkel als beim Start. Die Einstellung vollzieht der Propeller automatisch, sodass er stets optimal auf die Geschwindigkeit eingestellt ist.

Aufgaben:

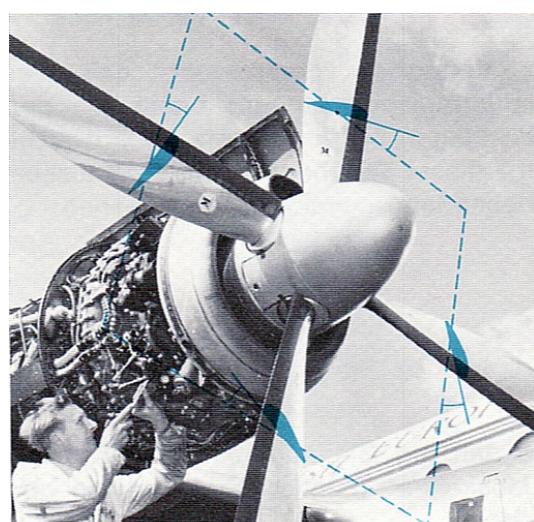
- 1** Betrachte die Abbildung rechts. Vergleiche die Geschwindigkeiten eines Punktes an der Spitze des Propellerblattes, in der Mitte des Blattes und nahe der Achse. Was bedeutet das für die Vortriebskraft an den jeweiligen Stellen, die sich mit der Formel $F = 0,5c_V \rho A v^2$ berechnen lässt?
- 2** Überlege, warum ein Propellerblatt geschränkt sein muss, d.h. warum das Blatt in sich so „verdrillt“ ist, dass der Anstellwinkel außen wesentlich kleiner ist als innen. Schaue dir den Propeller eines Modellflugzeuges dahingehend an.



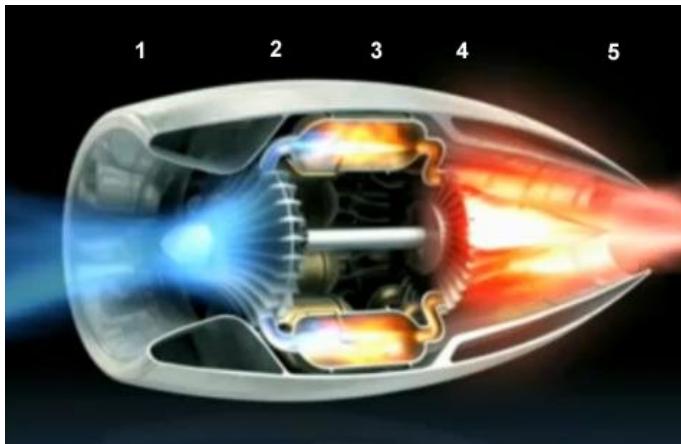
GRUNDLAGEN: Propellerantrieb (II)

Bei gleich bleibendem Anstellwinkel würden die Spitzen des Propellers auf Grund der größeren Drehgeschwindigkeit wesentlich größere Vortriebskräfte erzeugen als die nahe an der Achse liegenden Teile des Propellers. Diese ungleichmäßige Belastung des Propellers hätte seine Zerstörung zur Folge. Man gleicht das dadurch aus, dass man den Anstellwinkel umso größer macht, je geringer die Drehgeschwindigkeit an dieser Stelle ist. Diese Formgebung bezeichnet man als **Verschränkung** der Blätter.

Man kann die Drehgeschwindigkeit der Propeller nicht beliebig erhöhen, denn wenn sich die Geschwindigkeit an den Spitzen der Blätter der Schallgeschwindigkeit nähert, steigt der Luftwiderstand enorm an. Die dabei auftretenden Kräfte sind so groß, dass der Propeller zerstört werden kann. Wenn die Drehgeschwindigkeit der Spitzen 80 % der Schallgeschwindigkeit überschreitet, verringert sich der Schub rapide. Deswegen kann man die Geschwindigkeit von Propellermaschinen nicht beliebig erhöhen. Der Weltrekord steht heute bei 798 km/h. Für höhere Geschwindigkeiten braucht man ein anderes Antriebssystem: das Strahltriebwerk.



GRUNDLAGEN: Strahltriebwerke



Das Strahltriebwerk besteht aus 5 wichtigen Teilen:

- dem Lufteinlass (1),
- dem Kompressor (2),
- den Brennkammern (3),
- der Turbine (4) und
- der Düse (5).

Durch den Lufteinlass gelangt eine wesentlich größere Luftmenge in das Triebwerk ein als für die Verbrennung benötigt wird, da ein Teil der Luft später an der Brennkammer vorbeiströmt und diese von außen kühlt. Die Schaufelblätter des Kompressors (Verdichters) ergreifen die Luft und pressen sie weiter zusammen. Dabei steigen Druck und Temperatur der Luft stark an. Die heiße Luft wird in die Brennkammern gepresst, wo der Brennstoff Kerosin eingepritzt wird, der sich in der heißen Luft sofort entzündet. Dabei werden Temperaturen von bis zu 2000°C erreicht (Wandkühlung notwendig). Die austretenden heißen Verbrennungsgase treffen auf die außen an der Brennkammer vorbeigeführte Kühlungsluft und vermischen sich mit dieser. Dieses Gemisch trifft mit knapp über 1000°C und einer Geschwindigkeit von 200 km/h auf die Schaufelräder der Turbine und treiben diese an. Diese ist über die Hauptwelle mit dem Verdichter verbunden und erreicht Drehzahlen von 10 000 U/min. Hinter der Turbine strömen die Gase durch eine verengende Düse und werden dadurch noch einmal schneller. Sie verlassen diese mit einer Geschwindigkeit von ca. 600 km/h. Die Verbrennungsgase werden mit großer Kraft nach hinten beschleunigt. Die Gegenkraft sorgt entsprechend für den Vortrieb des Flugzeugs.

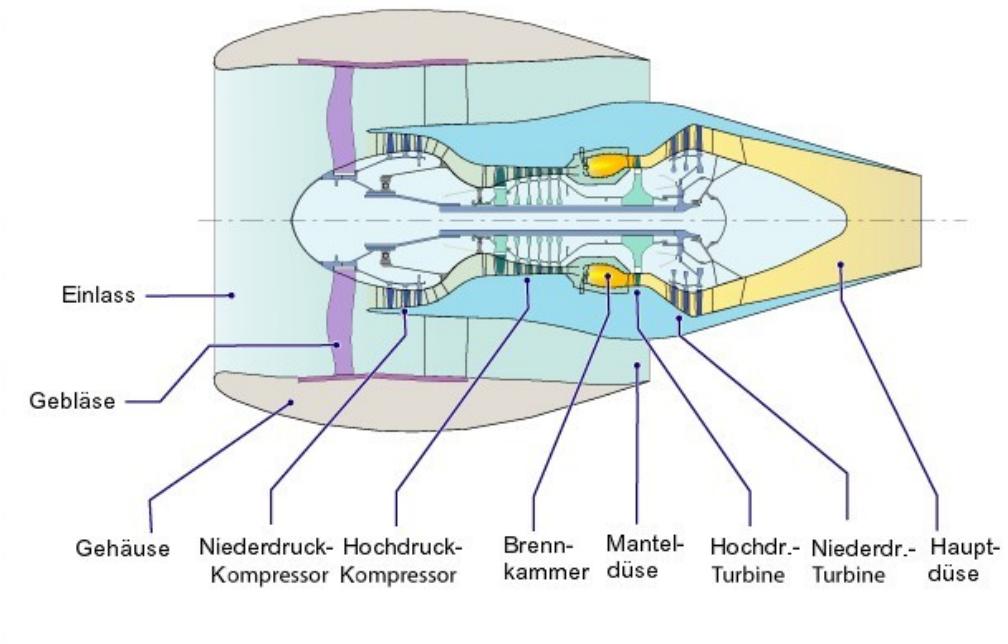
Kontrollfragen:

- 1 Warum wird im Lufteinlass das 3 - 4-fache der zur Verbrennung notwendigen Luftmenge angesaugt?
- 2 Warum muss die Brennkammer von außen gekühlt werden?
- 3 Wozu dient die Turbine?
- 4 Warum benötigt das Triebwerk zum Anlaufen einen Hilfsmotor (Anlasser)?
- 5 Welche Aufgabe hat die Düse?
- 6 Was treibt das Flugzeug schließlich voran?

Weitere Möglichkeiten der Leistungssteigerung

1. Der **Nachbrenner** erhöht kurzzeitig den Schub, indem in die heißen Abgase der Düse Treibstoff eingespritzt wird, der dort verbrennt und die Gase auf höhere Geschwindigkeiten bringt. Allerdings ist der Wirkungsgrad verhältnismäßig schlecht. Man benötigt den zusätzlichen Schub z. B. zum Überwinden des vergrößerten Luftwiderstandes, wenn die Schallgeschwindigkeit überschritten wird.
2. In den Verdichter oder die Brennkammer wird Wasser eingespritzt, wodurch der Massendurchstrom und damit der Schub vergrößert wird.
3. Das **Mantelstromtriebwerk** (oder Turbofan-Triebwerk) führt einen Teil der Luft, die von einem sehr großen Ventilator (engl. fan) angesaugt wird, um das eigentliche Triebwerk herum und lässt es durch eine Manteldüse wieder austreten. Natürlich erzeugt auch diese Luft einen zusätzlichen Schub und steigert somit den Wirkungsgrad des Getriebes. Außerdem wird der Triebwerkslärm dadurch deutlich gemildert. Auffallend ist der riesige Lufteinlass. Angetrieben wird der Ventilator ebenfalls von der Turbine aus über eine durchgehende Antriebswelle. In der folgenden Abbildung sind Verdichter und Turbinen außerdem noch zweistufig, was ebenfalls zur Verbesserung des Wirkungsgrades beiträgt.

Mantelstromtriebwerk



8.5 Gemischte Aufgaben

Eines der bekanntesten Flugzeuge aller Zeiten ist der sog. *Jumbo Jet* (Boeing 747), obwohl er inzwischen von anderen Flugzeugtypen abgelöst wird. Es folgen jetzt einige Aufgaben, die sich auf diesen Flugzeugtyp beziehen. Zunächst einige Daten über den Jumbo-Jet:

- Masse (vollbeladen) am Start: 397 000 kg
- Maximale Passagierzahl: 350 - 500 (je nach Ausstattung)
- Normale Reisegeschwindigkeit: 912 km/h
- Schubkraft der Triebwerke: $4 \times 280\,000 \text{ N}$
- Treibstoffverbrauch: 12 800 l/h.



- 1 Erläutere, warum man die Schubleistung aus der Schubkraft durch Multiplikation mit der Geschwindigkeit (in m/s) bekommt.
- 2 Berechne die Gesamtleistung aller vier Triebwerke zusammen beim normalen Reiseflug.
- 3 Eine typische PKW-Leistung liegt bei 70 kW. Vergleiche die Leistung des Jumbos mit der eines solchen PKW's.
- 4 Ein PKW hat auf 100 km einen Treibstoffverbrauch, der je nach Typ und Fahrweise zwischen 5 und 10 l liegt. Wir gehen hier von 7 l pro 100 km aus. Berechne den Treibstoffverbrauch der Boeing 747 auf 100 km.
- 5 Aussagekräftiger ist es, wenn man den Prokopfverbrauch auf 100 km berechnet. Dazu nehmen wir an, dass das Flugzeug voll besetzt ist (Personal wird nicht mitgerechnet). Berechne jetzt den Prokopfverbrauch beim Jumbo auf 100 km (für 400 Passagiere) und vergleiche ihn mit dem bei einem vollbesetzten PKW (4 Personen).

6 Ein Jumbo-Jet fliegt in 8 Stunden von Frankfurt nach New York. Wie viel Treibstoff wird benötigt?

Weitere Kontrollfrage

7 Welche Bewegung wird mit dem Seitenruder (dem Höhenruder, dem Querruder) erzeugt?

8 Warum müssen beim Kurvenflug Seiten- und Querruder gleichzeitig betätigt werden?

9 Wie müssen die Ruder beim Durchfliegen einer Rechtskurve eingestellt werden?

10 Wodurch wird die Richtungsstabilität erreicht?

11 Wie kann man den Schwerpunkt einer unregelmäßig geformten Papp scheibe ermitteln?

12 Welche Gleichgewichtsarten sind dir bekannt?

13 Was versteht man unter dem Druckpunkt?

14 Wozu dient die V-Form bei Tragflächen?

15 Welchen Vorteil haben gepfeilte Tragflächen?

16 Wozu dienen Vorflügel und Landeklappen an der Tragfläche?

17 Wie verändert sich das Polardiagramm, wenn die Start- und Landeklappen ausgefahren werden?

18 Welche Aufgaben haben die sog. Störklappen?

19 Inwiefern bewegen sich Propellerspitzen schneller als weiter innen gelegene Teile des Propellers?

20 Warum müssen Propellerblätter „verschränkt“ sein?

21 Wodurch wird die Umdrehungsgeschwindigkeit von Propellern nach oben begrenzt?

22 Warum hat ein Mantelstromtriebwerk eine höheren Wirkungsgrad als ein einfaches Düsentriebwerk?

23 Wozu dient ein Nachbrenner im Düsentriebwerk und wann wird er eingesetzt?

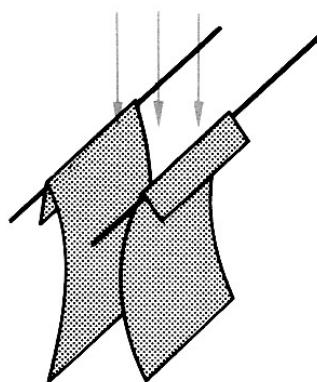
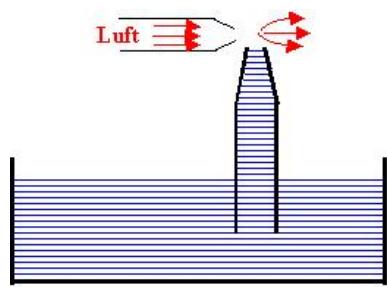
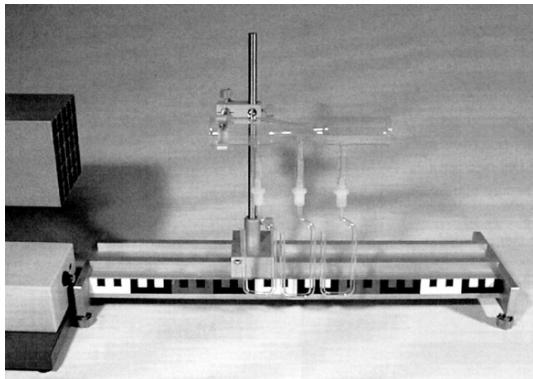
24 Nenne die fünf wesentlichen Bestandteile eines Düsentriebwerks?

9 Allgemeine Aerodynamik mit Anwendungen

Die hier kennengelernten Gesetzmäßigkeiten spielen natürlich nicht nur in der Flugphysik eine Rolle, sondern in vielen anderen Bereichen unserer Lebenswelt. Das soll hier an einigen Beispielen verdeutlicht werden.

9.1 Das Gesetz von Bernoulli

Experimente



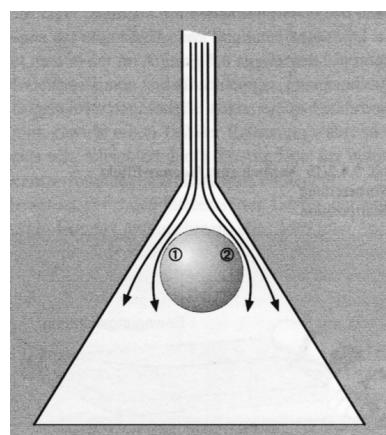
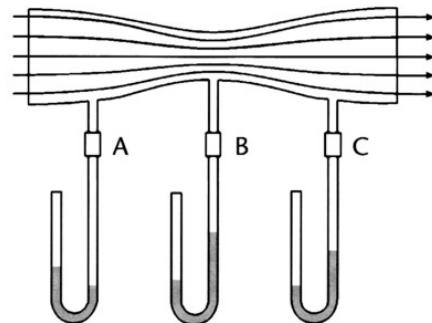
- 1 Das sog. **Venturi-Rohr** (s. Abb.) wird wie in der Abbildung dargestellt vor der Windmaschine aufgebaut. Die drei U-Rohr-Manometer werden mit gefärbtem Wasser gefüllt, sodass die Flüssigkeit in allen Schenkeln ungefähr gleich hoch steht. Dann werden die U-Rohr-Manometer in die Kupplungen am Venturi-Rohr gesteckt. Die Windmaschine wird angeschaltet und auf maximalen Luftstrom eingestellt. Die Druckanzeige in den U-Rohren wird beobachtet.
- 2 Zwei Düsen sind orthogonal zueinander angeordnet. Durch die waagerechte wird Luft geblasen, während das untere Ende der senkrechten in ein Wasserreservoir getaucht wird. Beobachte die Wirkung. Wenn das Wasser gefärbt ist, kann man den Effekt noch besser beobachten.
- 3 Zwei rechteckige Pappstücke (z. B. Postkarten) werden wie im Bild dargestellt an einer Seite mit einer Falz zum Aufhängen versehen. Insgesamt wird die Fläche leicht gekrümmmt. Die beiden Pappstücke werden so auf Stricknadeln oder Lineale gehängt, dass eine Verengung zwischen ihnen entsteht. Dann wird zwischen ihnen hindurchgeblasen.
- 4 Ein Trichter wird mit der Öffnung nach unten gerichtet und ein Tischtennisball hineingehalten. Dann wird kräftig in das Trichterrohr geblasen und der Ball losgelassen. Beobachte die Wirkung auf den Ball. Das Experiment funktioniert nur bei genügend starkem Luftstrom.

GRUNDLAGEN: Das Bernoulli-Prinzip

Längs einer Stromlinie kann sich der Druck in der Strömung verändern. Im Versuch mit dem Venturi-Rohr haben wir vor der Engstelle einen Überdruck (A), weil sich die Luft staut und komprimiert wird, in der Engstelle (B) sinkt der Druck stark ab, sodass ein Unterdruck entsteht, während nach der Engstelle (C) nahezu Normaldruck herrscht. Die Luft kann nur durch die Engstelle hindurch, wenn sie sich dort schneller bewegt als vorher und nachher.

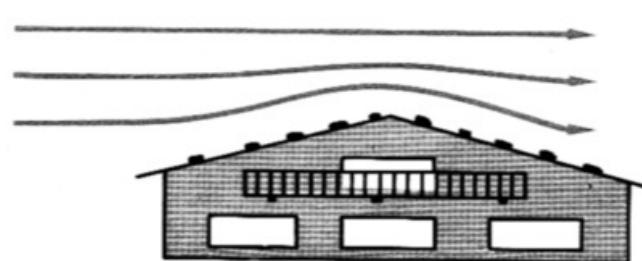
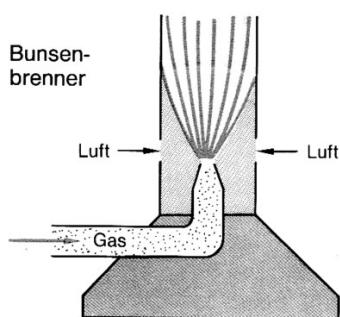
Der geringere Rohrquerschnitt wird durch größere Strömungsgeschwindigkeit ausgeglichen. Erhöhung der Geschwindigkeit bedeutet größere Bewegungsenergie, die durch Umwandlung aus Druckenergie entsteht. Deshalb sinkt der Druck in der Engstelle ab.

Alternativ kann man den Unterdruck natürlich auch mit dem Prinzip der gekrümmten Stromlinien erklären (s. o.), das wir bei der Behandlung der Druckverhältnisse an der Tragfläche kennengelernt haben. Im Bereich der gekrümmten Stromlinien erwarten wir zunächst einen Überdruck (vor der Engstelle) und dann einen Unterdruck (in der Engstelle).



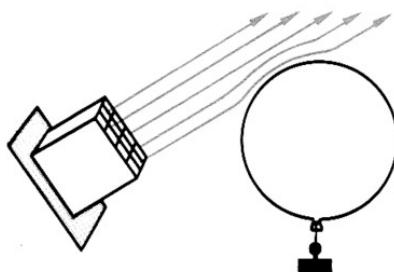
Aufgaben:

- 1** Die Flamme eines Bunsenbrenners benötigt für die optimale Verbrennung ein Gas-Luft-Gemisch. Dies erhält man, indem man am Fuß des Brenners eine ringförmige Luftpumpe öffnet, durch die Luft angesaugt und mit dem Gas gemischt wird. Erkläre mit dem Prinzip von Bernoulli und an Hand der Zeichnung (linkes Bild), warum Luft angesaugt wird.
- 2** Wenn starke Winde über das Dach wehen, wird dieses häufig mit Steinen beschwert (siehe rechte Abbildung). Wozu dienen die Steine?



- 3** Blase einen Luftballon auf und beschwere ihn unten mit einem 10-g-Gewicht. Halte ihn anschließend in den schräg nach oben gerichteten Luftstrom der Windmaschine. Erläutere, warum der Ballon nicht abstürzt. Zeichne dazu auch ein vollständiges Kräftediagramm (qualitativ).

Das gleiche Experiment kann man auch mit einem Fön und einem Tischtennisball durchführen.

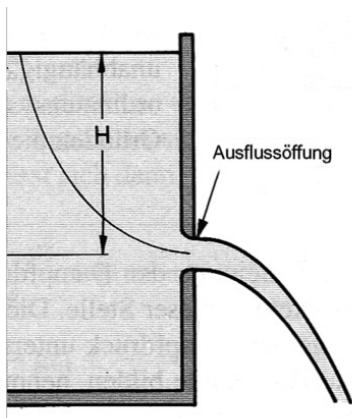


Exkurs: Die Bernoulli-Gleichung

In einigen besonders einfach gelagerten Fällen kann man das Bernoulli-Prinzip auch in Form einer einfachen Gleichung ausdrücken. Diese Gleichung gilt nur, wenn das strömende Medium praktisch nicht zusammendrückbar, also **inkompressibel**, ist und Reibung vernachlässigbar werden kann. In unserem oben durchgeführten Experiment gilt weder das eine noch das andere, sodass die Berechnung wesentlich schwieriger wird. Bei Flüssigkeiten, die durch Rohre strömen, sind diese Bedingungen unter bestimmten Umständen jedoch mit hinreichender Genauigkeit erfüllt. Es gilt dann bei einer gleichmäßigen, d.h. zeitlich nicht veränderlichen Strömung die folgende einfache Formel, die hier nicht vollständig hergeleitet werden kann.

$$p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = p_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

Wir erinnern uns aber, dass diese Formel im Prinzip schon bei der Behandlung des Staurohrs aufgetreten ist. Der Term $\frac{1}{2} \rho v^2$ hieß damals *Staudruck*. Die Einschränkungen, die wir hier gemacht haben, gelten auch für die Geschwindigkeitsmessungen mit dem Staurohr. Bei großen Geschwindigkeiten wird der Staudruck so groß, dass die Komprimierung der Luft im Staurohr nicht mehr vernachlässigt werden kann. Die Geschwindigkeit lässt sich dann nicht mehr mit der einfachen Formel $p_{st} = \frac{1}{2} \rho v^2$ berechnen, sondern auf komplizierteren Wegen.



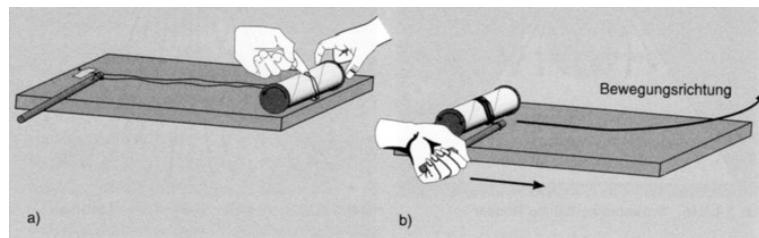
- 4** In einem Wasserbehälter ist in einer Tiefe H eine Ausflussöffnung, aus der das Wasser ausläuft. Erläutere, warum die Ausflussgeschwindigkeit mit der Formel

$$v = \sqrt{2gH}$$

berechnet werden kann. Darin ist g der Ortsfaktor. Verwende für die Druckberechnung im Innern die Formel für den Schweredruck in Flüssigkeiten.

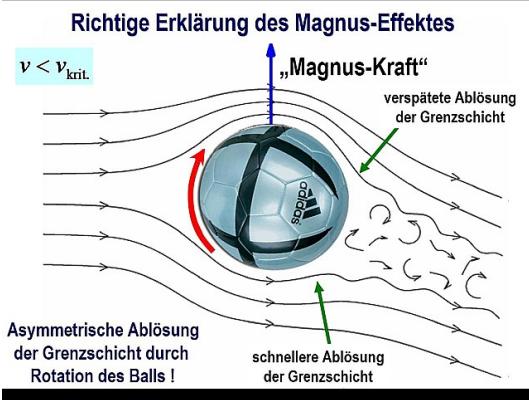
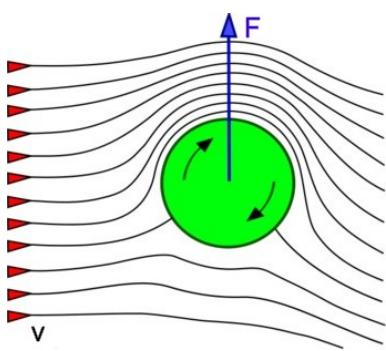
9.2 Der Magnuseffekt

Experimente



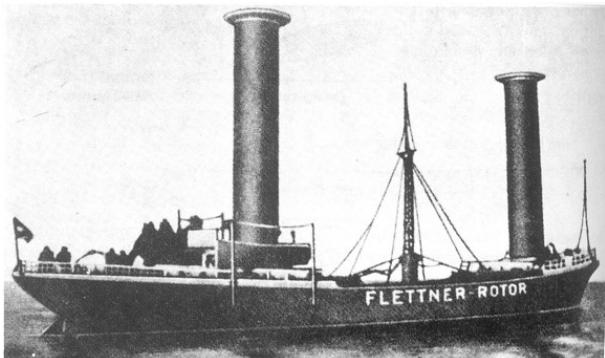
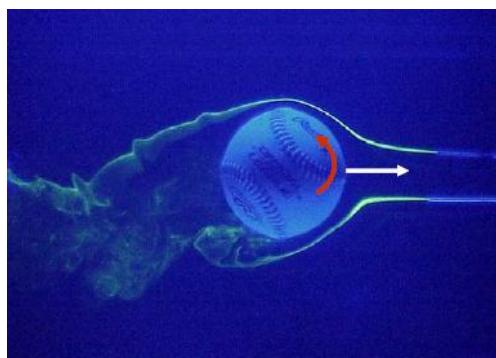
- 1 Eine Paprolle (z. B. Trägerrolle für Haushaltspapier) wird am Ende mit kreisförmigen Pappscheiben versehen. Dann wird ein Textilband oder ein Bindfaden wie in der Abbildung dargestellt um die Rolle gewickelt und anschließend schnell abgezogen. Das Band muss dabei so gewickelt sein, dass es sich beim Abziehen an der Unterseite der Paprolle von dieser ablöst. Die Bewegung der Rolle wird beobachtet.
- 2 In einem zweiten Versuch wird das Band (oder der Bindfaden) anders um die Paprolle herumgewickelt, sodass es sich beim Abziehen an der Oberseite der Rolle ablöst. Auch hier wird die Bewegung beobachtet.
- 3 Schau dir den Videoclip „magnusball.flv“ an und beschreibe die Bewegung des Fußballs.

GRUNDLAGEN: Der Magnuseffekt

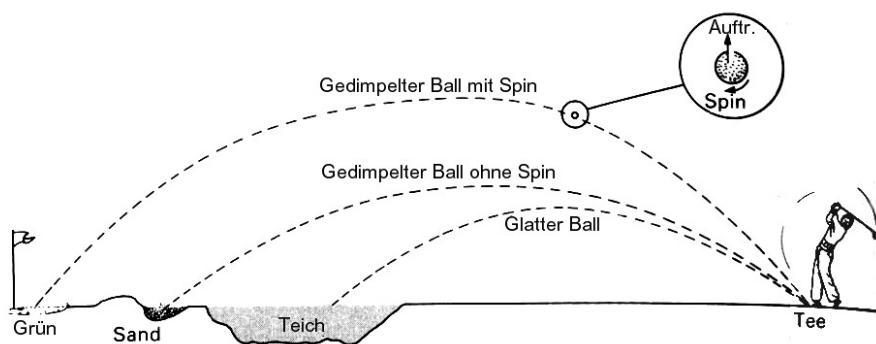


Die Paprolle im durchgeföhrten Experiment führt zwei verschiedene Bewegungen aus. Sie rotiert um die eigene Achse und bewegt sich gleichzeitig insgesamt schnell voran. Dabei strömt Luft an dem Zylinder vorbei (Fahrtwind). Durch die Rotation der leicht rauen Oberfläche wird die Luft auf der einen Seite (im Bild auf der Oberseite) in der Nähe des Zylinders (in der sog. Grenzschicht) mitgerissen, da sich Fahrtwind und Zylinderoberfläche gleichsinnig bewegen. Auf der anderen Seite (im Bild auf der Unterseite) bewegt sich die Zylinderoberfläche dem Fahrtwind entgegen und bremst ihn deshalb ab. Die Folge davon ist, dass sich die Luft auf der einen Seite (oben) schneller bewegt als auf der anderen (unten). Außerdem bewegt sich oben mehr Luft vorbei als unten. Größere Geschwindigkeit auf gekrümmten Stromlinien bedeutet aber auch hier niedrigerer Druck auf der Seite,

auf der Fahrtwind und Rotationsbewegung gleichsinnig sind, als auf der anderen. Dies führt zu einer Kraft quer zur Strömungsrichtung, durch die der rotierende Körper abgelenkt wird. Durch die unsymmetrische Ablösung des Luftstroms wird dieser insgesamt etwas abgelenkt (im Bild nach unten), was nach dem Prinzip von Kraft und Gegenkraft auch nötig ist, wie wir wissen. Das zweite Bild ist etwas näher an der Realität, da es zeigt, dass sich hinter dem Körper eine Art Totwasser ausbildet. Der Filmausschnitt zeigt den Flug eines *angeschnittenen* Balles, also eines Balles der im Flug rotiert. Die Rotation erzeugt eine Querkraft, die dazu führt, dass der Ball nicht geradeaus fliegt, sondern auf einer Kurve um die Abwehrmauer herum in das Tor.

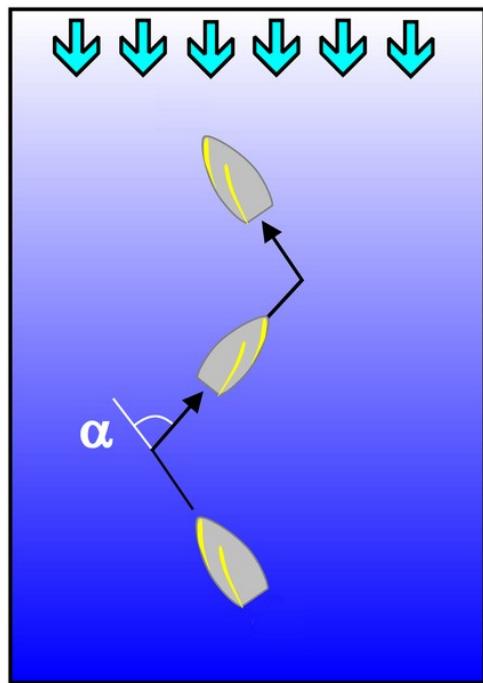


- 1** Interpretiere das Bild oben links von einem *angeschnittenen* Tennisball (d.h. rotierend) in einem Windkanal. Was zeigt der Stromlinienverlauf?
- 2** Der Erfinder Anton Flettner versuchte den Magnuseffekt als Schiffsantrieb zu nutzen. 1924 ließ er ein Segelschiff umrüsten, sodass es anstelle der Segel zwei große rotierende Zylinder bekam. Erläutere mit Hilfe des Magnuseffektes, wie das Schiff einen Vortrieb bekommt. Warum ist die optimale Windrichtung nicht 90° zur Bewegungsrichtung, sondern eher eine mittlere Lage zwischen Seiten- und Rückenwind (z. B. 120° zur Bewegungsrichtung)?

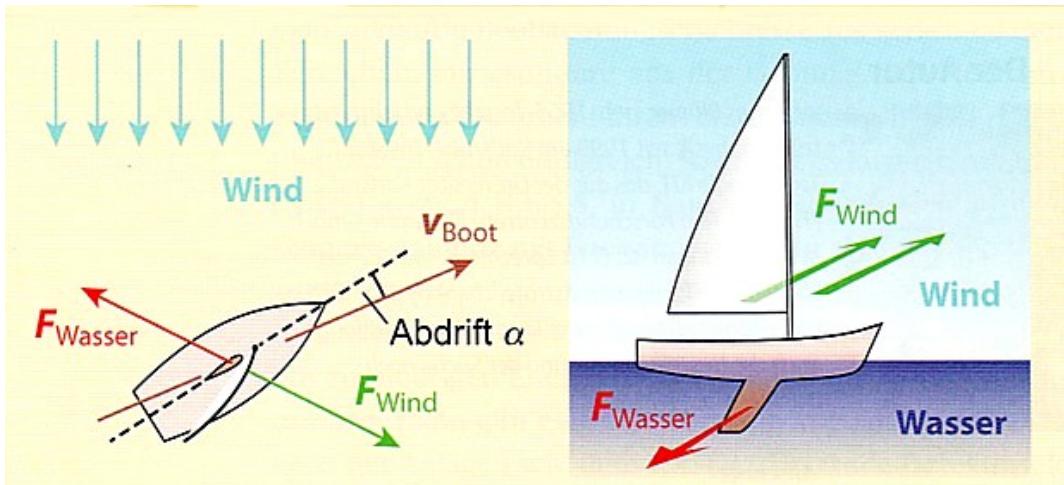


- 3** Erläutere, warum beim Golfspiel der Ball mit Spin weiter fliegt als der Ball ohne Spin, wenn er die gleiche Abfluggeschwindigkeit hat.
- 4** „Dimples“ sind kleine Vertiefungen in der Oberfläche, die dafür sorgen, dass die Strömung in der Grenzschicht um den Ball herum turbulent wird. Das hat zur Folge, dass die Strömung länger anliegt und das „Totwasser“ (Verwirbelungszone) hinter dem Ball schmäler wird. Erläutere, warum ein Ball ohne „Dimples“ stärker abgebremst wird als ein Ball mit „Dimples“.

9.3 Segeln am Wind



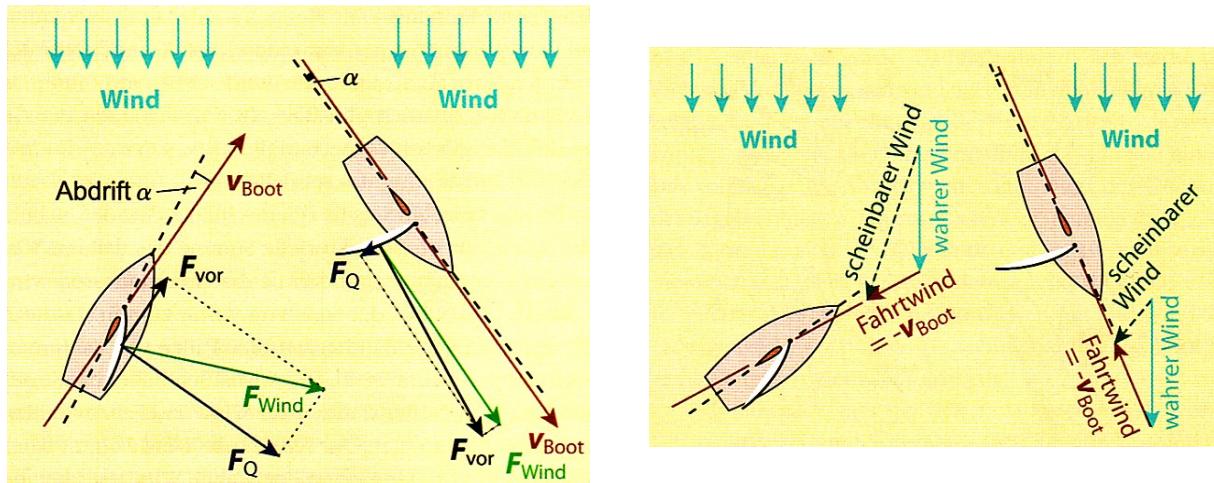
Segelschifffahrt im großen Stil war erst möglich, nachdem man gelernt hatte auch bei ungünstigen Winden das gewünschte Ziel durch Kreuzen vor dem Wind zu erreichen. Es ist zwar nicht möglich direkt gegen den Wind zu fahren, wohl aber schräg zum Wind, sodass man im Schnitt auch gegen die Windrichtung voran kommt, wenn man die Fahrtrichtung mehrfach in geeigneter Weise verändert (siehe Abbildung links). Wie dieses Segeln am Wind möglich ist, zeigt die folgende Abbildung. Für eine gleichmäßige Geradeausfahrt ist es notwendig, dass die vom Wind und die vom Wasser auf das Boot ausgeübten Kräfte sich gegenseitig aufheben, sodass das Boot weder abgebremst, noch beschleunigt wird. In der linken Bildhälfte erkennt man, dass das Segel wie eine Tragfläche im Windstrom steht und nach den gleichen Prinzipien behandelt werden kann.



Die Druckkräfte üben eine **Windkraft** ungefähr orthogonal zur Sehne des aufgeblähten Segels aus. Außerdem gibt es aber noch eine Art Unterwassersegel, die Kielflosse bzw. das Schwert, das genau in Richtung der Bootsachse gerichtet ist. Wenn die Fahrtrichtung des Bootes nicht mit der Bootsachse übereinstimmt, wenn also eine Abdrift vorliegt, verhält sich diese Flosse ebenfalls wie eine Tragfläche mit dem Abdriftwinkel als Anstellwinkel. Deswegen ergibt sich hier eine **Wasserkraft**, zu der allerdings auch der übrige Bootskörper einen Beitrag leistet. Bei einem passenden Abdriftwinkel ist diese Wasserkraft genauso groß wie die Windkraft.

Der Antrieb des Bootes wird von der Windkraft geleistet. Man zerlegt die Windkraft üblicherweise in zwei Komponenten, den Vortrieb F_{vor} und die Querkraft F_Q (siehe Abbildung auf der nächsten Seite). Die Querkraft ist nutzlos und muss durch entsprechende Wasserkräfte kompensiert werden. Der Vortrieb dient dazu den Wasserwiderstand des gesamten Bootskörpers zu überwinden, sodass das Boot vorwärts fährt. In der folgenden Abbildung ist diese Zerlegung für das Segeln am Wind (links) und für das Segeln bei raumem Wind

(rechts) dargestellt. Von raumem Wind spricht man, wenn der Wind schräg von hinten kommt. Natürlich ist die Vortriebskomponente bei raumem Wind erheblich größer als beim Segeln am Wind.



Ein motorgetriebenes Boot erfährt auch bei Windstille einen leichten Gegenwind, den sog. **Fahrtwind**. Seine Geschwindigkeit ist dem Betrage nach gleich der Bootsgeschwindigkeit, hat aber die entgegengesetzte Richtung. Dieser Fahrtwind tritt natürlich auch bei einem Segelboot auf, sodass man zwischen dem **wahren Wind** und dem **scheinbaren Wind** unterscheiden muss. Genau wie in der Fliegerei (Kapitel 2.3) gibt es hier ein Winddreieck: Wahrer Wind und Fahrtwind addieren sich nach der Vektorregel (siehe S. 39) zum scheinbaren Wind. Dies ist in der Abbildung oben rechts dargestellt. Der Segler im fahrenden Boot erfährt den scheinbaren Wind und nicht den wahren Wind. Du kennst dies vielleicht auch vom Fahrradfahren. Selbst wenn man exakt Seitenwind hat, hat man beim Fahren das Gefühl, der Wind kommt schräg von vorn, weil sich wahrer Wind und Fahrtwind vektoriell addieren.

Wenn oben festgestellt wurde, dass die Querkraft wirkungslos bleibt, so ist das nicht ganz richtig. Natürlich drückt sie das Segel und den Mast zur Seite, sodass das Boot in eine Schräglage kommt. Dieses Drehmoment würde zum Kentern des Bootes führen, wenn es keinen Gegeneffekt gäbe. Dieser wird durch das Gewicht des Bootskörpers und der Kielflosse ausgeübt. Je stärker sich das Boot neigt, desto größer wird das rücktreibende Moment des Gewichtes. Wenn beide Drehmomente gleich sind bleibt das Segelboot in dieser Schräglage. Bei leichten Booten kann es trotzdem notwendig sein den Schwerpunkt möglichst vom Druckpunkt der Windkräfte weg zu verlagern. Deshalb hängen sich die Insassen in kritischen Momenten über die Bordwand des Bootes, um so den Hebelarm der Schwerkraft zu vergrößern, also das rücktreibende Drehmoment zu vergrößern.



9.4 Kontrollaufgaben

- 1** Wie sieht ein Venturi-Rohr aus?
- 2** Was sagt das Bernoulli-Prinzip aus?
- 3** Nenne typische Anwendungsbeispiele für das Bernoulli-Prinzip.
- 4** Was versteht man unter dem Magnus-Effekt?
- 5** Nenne typische Sportarten, bei denen der Magnuseffekt wirksam ist.
- 6** Erläutere den Antrieb des Rotorschiffes von Flettner.
- 7** Warum hat sich der Rotor-Antrieb wohl nicht durchgesetzt?
- 8** Wie muss beim Golfspiel ein Ball angeschnitten werden, damit er infolge des Spins besonders weit fliegt?
- 9** Wie verändert der Spin beim Tennis die Flugbahn des Balles? Unterscheide zwischen Topspin und Backspin (Slice).
- 10** Wie bewegt sich ein Segelboot beim Kreuzen vor dem Wind?
- 11** Erläutere mit Hilfe einer Skizze, wie ein Segelboot vorankommt, wenn der Wind schräg von vorn kommt?
- 12** Erkäre den Unterschied zwischen wahrem Wind und scheinbarem Wind bei Segeln.

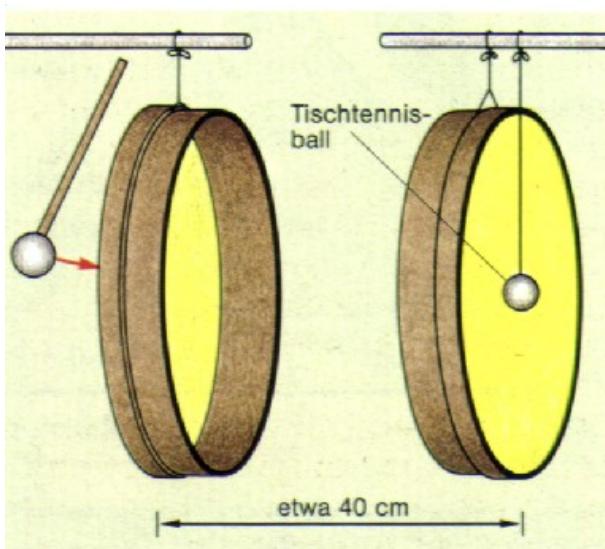
10 Überschallflug

10.1 Schall und Schallgeschwindigkeit

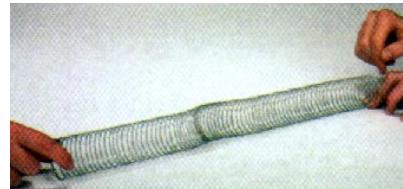
Zunächst lernen wir einiges über das Wesen des Schalles und die Ausbreitung des Schalles in Luft kennen, soweit es für unser Thema wichtig ist. Für eine umfassendere Einführung in die Akustik musst du dein Physikbuch zu Rate ziehen.

Experimente:

- 1 Befestige eine Trommel an einem Stativ und hänge einen Tischtennisball so auf, dass er das Trommelfell gerade berührt. Halte eine zweite Trommel in die Nähe und schlage leicht auf deren Trommelfell. Beobachte dabei den Tischtennisball.
- 2 Bespanne die Öffnung einer Pappröhre auf einer Seite mit einer Gummimembran (Luftballon) und lasse auf der anderen Seite eine etwa $2 \times 2\text{-cm}$ große Öffnung frei. Halte diese Öffnung in die Nähe einer Kerzenflamme und klopfe leicht auf die Membran. Beobachte die Kerzenflamme.



- 3 Eine lange Schraubenfeder liegt auf der Tischplatte oder auf dem Fußboden und wird leicht gespannt. An einem Ende wird eine kurze Auslenkung in Richtung der Feder verursacht (mit dem Finger oder einem Stab). Beobachte die Wanderung der Störung.

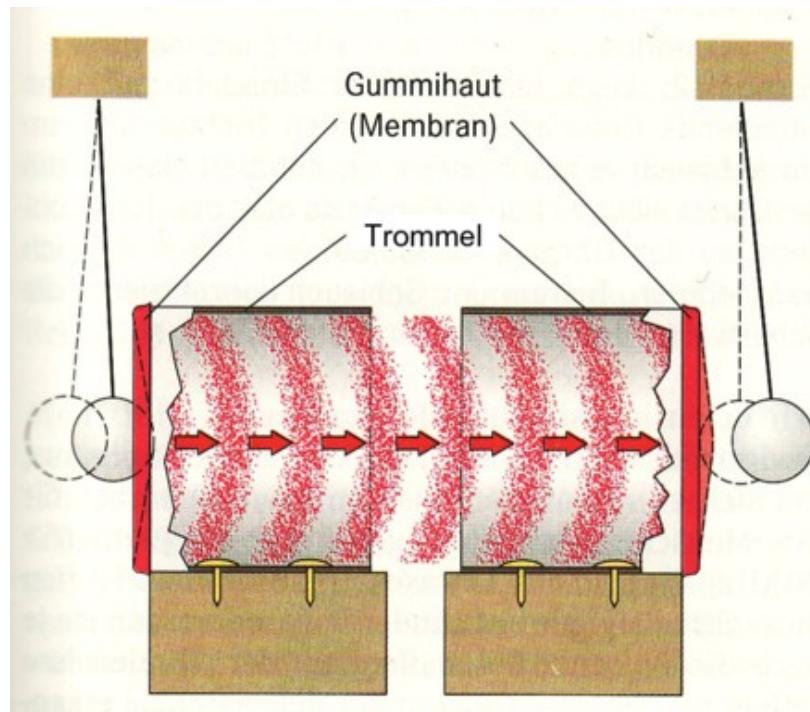
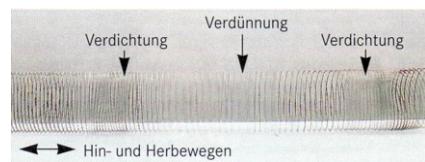


GRUNDLAGEN: Schallausbreitung

Die Experimente zeigen die Störung eines Gleichgewichtes. Im ersten Fall wird der Tischtennisball weggestoßen und pendelt für kurze Zeit, im zweiten flackert die Kerze, nachdem man auf die Membran geklopft hat. Das Klopfgeräusch ist deutlich zu hören. Die Ursache für die Störung befindet sich nicht am Ort, wo sie auftritt, sondern in einiger Entfernung,

wo nämlich auf die Membran geklopft wird. Der dritte Versuch zeigt, wie die Störung durch die gespannte Feder von einem Ende zum anderen wandert. Dabei verändern sich die Abstände zwischen den Windungen der Schraubenfeder, sie „verdichtet“ oder verdünnt sich. Diese Beobachtung liefert uns auch eine Erklärung für die beiden ersten Experimente.

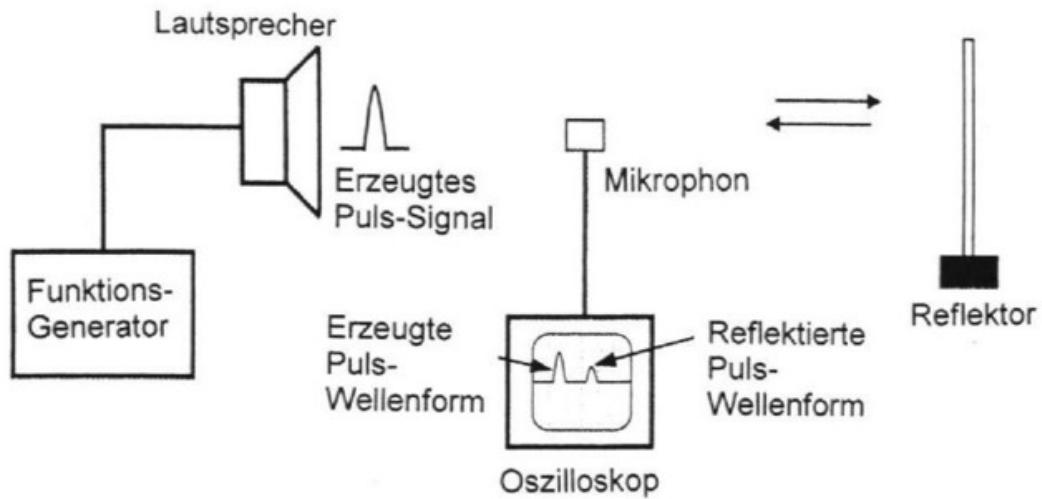
So wie sich die Schraubenfeder abwechselnd „verdichtet“ und „verdünnt“ und so die Störung transportiert, verdichtet und verdünnt sich auch die Luft hinter der Membran und leitet so den Schall weiter. Die damit verbundene Bewegung verursacht das Schwingen der zweiten Membran und des Tischtennisballes bzw. das Flackern der Kerze. Eine Verdichtung der Luft erzeugt auch eine Erhöhung des Luftdruckes in diesem Bereich. Das folgende Bild veranschaulicht die Zonen größerer und kleinerer Dichte zwischen den Membranen. Die damit verbundenen Veränderungen des Lufdrucks bringen die zweite Membran zum Mitschwingen.



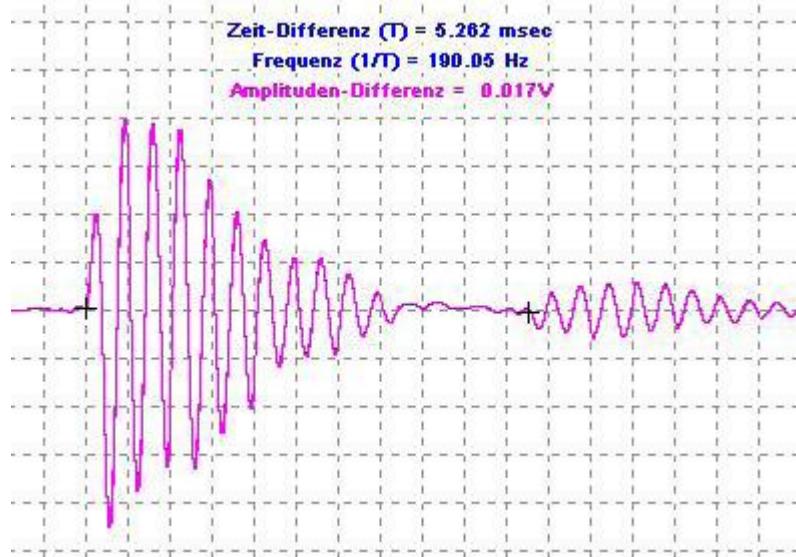
Experimente:

- 4** Ein Schüler stellt sich mit einem Hammer und einem Metallkehrblech „bewaffnet“ an einer Stelle auf, an der man ihn aus mindestens 100 m Entfernung sieht. Die übrigen Schüler entfernen sich zunächst etwa 50 m, dann gut 100 m von dem ersten. Dieser schlägt dann gut sichtbar mit ca. 3 Schlägen pro Sekunde auf das Blech (Metronom benutzen). Es wird genau beobachtet, wie sich der gesehene Schlag zu dem gehörten verhält. Welche Rückschlüsse lassen sich daraus ziehen?
- 5** Baue einen Tongenerator mit Lautsprecher, ein Mikrofon mit Speicheroszilloskop und eine Reflexionswand der folgenden Zeichnung entsprechend auf. Optimal ist ein

Computerprogramm, das Tongenerator und Speicheroszilloskop enthält. Der Abstand zwischen Mikrofon und Reflektor sollte ca. 1 m betragen.



Erzeuge mit dem Tongenerator und dem Lautsprecher eine Folge von kurzen Knackimpulsen, die an der Metallwand reflektiert werden. Im Bild des Speicheroszilloskops erscheint dann ein Bild der folgenden Art. Man sieht das Schwingungsbild des primären Knacklautes und seines Echos. Im vorliegenden Fall betrug der Abstand zwischen Mikrofon und Reflektor 90 cm.



GRUNDLAGEN: Schallgeschwindigkeit

Aus dem ersten Experiment kann man ungefähr abschätzen, wie groß die Schallgeschwindigkeit ist. Schlägt man mit einem Takt von 3 Schlägen pro Sekunde auf das Blech, so stellt man in 50 m Entfernung fest, dass gesehener Schlag und gehörter Schlag nicht synchron sind. Wenn man den Schlag hört, befindet sich der Hammer ungefähr am weitesten entfernt vom Blech. In 100 m Entfernung sind gehörter und gesehener Schlag wieder fast synchron. Am besten passt es bei ca. 110 - 115 m. Genaue Beobachter erkennen, dass in

100 m Entfernung nach dem letzten gesehenen Schlag noch ein gehörter wahrgenommen werden kann. Der Schall hat also gerade die Zeit zwischen zwei Schlägen gebraucht, um bis ans Ohr zu gelangen. Er hat demnach eine Geschwindigkeit von geschätzt etwas mehr als 300 m/s.

Das zweite Experiment lässt eine wesentlich genauere Messung zu, da die Laufzeit (Zeitdifferenz zwischen Primärlaut und Echo) auf etwa ein Millionstel Sekunde genau gemessen werden kann. Bei den vorliegenden Daten ergibt sich für die Schallgeschwindigkeit

$$c = \frac{2 \cdot 0,9 \text{ m}}{0,005262 \text{ s}} \approx 342 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

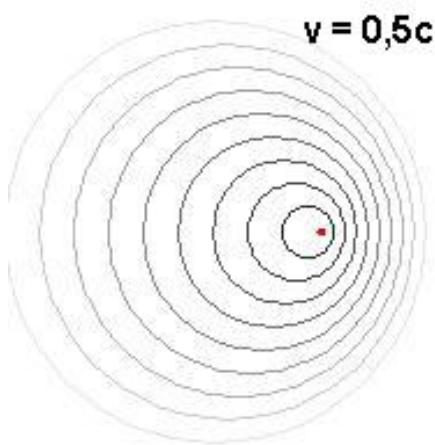
Dies ist allerdings kein fester Wert, da die Schallgeschwindigkeit von der Dichte der Luft abhängt und diese sich mit Temperatur und Luftdruck verändert. Bei Normalluftdruck (1013 hPa) und 20° C beträgt die Schallgeschwindigkeit 344 m/s, bei 0° C aber nur 332 m/s. Sie hängt auch vom Stoff ab. In Helium hat man bei 0° C und Normaldruck z. B. 981 m/s. In Wasser und festen Stoffen hat sie einen noch wesentlich höheren Wert.

10.2 Bewegungen bei großer Geschwindigkeit

Experimente und Animationen:

- 1** Höre dir die Schallbeispiele von vorbeifahrenden Autos auf der CD an (T1: Dopplereffekt) und beschreibe genau, was du hörst. Achte dabei nicht nur auf die Lautstärke.
- 2** Starte die zugehörige Animation für Schallwellen einer bewegten Schallquelle (fahrendes Auto, fliegendes Flugzeug usw.) für $v = 0,5c$ (halbe Schallgeschwindigkeit) und versuche die dargestellten Bilder zum Gehörten in Beziehung zu setzen.

GRUNDLAGEN: Dopplereffekt



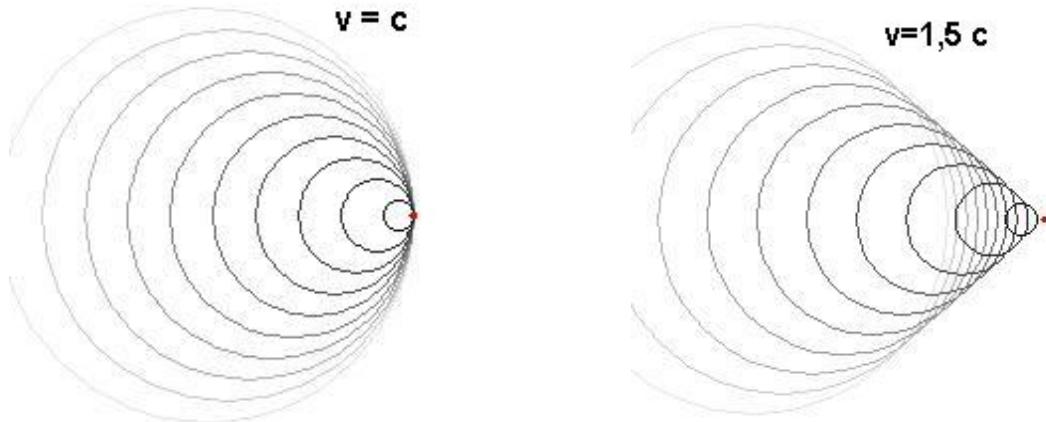
Im Bild werden die Stellen größter Luftdichte durch Kreise dargestellt, die zu einem bestimmten Zeitpunkt von der Schallquelle ausgehen und sich von ihr nach allen Seiten gleichmäßig mit Schallgeschwindigkeit entfernen. In der Zeit, die zwischen dem Aussenden zweier Dichtemaxima vergeht, bewegt sich die Schallquelle weiter (im Bild nach rechts), sodass die Kreise unterschiedliche Mittelpunkte haben. Deswegen rücken die Dichtemaxima in Fahrtrichtung enger zusammen, d.h. sie treffen bei einem Zuhörer, auf den das Fahrzeug zu kommt, in schnellerer Folge ein als bei einem stehenden Fahrzeug. Der wahrgenommene Ton wird also höher.

Entfernt sich das Fahrzeug von dem Zuhörer, ist der Effekt genau entgegengesetzt. Die Abstände zwischen den Dichtemaxima werden größer, d.h. es treffen weniger pro Sekunde beim Zuhörer ein, der Ton wird niedriger. Diese Frequenz- oder Tonhöhenänderung bezeichnet man als **Dopplereffekt**.

Experimente und Animationen:

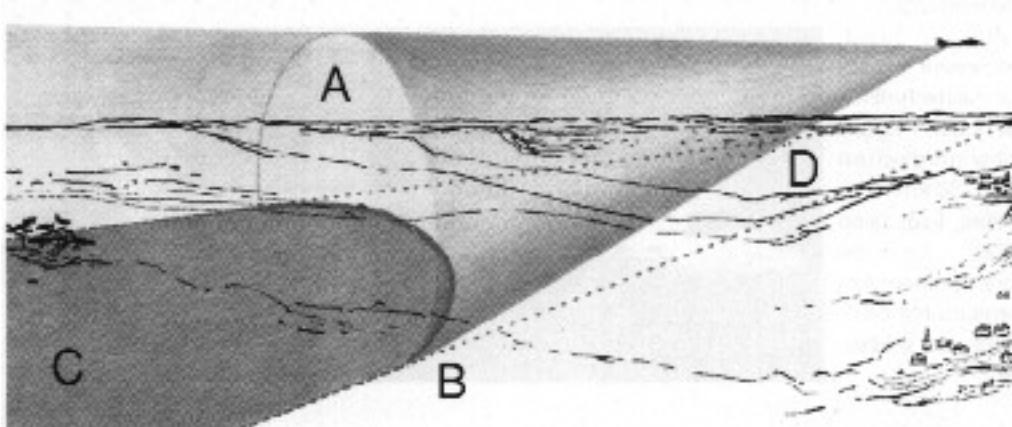
- 3 Höre dir nun das akustische Tonbeispiel 3 auf der CD an. Es stammt von einem vorbeifliegenden Flugzeug mit Überschallgeschwindigkeit (aber nicht in voller Lautstärke).
- 4 Starte die Animation mit $v = c$ bzw. $v = 1,5c$ und interpretiere die bewegten Bilder. Was geschieht bei $v = c$ insbesondere an der Stelle des Fahrzeugs?

GRUNDLAGEN: Schallmauer und Schallknall



Bei $v = c$ treffen die Dichte- und Druckmaxima an der Stelle des Fahr- oder Flugzeugs alle zusammen. Es entsteht dort eine Stelle extrem hoher Luftpumpe oder extrem hohen Luftdrucks. Dieser Zustand stellt eine große Belastung für das Fahr- oder Flugzeug dar, weil große Kräfte am Gehäuse angreifen. Der Luftwiderstand steigt dabei rapide an, sodass eine große Schubkraft nötig ist um das Fahr- oder Flugzeug weiter zu beschleunigen. Man bezeichnet diesen Zustand der Luft als **Schallmauer**.

Nach dem „Durchbrechen“ der Schallmauer, also beim Überschallflug, nimmt der Druck am Flugzeug wieder etwas ab. Es bildet sich aber ein Kegel (A) heraus, an dem der Druck schlagartig ansteigt. Vor diesem Kegel (D) ist die Luft in Ruhe, man hört nichts. An der Kegelfläche selbst (B) steigt der Druck plötzlich an, was man als lauten Knall hört. Im Innern des Kegels (C) hört man dann das Geräusch des Flugzeugs. Dieser Kegel wird vom Flugzeug mitgeschleppt (siehe Abbildung)



10.3 Spezielle Probleme des Überschallflugs

GRUNDLAGEN: Luftströmung bei Überschall

Der Auftrieb an einer Tragfläche ist, wie wir früher gelernt haben, eine Reaktionskraft. Die Tragfläche lenkt die Luft nach unten ab und erfährt als Gegenkraft eine Kraft nach oben. Durch die spezielle Form der Tragfläche gelingt es den Effekt zu optimieren. Die Wölbung an der Oberseite, führt bei Geschwindigkeiten unterhalb der Schallgeschwindigkeit zu einem deutlichen Unterdruck in diesem Bereich, der eine größere Wirkung zur Folge hat als eine flache Tragfläche. Der Luftstrom teilt sich vor der Tragfläche und ein Teil weicht nach oben aus und erzeugt dort den Unterdruck (s. S. 72). Beim Überschallflug ist das anders. Die Geschwindigkeit ist jetzt so hoch, dass die Luft nicht mehr ausweichen kann. Die Luft prallt direkt auf die Vorderseite des Flugzeugs bzw. der Tragfläche und wird dadurch abgelenkt. An der Vorderseite löst sich eine kegelförmige Schockwelle ab, d. h. ein Bereich sehr hoher Luftverdichtung, bzw. hohen Luftdrucks (siehe voriger Abschnitt). Moderne Überschallflugzeuge haben solche Formen, dass sie der Luft möglichst wenig Widerstand bieten und die Schockwelle möglichst schwach ausgeprägt ist. Der Auftrieb kommt hauptsächlich durch den Aufprall und die Ablenkung auf der Unterseite der Tragfläche zustande.

- 1 Betrachte das Photo des Überschallflugzeugs *Concorde* und beschreibe, wodurch es sich von einem herkömmlichen Flugzeug unterscheidet.



- 2 Starte die Animation „T2: Überschallflug“ zur Verdeutlichung der Luftbewegung bei Überschall-Flugzeugen. Begründe an Hand dieser Animation, warum der Luftwiderstand durch die Delta-Flügel geringer wird. Skizziere den Sachverhalt in deinem Heft und zeichne auch ein Kräfteparallelogramm für die Luftwiderstands Kräfte der Tragflächenvorderseite.
- 3 Überschalltragflächen sind relativ flach und haben eine geringe Wölbung, da letztere bei den hohen Geschwindigkeiten keinen zusätzlichen Auftrieb mehr bringt. Die Luft prallt direkt auf die Tragfläche und wird abgelenkt. Erkläre nach dem gleichen Prinzip wie in Aufgabe 2, wie der Auftrieb entsteht und warum er senkrecht zur Tragfläche steht. Fertige auch eine geeignete Skizze an.

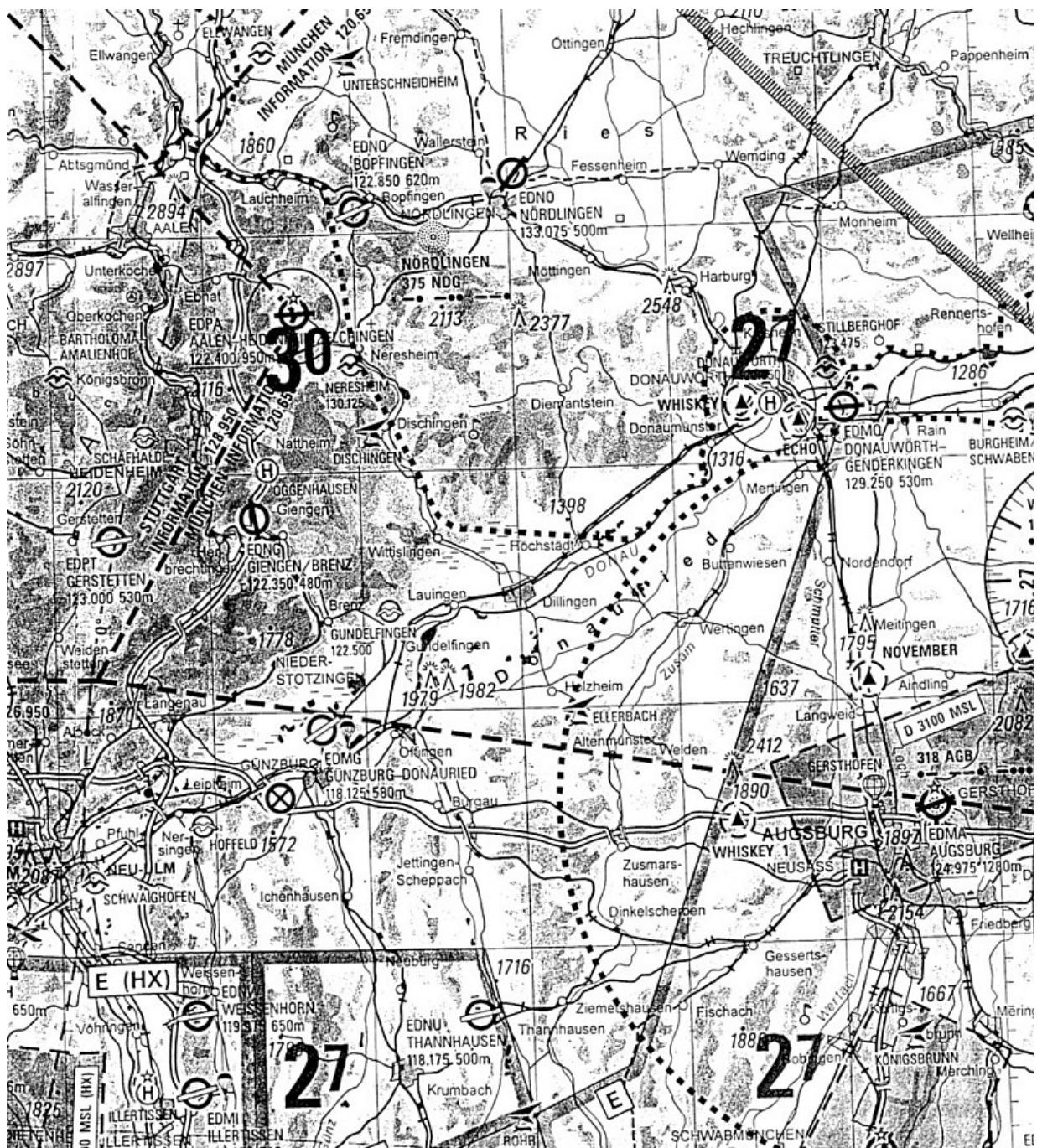
11 Weitere Übungen und Klausurbeispiele

Klausur Nr. 3

Das Segelflugzeug BLUE EAGLE ist durch den folgenden Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Gleitverhältnis charakterisiert:

Geschw. in km/h	80	90	100	120	140	160	180	200
Gleitverhältnis	1:30	1:35	1:36	1:36	1:34	1:30	1:25	1:20

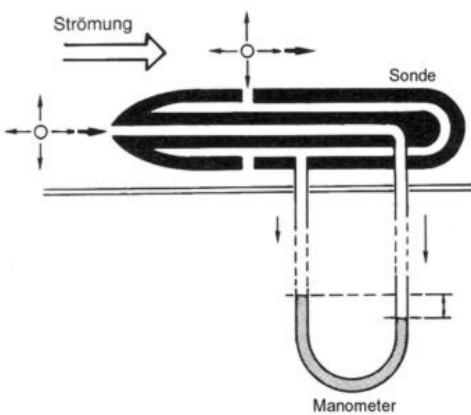
- 1** Ein Segelflieger startet am Fluggelände *Ulm-Schwaighofen* und wird mit einer Winde zunächst auf ca. 500 m Höhe gezogen. Anschließend gelangt er durch eine Thermik 5 km östlich des Startplatzes auf eine Höhe von 1400 m. Wie weit kann er bei Windstille nun ohne weiteren Auftrieb bestenfalls fliegen. Wo würde er spätestens landen müssen, wenn er an der Donau entlang fliegt? Wie lange würde der Flug bis dorthin voraussichtlich dauern?
 - 2** Da er keine Thermik findet, geht er am Flugplatz *Günzburg-Donauried* herunter und lässt sich anschließend mit einem Motorflugzeug hoch schleppen. Bis auf welche Höhe muss er geschleppt werden, wenn er den Flugplatz *Donauwörth-Genderkingen* ansteuern will und dabei eine Höhenreserve von 300 m haben will?
 - 3** Ein Segelflieger lässt sich am Flugplatz *Nördlingen* auf 1500 m Höhe schleppen. Er will möglichst schnell nach *Günzburg-Donauried* fliegen. Ist dies ohne Thermik überhaupt möglich? Wenn es der Fall ist, mit welchem Gleitverhältnis und welcher Höchstgeschwindigkeit kann er fliegen? Wie lange dauert der Flug?
-
- 4** Erläutere das Prinzip des Radar-Echo-Verfahrens zur Höhenmessung. Wird dabei die Höhe über dem Meeresspiegel oder die Höhe über Grund gemessen?
 - 5** Nach dem Aufsteigen in einer Thermik misst der Pilot mit dem Radar-Echo-Verfahren die Höhe über Grund. Das Signal ist $8 \mu\text{s}$ (1 Mikrosekunde = 0,000 001 s) unterwegs, bis es wieder zurückkehrt. In welcher Höhe über dem Boden fliegt er?
-
- 6** Eine schnell rotierende Luftschaube erfährt einen Auftrieb. Erkläre mit dem Gesetz von Kraft und Gegenkraft, wie dieser zustande kommt. Wie kann diese Kraft beim Hubschrauber auch für den Vortrieb genutzt werden?
 - 7** Erläutere ausführlich an Hand eines Stromlinienbildes, warum sich während des Fluges oberhalb der Tragfläche ein Unterdruck ausbildet, der den so genannten dynamischen Auftrieb erzeugt. Gehe dabei auf die Vorgänge am Beginn des Strömungsvorganges und auf die stabile Situation während einer gleichbleibenden Strömung ein.
 - 8** Beim Überschreiten eines kritischen Anstellwinkels einer Tragfläche „reißt die Strömung ab“. Erläutere an Hand eines Stromlinienbildes, was dies genau bedeutet und warum dabei der Auftrieb weitgehend verschwindet.



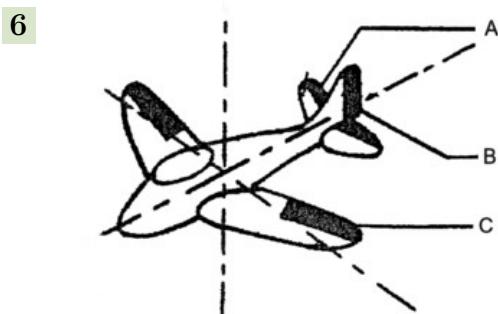
Karte für Klausur Nr. 3, Maßstab 1 : 500 000

Klausur Nr. 4:

- 1** Beschreibe das vorgeführte Experiment mit Worten und einer geeigneten Skizze und erkläre, warum die Kerze ausgeht, obwohl sie sich im Windschatten befindet.
- 2** Zwischen 0 und 1000 m Höhe herrscht eine durchschnittliche Luftdichte von ca $1,15 \text{ kg/m}^3$. Ein Fallschirmspringer ist 1,7 m groß, hat eine durchschnittliche Breite von 0,45 m und ist 75 kg schwer. Für die folgende Abschätzung behandeln wir ihn wie ein Rechteck mit c_w -Wert 0,9. Berechne seine maximale Fallgeschwindigkeit in dieser Höhe, wenn er sich so orientiert, dass er der Luft eine möglichst große Angriffsfläche bietet. (Ortsfaktor 10 N/kg).
- 3** Berechne die maximale Geschwindigkeit, mit der er am Boden ankommt, wenn er einen runden Fallschirm mit einem Durchmesser von 12 m und einem Eigengewicht von 30 kg benutzt. Der c_w -Wert soll hier 1,35 und die Dichte $1,2 \text{ kg/m}^3$ betragen. Hinweis: Die Kreisfläche berechnet man mit $A = \pi r^2$.
- 4** Die nebenstehende Drucksonde wird als Geschwindigkeitsmesser verwendet. Der Kreis mit den vier gleich langen Pfeilen soll den äußeren Luftdruck symbolisieren, der in alle Richtungen gleich wirkt.



- 5** Beschreibe den Magnuseffekt am Beispiel eines angeschnittenen (rotierenden) Fußballs. Fertige dazu auch eine Skizze an, die den Stromlinienverlauf verdeutlicht.



- 6**
- a) Im nebenstehenden Bild sind die drei Steuerruder eines Flugzeugs mit A, B und C gekennzeichnet. Gib an, wie die Ruder benannt werden und wozu sie dienen.
- b) Erläutere, wie Seitenruder und Querruder eingestellt werden müssen, wenn man eine Linkskurve fliegen will.

- 7** An der Spitze eines Überschallflugzeugs entsteht durch Kompression der Luft ein Druckmaximum, das sich mit Schallgeschwindigkeit kugelförmig nach allen Seiten ausbreitet und so den Mach'schen Kegel erzeugt.

- Stelle für $v = 2c$ in einer Zeichnung dar, wie der Kegel aus den einzelnen Kugeln (Kreisen in der Zeichnung) entsteht.
- Der Öffnungswinkel des Kegels lässt sich aus $\sin \alpha = \frac{c}{v}$ berechnen. Erkläre an Hand der Zeichnung, warum das so ist, und bestimme an Hand des Bildes die Geschwindigkeit des Flugzeugs.



12 Anhang

12.1 Hinweise für Lehrer

Zur besseren Orientierung haben die Aufgabennummern unterschiedliche farbige Hintergründe. Ein blauer Hintergrund zeigt an, dass in diesen Aufgaben neue Sachverhalte erarbeitet werden. Der (grün)graue Hintergrund wurde für Übungs- und Anwendungsaufgaben gewählt. Ein magentafarbener Hintergrund zeigt Ergänzungsstoff oder Aufgaben mit höherem Schwierigkeitsgrad an. Experimentalaufgaben wurden mit einem grünen Hintergrund versehen.

Verschiedentlich sind Informationskästen eingebaut, die durch einen blauen Rahmen kennlich gemacht werden. Sie enthalten Informationen zu besonderen Themen, die zum jeweils erarbeiteten Stoff passen. Infokästen mit einem magentafarbenen Rahmen stellen auch wieder Ergänzungsstoff dar.

Im mathematischen Teil (Kapitel 1 und 2) sind die (grün)grau hinterlegten Kästen Definitionen vorbehalten, die beige hinterlegten enthalten spezielle Methoden und die rosaarbenen mathematische Lehrsätze.

Anmerkungen zu den Formeln

Die Formeln für Auftrieb und Luftwiderstand legen nahe, dass die Beiwerte c_W und c_A Konstanten sind. Dies ist jedoch nur in einem eingeschränkten Sinn richtig, denn die Beiwerte hängen von der sog. **Reynoldszahl** Re ab. Diese Zahl ist definiert als

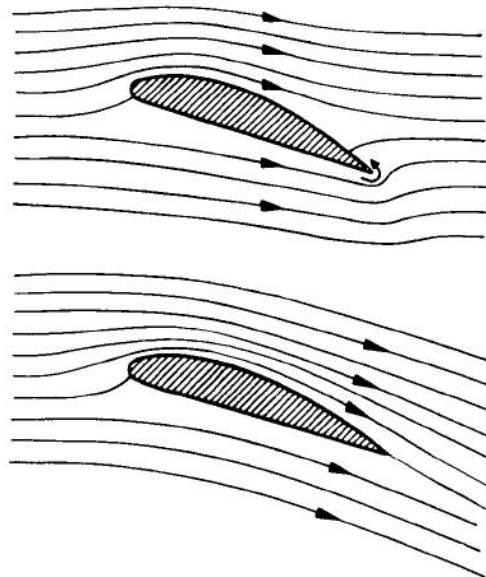
$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}$$

Darin ist η die Viskosität der Flüssigkeit oder des Gases, ρ die Dichte, l eine charakteristische Länge (z. B. die Profillänge des Flügels) und v die Strömungsgeschwindigkeit. Untersucht man in einem Windkanal ein 1 : 5 verkleinertes Modell auf seinen c_W -Wert, so beträgt l nur ein Fünftel seines realen Wertes. Deshalb muss man v oder ρ verfünffachen, um den richtigen c_W -Wert zu bekommen. Bei Flugzeug-Modellen ist eine Erhöhung der Geschwindigkeit ausgeschlossen, da dann in der Regel die Schallgeschwindigkeit überschritten wird. Deshalb kann man nur die dichte vergrößern, indem man einen Hochdruck-Windkanal betreibt.

Im hier vorliegenden Kontext wird diese Abhängigkeit der Beiwerte insbesondere von der Geschwindigkeit vernachlässigt, da eine exakte Behandlung für Schüler zu schwierig wäre. Diese Abhängigkeit lässt sich im Übrigen auch nicht einfach durch Formeln beschreiben. Es gibt allerdings eine Stelle, an der sie den Schülern auffallen könnte. Der Grenzwinkel für den Strömungsabriss liegt bei unserem Modell (s. S. 80) bei ca. 40° , während er bei realen Flugzeugtragflächen bei etwa 15° liegt. Wegen der sehr viel geringeren Abmessungen und Geschwindigkeiten ist die Reynoldszahl viel kleiner als bei realen Flugzeugen. Das bedeutet u. A., dass die Neigung zur Turbulenz wesentlich geringer ist, also erst bei größeren Anstellwinkeln auftritt.

12.2 Die Wirbeltheorie des Auftriebs

In wissenschaftlichen Veröffentlichungen findet man häufig eine anders geartete Erklärung des dynamischen Auftriebs, die hier kurz dargestellt werden soll.



Das obere Bild zeigt den Stromlinienverlauf an einem Tragflächenprofil bei einer extrem langsamen Strömung in Flüssigkeit (s. S. 68), bei der es keinen Auftrieb gibt. Das untere Bild zeigt hingegen die Ablenkung der Luftströmung nach unten, also eine Strömung die an der Tragfläche einen Auftrieb erzeugt. Von früheren Betrachtungen wissen wir, dass die Strömung unterhalb der Tragfläche langsamer und oberhalb der Tragfläche schneller ist. Man kann den Unterschied zwischen den beiden Strömungsbildern ähnlich wie beim Magnuseffekt durch eine Zirkulation beschreiben.

Überlagert man den (gedachten) gleichmäßige Luftstrom ohne Ablenkung mit einer Zirkulationsströmung, wie sie im dritten Bild dargestellt ist, so wird die Luft oben schneller, unten langsamer und hinter der Tragfläche nach unten gerichtet, wie es sein sollte. Es stellt sich natürlich die Frage, woher diese Zirkulation kommt. Dies kann man folgendermaßen erklären: Bei Anfahren stellt sich im allerersten Moment ein Strömungsmuster wie im oberen Bild ein. Auf Grund der Trägheit der Luft ist diese aber sehr bald nicht mehr in der Lage an der Hinterkante der Tragfläche eine so scharfe Wendung nach vorn zu machen. Sie strömt zunächst weiter und biegt dann erst nach oben ab. Auf diese Weise entsteht ein Wirbel, der sog. **Anfahrrwirbel**, der sich von der Tragfläche ablöst und gewissermaßen auf dem Rollfeld zurückbleibt.

Man kann diesen Anfahrrwirbel mit einem Tragflächenprofil in einer mit Wasser gefüllten Schleppwanne sichtbar machen, wenn man die Oberfläche mit gemahlenem Pfeffer bestreut. Da es nun zu jedem Wirbel einen Gegenwirbel gibt, ähnlich wie es zu jeder Kraft eine Gegenkraft gibt, bildet sich um die Tragfläche herum die oben beschriebene Zirkulation als Gegenwirbel aus. Das Auftreten von Gebieten mit Über- bzw. Unterdruck lässt sich dann mit dem Bernoulli-Prinzip erklären, sodass man zu den gleichen Ergebnissen wie oben gelangt.

