

DROHNENSCHULE OÖ

A2 Prüfungsvorbereitung

OPEN.030(2)(c) - DVO-(EU)-2019/947





Meteorologie



Flugleistung



technische & betriebliche
Risikenminderung

Inhalt

Meteorologie 4 - 63

Temperatur	5 - 10
Luftdruck	11 - 16
Wind und Turbulenz	17 - 30
Nebel	31 - 36
Wolken	37 - 46
Niederschlag	47 - 52
Sicht	53 - 55
Verweisung	56 - 59
Wettermeldungen & Vorhersagen	60 - 63

Flugleistung 64 - 89

Massen	65 - 67
Schwerpunktlage	68 - 72
Flugbereichsgrenze	73 - 76
Batterien	77 - 89

Risikominderung 90 - 97

Technische Risikom.	91 - 93
Betriebliche Risikom.	94 - 97

Meteorologie

Neben den technischen und menschlichen Aspekten ist das Wetter die dritte große Einflussgröße auf jeden Flug – sowohl in der bemannten als auch in der unbemannten Luftfahrt. Das Wettergeschehen ist zwar inzwischen recht gut vorhersagbar, jedoch kann es sich in allen Dimensionen schnell ändern – räumlich und zeitlich. Daher ist die Kenntnis der aktuellen und vorhergesagten Wetterlage eine wichtige Voraussetzung für das Abheben eines UAS.

Dieses Kapitel beschäftigt sich dementsprechend zunächst mit den wichtigsten Wettererscheinungen, die Einfluss auf einen UAS-Flug haben können. Dazu gehören die Größen Temperatur, Luftdruck und Wind sowie Wolken, Niederschläge, Vereisung und Nebel. Bei letzteren Themen wird der Fokus insbesondere auf die Sicht gelegt.

Abschließend werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie diese Informationen aufbereitet und verbreitet werden können; wo Sie sich also vor dem Flug über die Wetterlage und Wetterentwicklung informieren können. Dabei spielen sowohl Wettermeldungen als auch Karten eine Rolle und decken jeweils bestimmte Informationen ab.

TEMPERATUR

Der Einfluss der Temperatur macht sich vor allem bei der Akkuleistung und möglicher Vereisung bemerkbar.

Unbemannte Luftfahrzeuge werden in der Regel mit Lithium-Polymer (Li-Po) Batterien betrieben. Ein kalter Akku bringt zunächst **weniger Leistung**, da die chemische Reaktion zur Erzeugung der elektrischen Energie verlangsamt wird. Zusätzlich muss bei kalten Akkus mit einer geringeren Kapazität und damit mit einer verminderten Laufzeit gerechnet werden.

Daher sollten Akkus bei negativen Temperaturen in einer isolierten Box (**Li-Po-Wärmer**) transportiert und erst kurz vor dem Start eingebaut werden. Es kann zusätzlich sinnvoll sein, mit dem UAS zunächst auf der Stelle zu schweben, damit die Akkus sich weiter aufwärmen. Dennoch ist zu beachten, dass bei Kälte die Akkulaufzeit leiden wird und sich die Flugzeit reduziert (um bis zu 30-50%).

Des Weiteren gibt es für jedes UAS einen so genannten **Betriebstemperaturbereich**, in welchem ein gefahrloser Betrieb möglich ist. Dieser kann im Betriebshandbuch nachgelesen werden.

Einheiten und Messung

Die Lufttemperatur ist ein Maß für die **kinetische Energie** (Bewegungsenergie) der einzelnen Luftmoleküle. Je stärker ihre relative Bewegung zueinander, desto höher ist die Temperatur. Um störende Einflüsse auszuschalten, wird die Temperatur in der Meteorologie immer im Schatten (belüftete Wetterhütte) und in 2 Meter über Grund (Grasboden) gemessen.

Die gebräuchlichste **Temperaturskala** ist die Celsius-Skala, die durch das Gefrieren (0 °C) und Sieden (100 °C) von Wasser ihre Fixpunkte hat. In angelsächsischen Ländern wird auch die Fahrenheit-Skala verwendet, in der Physik die Einheit Kelvin.

Tages- und Jahresgang der Temperatur

Durch die kurzwellige Sonnenstrahlung wird zunächst der Erdboden (durch Absorption) erwärmt, welcher dann wiederum zunächst die unteren Luftschichten erwärmt. Durch Thermik – also „Aufwinde“ wird diese Wärme dann schließlich auch in höhere Luftschichten transportiert.

Die **höchsten Temperaturen** werden im Sommer in der Regel erst zwischen 16 und 17 Uhr Lokalzeit erreicht.

In der Nacht fehlt die Sonneneinstrahlung und damit der Energieeintrag ganz. Daher kühlen sich die Erdoberfläche und die damit in Kontakt befindlichen unteren Luftschichten ab. Die Abkühlung ist um so stärker, je weniger Wolken an Himmel sind. Wolken können nämlich die Wärmestrahlung aufnehmen und zur Erde zurückstrahlen.

Auch der **Wind** hat einen Effekt auf die Abkühlung. Je mehr Wind, desto größer ist die Durchmischung der unteren Luftschichten infolge Turbulenz. Daher treten die kältesten Nächte im Winter bei schwachem Wind und wolkenlosem Himmel auf. Es ist vielleicht erstaunlich, dass das Temperaturminimum nicht gegen Sonnenaufgang erreicht wird, sondern erst etwa eine halbe Stunde später.

Die **jahreszeitlichen Schwankungen** der Temperatur resultieren aus dem Winkel der Sonneneinstrahlung und der Tageslänge, hängen also mit dem Umlauf der Erde um die Sonne zusammen. So beträgt die maximale Tageslänge in Frankfurt im zu Beginn des Sommers etwa 16 Stunden und 15 Minuten, der kürzeste Tag an Winteranfang beträgt nur etwa 7 Stunden.

Die **heißesten Temperaturen** treten in unseren Breiten allerdings nicht mit Sommeranfang – dem längsten Tag – auf, sondern erst im Juli. Auch die tiefsten Temperaturen folgen dem Winteranfang (etwa 21. Dezember) mit 4 Wochen Verzögerung. Das liegt daran, dass sowohl die Kontinente als auch die Meere als ein Wärmespeicher fungieren, der sich immer mit einer zeitlichen Verzögerung maximal auflädt bzw. wieder entleert.

Temperaturverlauf mit der Höhe

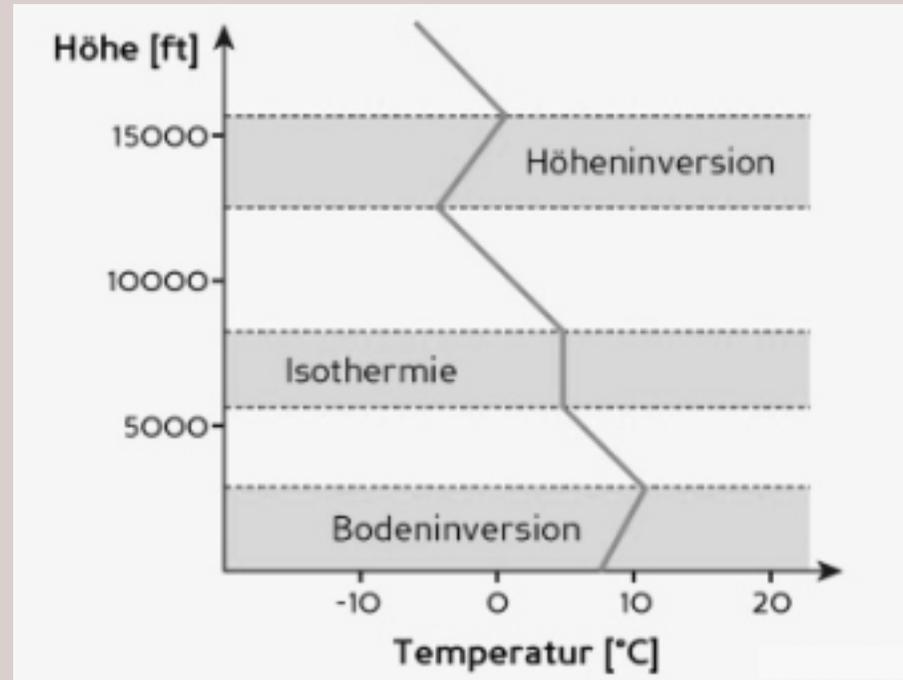
Die Temperatur nimmt mit der Höhe im Allgemeinen ab, und zwar im Durchschnitt um $0,6\text{ °C}$ pro 100 m bzw. 2 °C pro 1.000 ft. Ausnahmen von dieser Regel nennt man Inversionen, wobei zwei Typen unterschieden werden können: Boden- und Höheninversionen.

Bei schwachem Wind und klarer Nacht bilden sich immer **Bodeninversionen** aus, die sich dann im Tagesverlauf mit zunehmender Sonneneinstrahlung wieder auflösen. Die vertikale Mächtigkeit von Bodeninversionen beträgt etwa 500 bis 800 ft (150 bis 250 m). Innerhalb dieser Schicht kann die Temperatur durchaus um 10 °C zunehmen. Das ist ggf. bei der Leistung des unbemannten Luftfahrzeugs zu berücksichtigen.

Die **Abnahme der Luftdichte** mit steigender Höhe wird durch Bodeninversionen verstärkt. Die Propeller müssen ggf. schneller drehen, um die geforderte Leistung zu erbringen. Die maximale Drehzahl der Propeller kann somit schneller erreicht werden.

Höheninversionen entstehen häufig durch ein Hochdruckgebiet, in welchem sich durch großräumiges Absinken die Luft erwärmt und eine sogenannte Absinkinversion ausbildet. Im Gegensatz zu Bodeninversionen, die sich im Sommer immer wieder auflösen, sind Höheninversionen langlebig.

Temperaturverlauf mit der Höhe



Im Winter bildet sich an Inversionen häufig **Dunst oder Nebel** aus, der sich mitunter den ganzen Tag halten kann.

Temperatur und Luftmassen

Neben den bereits genannten Faktoren hat auch die jeweilige Luftmasse in einem Fluggebiet einen erheblichen Einfluss auf die Temperatur. Der Begriff Luftmasse bezeichnet ein **Luftvolumen**, das sich über ein größeres Gebiet erstreckt (z.B. Mitteleuropa) und mehr oder weniger einheitliche Merkmale aufweist, insbesondere in Bezug auf Temperatur und Feuchtigkeit.

In **Wetterberichten** werden häufig folgende Formulierungen verwendet, die sich um Luftmassen drehen:

In **Mitteleuropa** gibt es zwei Hauptluftmassen: Polare Luft und Tropische Luft.

Die **polare Luft** kommt im Wesentlichen vom Atlantik (nicht vom Pol) und hat im Sommer immer einen kühlen Charakter, im Winter aber eher eine milde Ausprägung, weil sie über das Meer kommt.

Die **tropische Luft** kommt meist aus Südwesten nach Europa. Sie stammt nicht aus den Tropen, wie der Name vielleicht suggeriert, sondern aus den stationären Hochdruckgebieten (z.B. Azorenhoch). Je nach Herkunft ist sie meist feucht (Biskaya), kann aber auch trocken sein wenn sie über Land aus Südosteuropa kommt.

Luftmassenbezeichnung	Herkunft	Eigenschaften
Maritime Polarluft	Grönland / Nordatlantik	kalt, feucht
Kontinentale Polarluft	Nordosteuropa / Nordrussland	extrem kalt, trocken
Maritime Subtropenluft	Südwesteuropa / Mittelmeer	warm, feucht
Kontinentale Subtropenluft	Süd- / Osteuropa	heiß, trocken

Im Winter gibt es noch eine weitere eher seltene Luftmasse: die **arktische Luft**. Diese hat ihren Ursprung in der Arktis oder im Nordpolarmeer. Je nach Zugrichtung kann sie maritim sein – dann kommt sie direkt über die Nordsee – oder kontinental und trocken bei einem Weg über das Baltikum. Diese Luftmasse ist für alle Kälterekorde in Mitteleuropa verantwortlich.



LUFTDRUCK

Der Luftdruck übt in mehrerer Hinsicht Einfluss auf einen UAS-Flug aus. In der Regel verfügen unbemannte Luftfahrzeuge über digitale Luftdrucksensoren, sie können den Luftdruck also messen und diesen in eine **Höhenangabe** umrechnen. Die Kombination aus Beschleunigungsmesser, Gyroskop und Luftdrucksensoren sorgt dafür, dass Drohnen präzise fliegen können und Bewegungen automatisch stabilisiert werden.

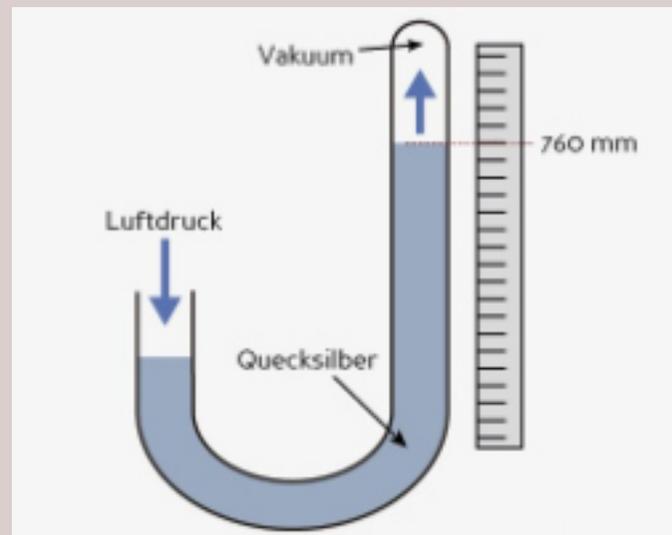
Gleichzeitig ist die **Leistung** des UAS vom Luftdruck abhängig. Die Abnahme des Luftdrucks und der Luftdichte mit steigender Höhe bedeutet, dass die Propeller schneller drehen müssen, um die gleiche Leistung zu erzeugen. Die maximale Drehzahl der Propeller kann also durch den äußeren Luftdruck begrenzt werden.

Und schließlich gibt es einen wichtigen Zusammenhang zwischen Luftdruck und **Wind**, der sich auf die Steuerbarkeit des UAS auswirkt.

Definition und Messung

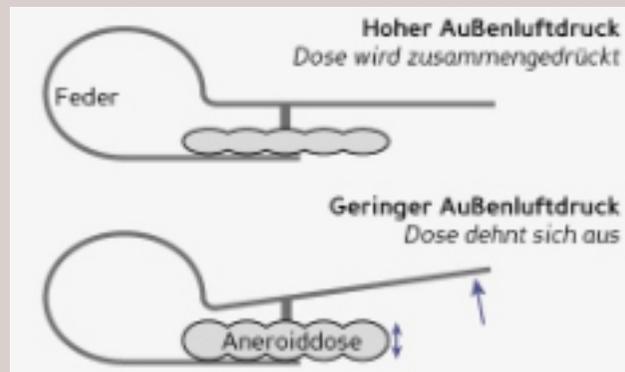
Die Luftmoleküle unterliegen wie alle Körper der Schwerkraft der Erde. Leicht wie Luft – dieses geflügelte Wort sollte man überdenken, wenn man berücksichtigt, dass ein Kilogramm Luft in Bodennähe mehr wiegt als 4 Pakete Butter – etwa 1.225 kg pro m³. Das **Gewicht der Luftsäule** mit einem cm² Querschnitt übt eine Kraft auf seine Unterlage aus, die man Luftdruck nennt.

Gemessen wird der Luftdruck in der Meteorologie mit einem **Quecksilberbarometer**. Im Prinzip handelt es sich dabei um eine Balkenwaage. Auf der Oberfläche des Quecksilbers lastet der Luftdruck. Die Höhe der Quecksilbersäule entspricht dem Luftdruck, der dagegen wirkt.



Definition und Messung

In unseren „Wohnzimmern“ werden in der Regel so genannte **Aneroidbarometer** als Luftdrucksensor eingesetzt, das sind teilevakuierete elastische Dosen, die sich bei Luftdruckänderung verformen. Die Änderung über eine Mechanik zur Anzeige gebracht. Aneroidbarometer werden auch in Flugzeugen zur Luftdruck- und Höhenmessung eingesetzt.



Der **Luftdrucksensoren** in unbemannten Luftfahrzeugen arbeiten ähnlich, allerdings wird die Verformung einer Membran gemessen. Auf der einen Seite der Membran wirkt ein Referenzdruck, auf der anderen Seite der umgebende Luftdruck. Zu Problemen bei der Messung kann es kommen, wenn Wasser in das Gehäuse eindringt, oder wenn das Loch mit Eis zufriert.

Die Einheit des Luftdruckes ist das **Hektopascal** [hPa]. In dieser Maßeinheit werden die Luftdruckdaten von Flughäfen übermittelt. Der mittlere Luftdruck in Meereshöhe beträgt etwa 1.013 hPa. Ein kräftiges Hoch über Mitteleuropa kann schon mal 1050 hPa in die Waagschale bringen. Sturmtiefs über Island im Winter bringen es schon mal auf Luftdruckwerte unter 950 hPa. Über Land treten solche tiefen Werte aber nicht auf.

Druckverlauf mit der Höhe

In nicht komprimierbaren Medien wie z.B. Wasser nimmt der Druck mit zunehmender Höhe linear ab. Luft als komprimierbares Gasgemisch verhält sich jedoch anders, hier nimmt der Druck **exponentiell mit der Höhe** ab. Das bedeutet, dass sich mit einer bestimmten Höhe der Luftdruck jeweils halbiert.

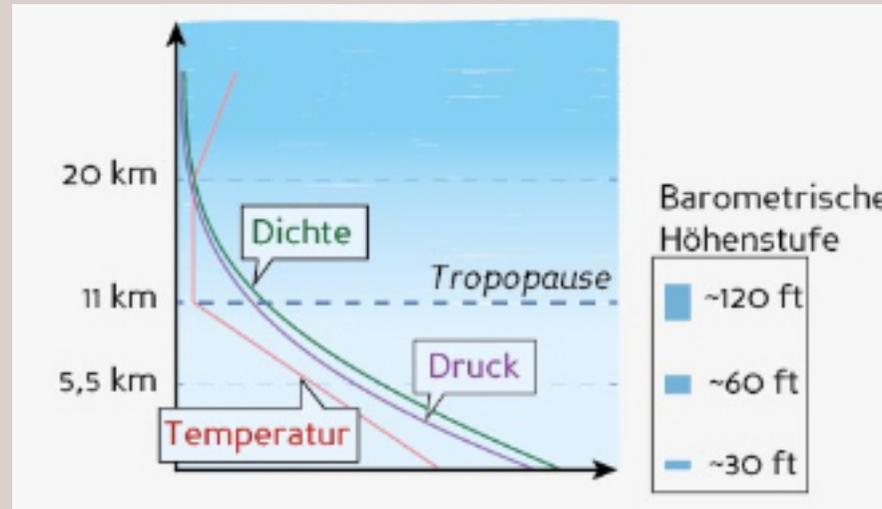
Dieses physikalische Gesetz nennt man **barometrische Höhenstufe** und es besagt, dass sich etwa alle 5.500 m der Luftdruck halbiert. Haben wir also am Boden 1.000 hPa, dann beträgt der Luftdruck in 5.500 m Höhe die Hälfte davon, also 500 hPa.

Luftdruckmesser in unbemannten Luftfahrzeugen machen sich diese Gesetzmäßigkeit zunutze und zeigen eine Höhe anstatt eines Luftdrucks an. Dabei werden jedoch gewisse Fehler in Kauf genommen: Auch die Umgebungstemperatur hat einen Einfluss auf die barometrische Höhenstufe. Trotz dieser Fehler ist die Höhenbestimmung über den Luftdruck genauer als über GPS.

Mit der Höhe nimmt natürlich nicht nur der Luftdruck ab, sondern auch die **Luftdichte**. Eine geringere Luftdichte führt automatisch auch zu einem geringeren Wirkungsgrad, der Propeller muss sich schneller drehen, um die gleiche Leistung zu erbringen.



Druckverlauf mit der Höhe



Hierzu ein **Beispiel**: Ein Propeller, der sich auf Meereshöhe mit 8.000 U/Min. dreht, muss sich in 2.000 Metern über Meeresspiegel mit 9.120 U/Min. drehen, um den gleichen Standschub zu erzeugen (Berechnung ohne Temperatur).

Dies ist insbesondere bei **Flügen im Gebirge** zu berücksichtigen, da dort die Luftdichte bereits am Boden viel geringer ist als im Flachland. Ist es darüber hinaus auch noch heiß verschärft sich dieser Effekt.

Drucksysteme und Wetter

Eine **Bodenwetterkarte** gestattet einen großräumigen Überblick über die Wettersituation in einem größeren Gebiet. Dazu werden die Luftdruckwerte, die an den verschiedenen meteorologischen Stationen gemessen werden, als Werte in die Karte eingetragen.

Verbindet man alle Luftdruckwerte mit gleichen Werten, erhält man so genannte Isobaren – Linien gleichen Luftdrucks. Sie sind beschriftet mit dem Luftdruckwert, den sie repräsentieren. Anhand des Verlaufs der **Isobaren** kann man Luftdruckgebilde erkennen: Hochs, Tiefs, aber auch Bereiche mit starker Krümmung der Isobaren.

Auch wenn diese Aussage wissenschaftlich nicht haltbar ist, besteht doch eine wichtige Grundtendenz: Ein Hochdruckgebiet bringt in der Regel beständiges und stabiles Wetter mit sich, die Tiefs sind für das windige unbeständige Wetter zuständig.

Anhand von Bodenwetterkarten lassen sich auch zwei wichtige Aussagen über den **Wind** treffen:

1. Je enger die Isobaren beieinander liegen, desto stärker ist der Wind.
2. Oberhalb der Bodenreibungsschicht weht der Wind parallel zu den Isobaren.



WIND UND TURBULENZ

Der Wind hat ganz entscheidenden und unmittelbaren Einfluss auf jeden Flug. Mit steigender Windgeschwindigkeit wird es immer **schwieriger die Position zu halten**, sowohl für die automatische Steuerung als auch für die manuelle. Dies hat zur Folge, dass der Flug anspruchsvoller wird, das Risiko die Kontrolle zu verlieren steigt und es unter Umständen zu Unfällen kommen kann.

Darüber hinaus sinkt auch die **Akkulaufzeit**, weil das UAS deutlich mehr „arbeiten“ muss um dem Wind zu trotzen. Das muss bei der Flugplanung entsprechend mit berücksichtigt werden.

Es besteht keine einheitliche gesetzliche oder operative Regelung, ab welcher Windstärke nicht mehr geflogen werden darf. Dies ist stark von vielen Faktoren wie UAS, konkrete Wetterbedingungen und Ihrer Erfahrung abhängig. Die Grenzwerte für das UAS können in der Regel im Betriebshandbuch nachgelesen werden.



Definitionen und Messung

Unter Wind versteht man die **horizontale Komponente der Luftbewegung**. Es werden dabei die beiden Größen Windrichtung und Windgeschwindigkeit unterschieden. Hauptursache der Windentstehung sind großräumige Luftdruckunterschiede. Diese Druckunterschiede resultieren im wesentlichen aus der ungleichen Erwärmung der Erdoberfläche.

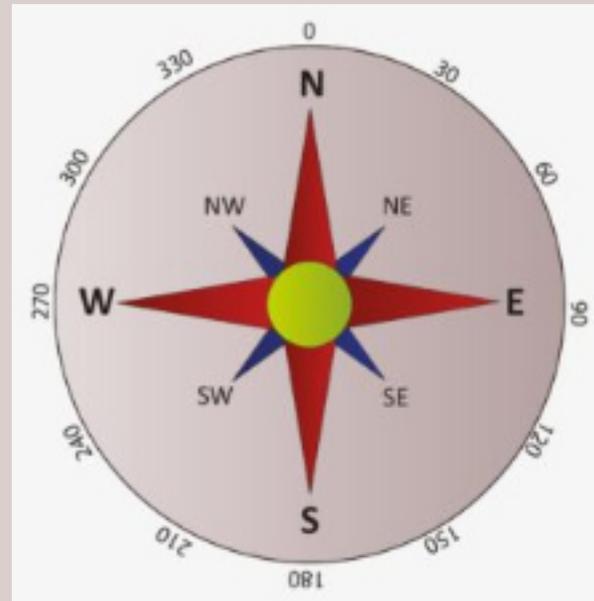
Die **Messung** des Bodenwindes erfolgt in hindernisfreiem Gelände in 10 m über Grund. Höhenwinde werden mit Radiosonden gemessen, aber auch Flugzeuge liefern Wind- und Temperaturmessungen entlang Ihrer Flugstrecke.



Eine leicht zu merkende Faustregel zum Umrechnen von Knoten in Kilometer pro Stunde lautet: „Mal zwei, minus 10 %“ (oder „Minus 10 %, mal zwei“). Der Fehler dieser Rechnung liegt unter 3 %.

Definitionen und Messung

Die **Windrichtung** gibt an, aus welcher Richtung (bezogen auf den geografischen Nordpol) der Wind weht. Die Angaben erfolgen in der Regel anhand der 360°-Skala.



Definitionen und Messung

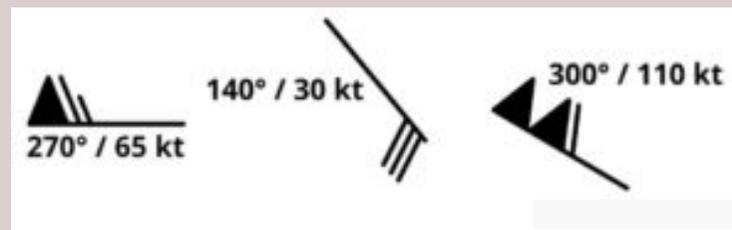
Als **Maßeinheit** für die Windstärke wurde 1805 die Beaufort-Skala eingeführt, welche Werte von 0-12 aufweist. Die Umrechnung und die Schwellenwerte ergeben sich wie folgt:

Stärke in Bft.	Bezeichnung Windstärke	km/h	kn	m/s	mph
0	Windstille	0 - <1	0 - <1	0 - 0,2	0 - 1,1
1	leiser Zug	1 - 5	1 - 3	0,3 - 1,5	1,2 - 4,5
2	leichte Brise	6 - 11	4 - 6	1,6 - 3,3	4,6 - 8,0
3	schwacher Wind	12 - 19	7 - 10	3,4 - 5,4	8,1 - 12,6
4	mäßiger Wind	20 - 28	11 - 15	5,5 - 7,9	12,7 - 18,3
5	frischer Wind	29 - 38	16 - 21	8,0 - 10,7	18,4 - 25,2
6	starker Wind	39 - 49	22 - 27	10,8 - 13,8	25,3 - 32,1
7	stelfer Wind	50 - 61	28 - 33	13,9 - 17,1	32,2 - 39,0
8	stürmischer Wind	62 - 74	34 - 40	17,2 - 20,7	39,1 - 47,1
9	Sturm	75 - 88	41 - 47	20,8 - 24,4	47,2 - 55,1
10	schwerer Sturm	89 - 102	48 - 55	24,5 - 28,4	55,2 - 64,3
11	orkanartiger Sturm	103 - 117	56 - 63	28,5 - 32,6	64,4 - 73,5
12	Orkan	ab 118	ab 64	ab 32,7	ab 73,6

© Meteomedia

Definitionen und Messung

In Bodenwetterkarten wird in der Luftfahrt der **Windfieder** benutzt, der ähnlich wie römische Zahlen funktioniert. Ein großer Strich bedeutet 10 kt, ein kleiner 5 kt. Dreiecke symbolisieren 50 kt. Die Windrichtung ergibt sich aus der Richtung des Windfieders. Die Windfieder selbst weisen immer zum tiefen Luftdruck.



Barisches Windgesetz

Wie bereits angesprochen gibt es einen engen Zusammenhang zwischen dem Wind und dem **Isobarenverlauf**.

Bei geradlinigen Isobaren ist die **Windgeschwindigkeit** auf der Nordhalbkugel:

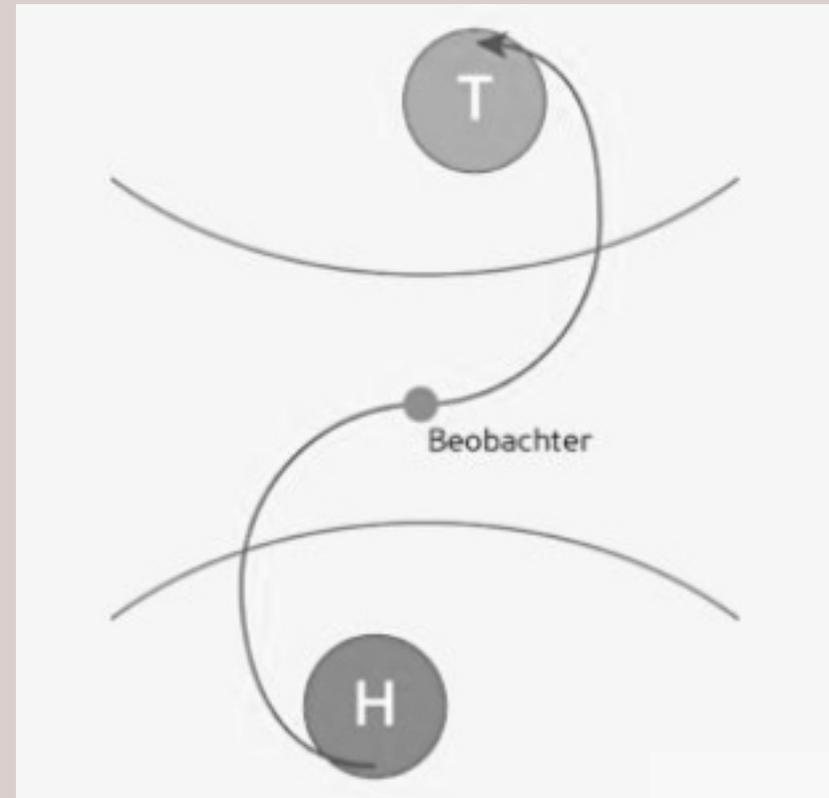
Um so stärker, je größer die so genannte Druckgradientkraft ist, d.h. je geringer der Isobarenabstand ist.

Bei gleichem Isobarenabstand größer in niedrigen Breiten.

Wenn der Wind in den Rücken weht, dann ist der tiefe Druck links des Betrachters (Barisches Windgesetz).

Die Windrichtung ist oberhalb der Bodenreibungsschicht parallel zu den Isobaren.

Das **Barische Windgesetz** kann also bei der Lokalisierung von Hoch- und Tiefdruckgebiet helfen und damit auch bei der weiteren großräumigen Beurteilung der Wettersituation: Kehrt ein Beobachter dem Wind den Rücken zu, so befindet sich in Blickrichtung vorne links das Tiefdruckgebiet und hinten rechts das Hochdruckgebiet.

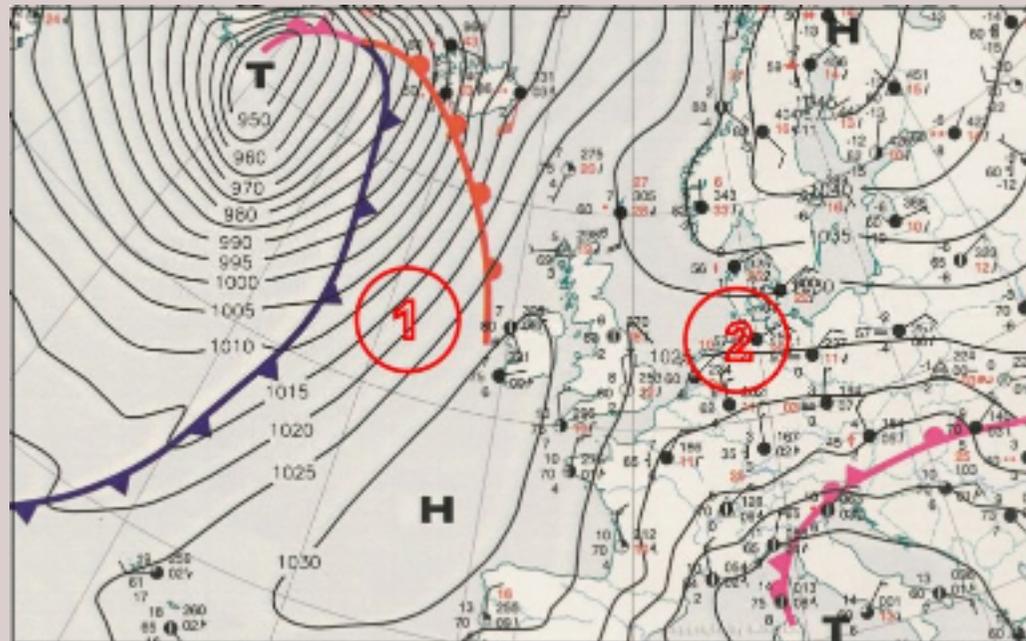


Barisches Windgesetz

Aus einer **Isobarenkarte** kann man Rückschlüsse über den Wind gewinnen. Das soll an einem Beispiel verdeutlicht werden: In der nachfolgenden Karte sind die Isobaren als schwarze Linien eingezeichnet. Es sind zwei geographische Bereiche (1 und 2) eingezeichnet, bei welchen die Voraussetzungen erfüllt sind: weitgehend geradlinig verlaufende Isobaren und gleiche geographische Breite.

Die **Windstärke** ist im Bereich 1 wesentlich höher als im Bereich 2, weil dort deutlich mehr Isobaren vorhanden sind. In Bezug auf die **Windrichtung** weht in Bereich 1 ein Südwestwind (der tiefe Druck liegt links des Betrachters westlich Islands). In Bereich 2 weht ein Ostwind, weil der tiefe Luftdruck im Süden – also wieder links des Betrachters – liegt.

Wird im zeitlichen Verlauf der **Isobarenabstand** geringer, dann nimmt die Windgeschwindigkeit zu, weicht der Druckgradient auf – wird der Abstand größer – dann nimmt die Windgeschwindigkeit ab.



Einfluss der Reibung

Merkregel (für die Nordhalbkugel): Im Vergleich zum Erdboden verdoppelt sich die Windgeschwindigkeit bis zu einer Höhe von 1.000 m über Grund und die Windrichtung dreht sich um etwa 30° nach rechts.

Weht am Boden beispielsweise ein Wind aus 230° mit 8 kt, ist oberhalb der Reibungsschicht in etwa 1.000 m AGL mit einem Wind aus 260° mit 16 kt zu rechnen.

Zu bedenken ist dabei, dass der Reibungseinfluss nicht überall gleich groß ist. Über großräumigen **Wasserflächen** kann die Reibung fast vernachlässigt werden. Die Windgeschwindigkeit nimmt nur um 30% zu, der Wind dreht nur um 10 Grad nach rechts.

Im alpinen Gelände setzen andere überwiegende Effekte die Regel hingegen häufig ganz außer Kraft.



Lokale Windsysteme

Lokale Windsysteme können von Bedeutung sein, wenn eine „**schwachgradientige**“ **Wetterlage** vorliegt. Dies bedeutet, dass auf der Bodenwetterkarte nur wenige Isobaren vorhanden sind, sodass der dadurch verursachte Wind nur schwach ausgeprägt ist.

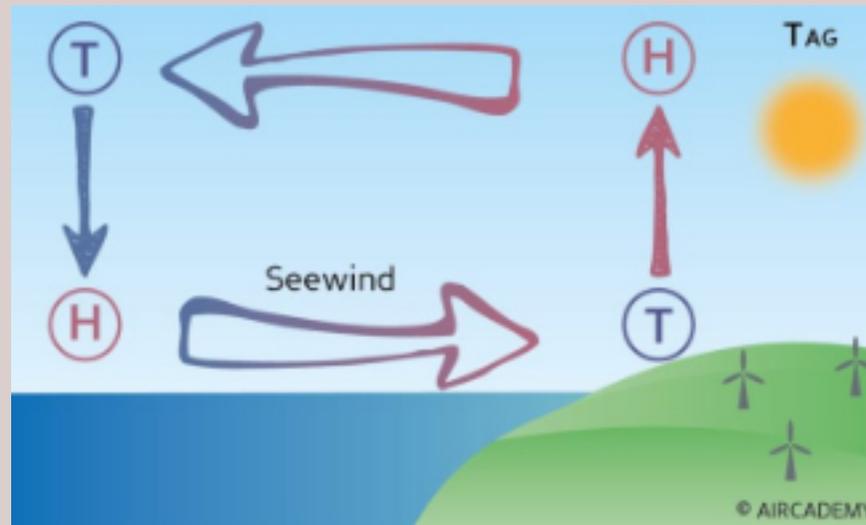
In solchen Fällen können sich lokale Windsysteme ausbilden, die ihren Antrieb im Wesentlichen aus der unterschiedlichen Erwärmung von **Land- und Seemassen** oder **Tälern und Bergen** im Hochgebirge beziehen. Grundsätzlich entwickelt sich dabei mit der unterschiedlichen Strömung ein flaches wenige hundert Meter hochreichendes Windsystem entwickelt, wobei die Strömung immer von Kalt nach Warm gerichtet ist.

Als Beispiel eines diese Systeme sei der **Seewind** genannt. Er setzt in der Regel im Laufe des späten Vormittags ein, wenn sich das Land gegenüber dem Wasser stark aufgewärmt hat. Als Folge setzt die Seebriese ein, die dann eine Abkühlung bringt, aber bei vorhandener Labilität auch schwach Schauer auslösen kann.

Der Seewind wird auch deshalb explizit erwähnt, weil mit dem Seewind besonders im Frühjahr ein plötzlicher Nebeleinbruch verbunden sein kann, der den visuellen Blickkontakt mit der Drohne unterbinden kann.



Lokale Windsysteme



Andere störende Windsysteme sind **Windkanalisierungen** in großen Gebirgstälern. Als bekannter Vertreter in Europa sei der Mistral erwähnt, der besonders im südlichen Rhonetal bei einer nördlichen Grundströmung für sehr starke und böige Winde verantwortlich ist.

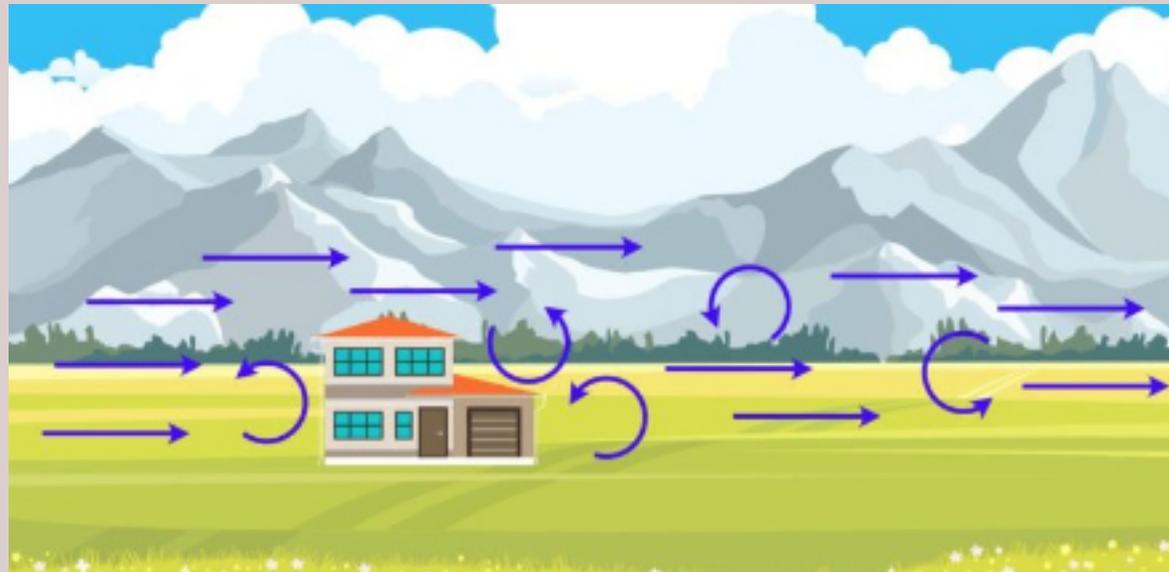
Turbulenzen

Unter Turbulenz versteht man einen Strömungszustand, in dem sich **Wirbel** bilden und wieder auflösen. Turbulenz ist nicht auf Luftströmungen beschränkt; sie sind zum Beispiel auch im Wasser zu beobachten, wenn man von einer Brücke aus die Strömung hinter dem Brückenpfeiler betrachtet.

Turbulenzen treten besonders häufig hinter **Hindernissen** oder in Bodennähe auf, speziell bei unebenen oder wechselnden Untergründen. Wird das UAS von Turbulenzen erfasst, kann es dabei in kurzer Zeit sowohl horizontal als auch vertikal versetzt, oder gar um die Hochachse gedreht werden.

Da in dieser Situation die Reaktion des UAS nur schwer vorauszusehen ist, muss sehr **schnell reagiert** werden. Hier hilft eine gewisse Erfahrung und Übung, weil man leicht die Orientierung verliert, was einen Absturz oder sogar Totalverlust nach sich ziehen kann.

Reibungsturbulenz wird durch die Bodenreibung verursacht – die damit verbundenen Wirbel werden mit der Strömung fortgetragen, bevor sie sich wieder auflösen. Sie ist um so größer, je höher die Grundgeschwindigkeit des Windes ist. Diese Turbulenzart kann weder zeitlich noch räumlich vorhergesagt werden.



Turbulenzen

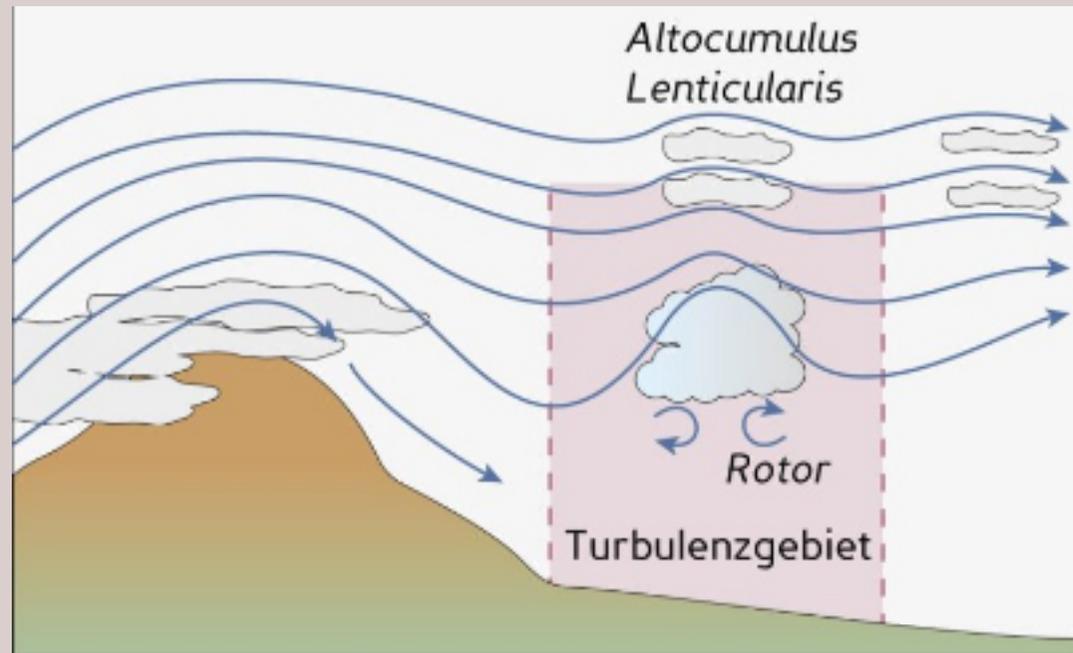
Thermisch bedingte Turbulenz resultiert aus der Tatsache, dass sich die Erdoberfläche mit der Sonneneinstrahlung nicht gleichmäßig erwärmt. Über Sand- und Felsflächen oder auf der sonnenbeschienenen Hangseite ist die Erwärmung größer. Dort können bei labiler Schichtung Warmluftblasen nach oben steigen. Die damit verbundenen Aufwinde können das Steuern des UAS erheblich erschweren. Gerät man mit einem UAS in einen starken Aufwind, so kann dies den Abstieg erschweren oder diesen sogar unmöglich machen.

Oft ist es so, dass thermische Turbulenz und Reibungsturbulenz „Hand in Hand“ arbeiten: mit den Aufwinden werden die durch Reibung hervorgerufene Wirbel mit nach oben getragen.



Turbulenzen

Orographisch bedingte Turbulenz (Föhn) kann beim Überströmen von Hindernissen hervorgerufen werden. Es bilden sich dabei auf der windabgewandten Seite des Gebirges Leewellen, die manchmal anhand der Lenticularis-Wolken sichtbar werden. In den bodennahen Luftschichten können starke „Rotoren“ auftreten, die aufgrund ihrer Stärke alle anderen Turbulenzarten „in den Schatten“ stellen. Die Turbulenz ist in der Regel um so stärker je stärker der senkrechte Anteil des Windes auf den Gebirgskamm ist.



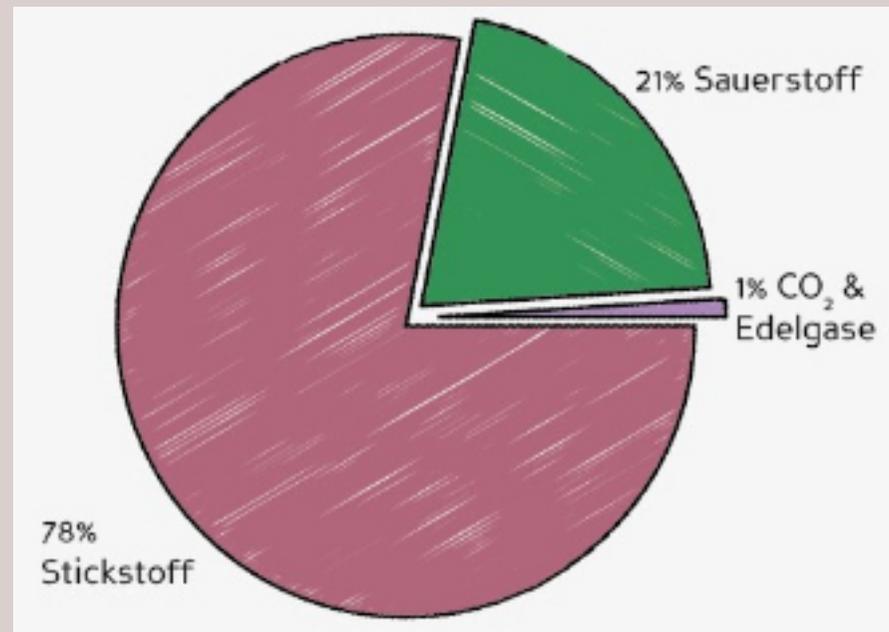
NEBEL

Je nachdem wie dicht der Nebel ist, kann dieser am UAS haften bleiben und Tröpfchen bilden, die sich mit der Zeit vergrößern. Darüber hinaus beeinträchtigt Nebel insbesondere die Sicht, wodurch die Gefahr besteht, das UAS nicht oder kaum noch erkennen zu können.

Luftfeuchtigkeit

Die chemische Zusammensetzung von **trockener Luft** ist nahezu konstant bis in große Höhen:

- 78 % Stickstoff
- 21 % Sauerstoff
- 1% Kohlendioxid (CO₂) und Edelgase



Luftfeuchtigkeit

Ein Gasanteil ist jedoch großen räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen: **Wasserdampf**. Sehr trockene und kalte Luft hat nur einen geringen Wasserdampfanteil, in den Tropen können es bis zu 4 % sein. Der Anteil der anderen Gase verringert sich entsprechend.

Wasser kommt in der Atmosphäre in allen seinen **drei Aggregatzuständen** vor:

- Fest (Eis- und Schneekristalle, Hagel)
- Flüssig (Regen-, Niesel- oder Wolkentröpfchen)
- Gasförmig (unsichtbarer Wasserdampf)

Der Wasserdampf ist in der Meteorologie das interessanteste Gas, da es letztendlich **verantwortlich für das Wetter** mit all seinen Erscheinungsformen ist. Dazu gehören neben Niederschlag auch Nebel und Wolken.

Die **relative Luftfeuchtigkeit** gibt an, wie viel Prozent an maximal möglichem Wasserdampf in der Luft enthalten ist. Die maximal mögliche Menge unterscheidet sich dabei in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Übersteigt die relative Luftfeuchtigkeit 100 %, wird die überschüssige Menge Wasserdampf als Kondensat (Wolken- bzw. Nebeltröpfchen) oder Sublimat (Eiskristalle) ausgeschieden.

Der **Taupunkt** ist dabei diejenige Temperatur, auf die man Luft abkühlen müsste, damit eine relative Luftfeuchtigkeit von 100% (die so genannte „Sättigung“) auftritt.

Der **Spread** ist die Differenz zwischen Temperatur und Taupunkt. Dieser ist hilfreich bei der schnellen Einschätzung der Situation:

- Großer Spread = geringe Luftfeuchtigkeit = geringe Gefahr von Nebel
- Kleiner Spread = große Luftfeuchtigkeit = hohe Gefahr von Nebel

Ein **Beispiel**: Die Lufttemperatur abends beträgt 15 °C, der Taupunkt 12 °C (der Spread ist also 3 °C). Die Nacht ist klar und die bodennahe Luftschicht kühlt sich ab. Fällt die Temperatur unter 12 °C (Spread = 0 °C), dann würde sich Bodennebel bilden.



Nebelarten und -entstehung

Im Grunde handelt es sich bei Nebel lediglich um eine besondere Wolkenart, nämlich eine Wolke, die am Boden aufliegt. Von Nebel spricht man, wenn die **Sichtweite am Boden 1 km unterschreitet**.

Bei Temperaturen unter 0 °C handelt es sich um gefrierenden Nebel. Dieser kann sich durch die Windbewegung an Gegenständen wie Bäumen, Sträuchern, aber auch an fliegenden Objekten in der Luft wie unbemannten Luftfahrzeugen, als Raureif absetzen.

Es gibt im wesentlichen zwei Nebelarten, die in Europa von Bedeutung sind:

- Strahlungsnebel und
- Advektionsnebel.

Strahlungsnebel ist die häufigste Form des Nebels in Mitteleuropa. Er bildet sich in klaren windschwachen Nächten besonders im Winter, wenn die Nächte lang sind und viel Zeit zur Abkühlung der bodennahen Luftschichten zur Verfügung steht. Wenn nun die vorhandene Luftmasse noch feucht ist, sind die Voraussetzungen zur Bildung von Strahlungsnebel gut.

Nebelarten und -entstehung

Bodennebel entsteht dabei zuerst direkt am Boden als flacher Wiesenkerbel, der sich zu **Nebelbänken** (fog patches) weiter verdichtet und sich schließlich zu Nebel entwickelt. Zunächst kann der Himmel dabei noch gesehen werden (Sterne und Mond sind erkennbar), im weiteren Verlauf besteht dann keine Himmelssicht mehr („englischer Nebel“). Spätestens dann ist ein UAS-Flug nicht mehr möglich.



Nebelarten und -entstehung

Die **Nebelauflösung** funktioniert umgekehrt: Zunächst beträgt die Sicht noch weniger als 1 km und die Bewölkung liegt quasi auf. Im Verlauf bessert sich dann zunächst die bodennahe Sicht auf über 1 km. Per Definition spricht man dann nicht mehr von Nebel, sondern von feuchtem Dunst. Der Nebel hebt also vom Boden ab und geht in Hochnebel über mit Untergrenzen von wenigen hundert Fuß. Schließlich löst sich diese Hochnebeldecke überwiegend ganz auf. Es gibt allerdings besonders nebelgefährdete Gebiete (Oberrheingraben, Bodensee), wo sich der Hochnebel im Winter auch den ganzen Tag halten kann.

Wichtig zu merken ist, dass Strahlungsnebel einen **ausgeprägten Tagesgang** aufweist. Kurz nach Sonnenaufgang ist die Wahrscheinlichkeit dafür am größten, nachmittags am geringsten. Zusätzlich tritt er hauptsächlich in der kalten Jahreszeit auf, von November bis Februar. Im Sommer ist Strahlungsnebel recht selten anzutreffen.

Advektionsnebel entsteht, wenn warme und feuchte Luft mit dem Wind in Gebiete mit kaltem Untergrund gelangt. Das Wort „Advektion“ kommt aus dem Lateinischen „advehere“ = heranführen, herankommen. Durch den Kontakt der feuchten Luft mit dem Boden wird sie erzwungenermaßen abgekühlt. Wenn sich die Abkühlung bis unter dem Taupunkt der Luft fortsetzt, kommt es zu Wolkenbildung: das ist Advektionsnebel.

Advektionsnebel kann also recht schnell auftreten, ein ganz typisches Beispiel ist der **Seenebel**, der an der Nordseeküste innerhalb weniger Minuten einen Flugplatz in Nebel hüllen kann.

Advektionsnebel hat im Gegensatz zu Strahlungsnebel **keinen Tagesgang**. Wenn die Strömungsverhältnisse für Nachschub sorgen, dann kann er tagelang anhalten. Wenn beispielsweise milde und feuchte Luft aus Südwesten über eine größere Schneedecke gelangt, kann es tagelang nebelig bleiben, bis der Schnee schließlich abgeschmolzen ist.

WOLKEN

Wolken sind in der Erdatmosphäre **schwebende winzige Wassertröpfchen** und / oder Eiskristalle. Die Sinkgeschwindigkeit der Tröpfchen ist sehr gering, so dass eine Wolke zunächst noch keinen Niederschlag beinhalten muss.



Wolkenbildung

In der Atmosphäre gibt es nicht nur den horizontalen Wind, sondern auch eine Vertikalkomponente des Windes. Luft kann aufsteigen – sie wird gehoben – oder auch absinken. Allen **Hebungsvorgängen** gemeinsam ist die Tatsache, dass sich Luft abkühlt, wenn sie gehoben wird, und erwärmet, wenn sie absinkt.

Die Abkühlung bei der Hebung führt dann in der Regel dazu, dass ab einer bestimmten Höhe **Sättigung** eintritt. Die Luft kann dann bei weiterer Hebung keinen Wasserdampf mehr speichern: Es bilden sich Wolken.

Hierfür gibt es verschiedene Ursachen:

Bei **thermischer Bildung** steigen Warmluftblasen auf, wobei sich die Luft abkühlt. Die Basis (untere Grenze) der Quellbewölkung nennt man dabei das „Cumulus-Kondensationsniveau“.

Es gilt hierzu eine einfache Faustformel:

- Spread x 400 = Wolkenuntergrenze in Fuß (ft)
- Spread x 125 = Wolkenuntergrenze in m.

Beispiel Wolkenuntergrenze in Fuß (ft):

Lufttemperatur = 20° C

Taupunkt = 14° C

Spread = 6

Formel: $6 \times 400 =$ Wolkenuntergrenze 2.400ft

Beispiel Wolkenuntergrenze in Meter (m):

Lufttemperatur = 24° C

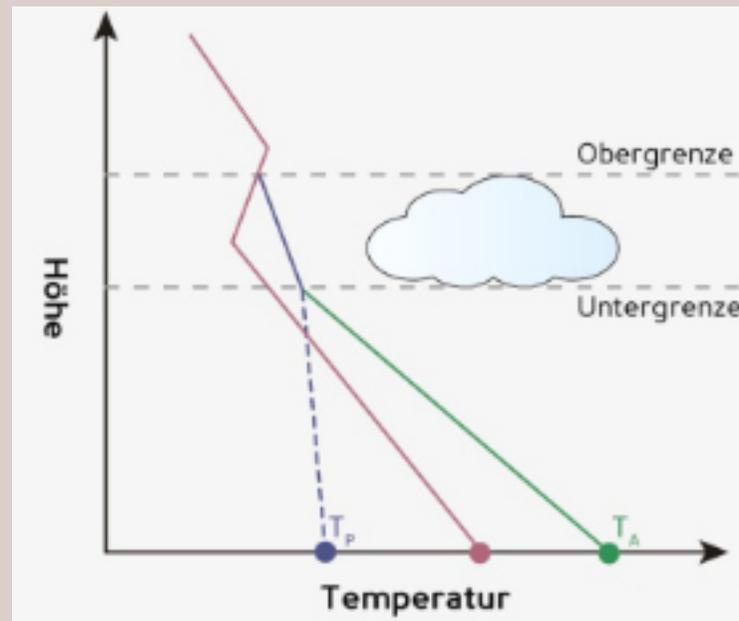
Taupunkt = 17° C

Spread = $7 \times 125 =$ Wolkenuntergrenze = 875 Meter



Wolkenbildung

Im folgenden **Schaubild** zeigt die rote Linie die Temperatur der umgebenden Luft. Erwärmt sich ein Luftpaket mit Taupunkt TP stärker als die Umgebung, z.B. bis zur Temperatur TA, so steigt es auf und kühlt sich dadurch wieder ab (grüne Linie). Der Taupunkt nimmt während des Aufstiegs wesentlich weniger ab (blaue gestrichelte Linie). Erreicht die Temperatur des aufsteigenden Luftpaketes den Taupunkt (Schnittpunkt grüne Linie mit blauer gestrichelter Linie), steigt es weiter, es findet aber Kondensation – also Wolkenbildung – statt. Die Inversionsschicht verhindert schließlich einen weiteren Aufstieg, weil das Luftpaket hier nicht mehr wärmer als die Umgebung ist.



Beim **Aufgleiten an einer Frontfläche** wie beispielsweise einer Warmfront wird die Luft großräumig dazu gezwungen, aufzusteigen. Dies führt zu Wolken- und Niederschlagsbildung.

Die untere Luftschicht wird durch Reibungseffekte meist **turbulent durchmischt**. Dies kann bei ausreichend Feuchtigkeit zur Ausbildung einer Wolkendecke führen.

Wird ein Gebirge vom Wind angeströmt, so muss die Luft aufsteigen, es kommt zu einer **Erzwungenen Hebung an Hindernissen**. Dies führt dann im Stau der Berge meist zu geschlossener Bewölkung und Niederschlägen.

Klassifizierung von Wolken

Grundsätzlich bestehen mehrere Möglichkeiten, Wolken in verschiedene Klassen einzuteilen. Eine Methode besteht darin, das **Aussehen der Wolken** als Unterscheidungsmerkmal heranzuziehen:

1. **Unterteilte Schichtwolken (mit Lücken)**: Das Aussehen ist schollen-, walzen- oder faserförmig. Dazu gehören z.B. die bekannten Schäfchenwolken.

2. **Nicht unterteilte Schichtwolken (ohne Lücken)**: Diese haben meist eine große horizontale Ausbreitung und eine diffuse Untergrenze. Dazu zählen Aufzugswolken vor einer Warmfront, aber auch geschlossene Stratocumulus-Wolken unterhalb einer Inversion.

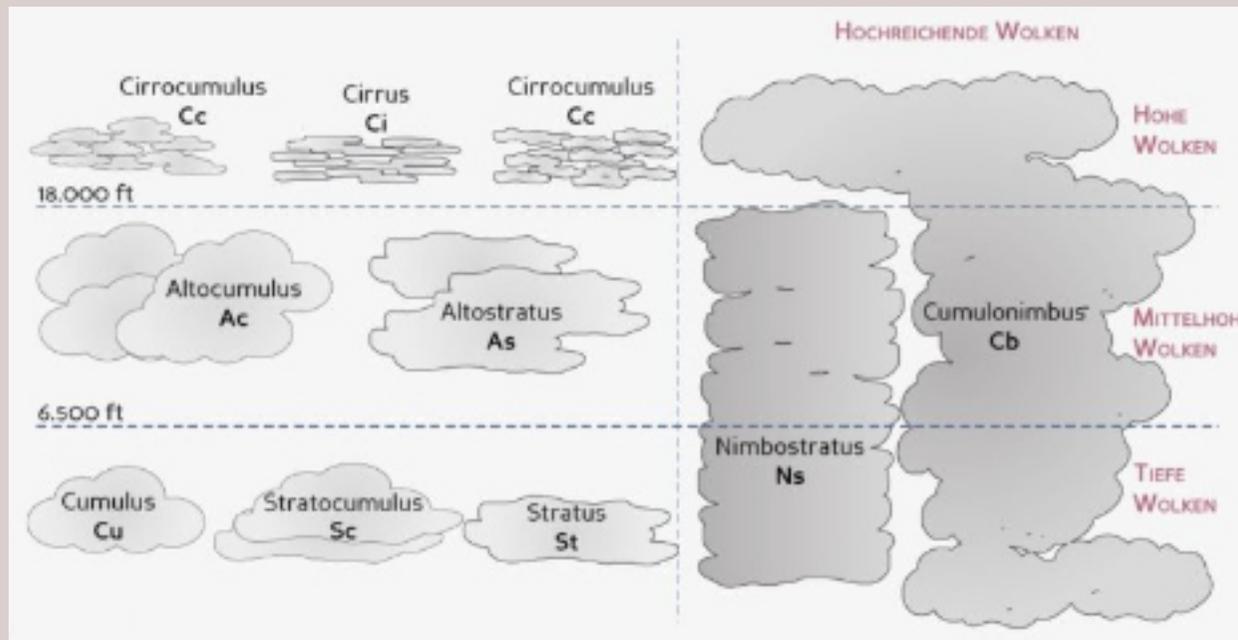
3. **Wolken mit geringer horizontaler Ausdehnung aber bedeutender vertikaler Ausdehnung**: Diese haben eine klare äußere Begrenzung. Dazu zählen alle Formen der Quellwolken bis hin zur Gewitterwolke.

Ein anderer Ansatz platziert die Wolken in bestimmten so genannten Wolkenstockwerken. Dabei werden das obere, mittlere und untere Wolkenstockwerk unterschieden. Einige Wolken beanspruchen auch alle drei Stockwerke.

Klassifizierung von Wolken

Die Bezeichnung der Wolken haben ihren Ursprung im Lateinischen und beziehen sich auf das Aussehen der Wolken:

- Circus: Haarlocke, Federbusch
- Altum: Höhe (mittlere Höhe)
- Nimbus: Regenwolke
- Stratus: ausgedehnt, ausgebreitet
- Cumulus: Ansammlung, Haufen



Klassifizierung von Wolken

Die folgenden Wolken befinden sich im tiefen Stockwerk und haben das Potential, neben Niederschlag auch den Sichtkontakt mit dem UAS einzuschränken.

Der **Cumulus** (oder die Quellwolke) ist eine Haufenwolke, die sich insbesondere in der vertikalen entwickelt. Sie hat klar abgegrenzte Ränder. Die Vertikalbewegung wird durch Thermik initiiert, also aufsteigende Warmluftblasen, die sich infolge der Sonneneinstrahlung vom Erdboden ablösen. Jeder Cumulus beginnt als flache Schönwetterwolke, kann sich aber je nach Wetterlage mächtig entwickeln. Am Ende der Entwicklung – vor dem Übergang zur Gewitterwolke – steht der Cumulus Congestus (mächtig), der wie ein Blumenkohl aussieht.



Klassifizierung von Wolken

Wächst der Cumulus Congestus weiter zu einem **Cumulonimbus** (Gewitterwolke), breitet er sich in etwa 11 km Höhe aus und beginnt zu vereisen. Der obere Teil, der Amboss genannt wird, hat ein faseriges Aussehen. Spätestens jetzt ist mit kräftigen Schauern und / oder Gewittern zu rechnen. Damit verbunden sind auch kräftige Böen und Blitzeinschlag. Das UAS sollte bereits vor der Entwicklung zu einer Gewitterwolke wieder an Boden sein.



Klassifizierung von Wolken

Der **Stratus** ist eine Schichtwolke mit ziemlich tiefen Untergrenzen, er kann damit den Sichtkontakt Zum UAS einschränken. Stratus tritt oft als Begleitbewölkung zu Nimbostratus auf, da der Regen in den untern Luftschichten auch verdunstet und besonders im Stau von Bergen erneut Wolken bildet. Auch im Zusammenhang von Strahlungsnebel ist er eine Wolkenform, die sich in der Auflösungsphase des Nebels lange halten kann. Schließlich gibt es noch einen sogenannten Turbulent-Stratus, der sich bei kräftigen Wind dadurch entwickelt, dass die unteren feuchten Luftschichten turbulent durchmischen.



Klassifizierung von Wolken

Der **Stratocumulus** ist eine Mischung zwischen der reinen Quellwolke und dem Stratus. Meist ist diese Wolke aufgelockert in Ballen oder Walzen, unterhalb von Inversionen aber mit Ausbreitungstendenz. Häufig kommt diese Wolke ohne Niederschlag, sie kann sich jedoch mit der täglichen Erwärmung in einen Cumulus- oder Cumulonimbuswolke verwandeln.

Der **Nimbostratus** ist die typische Regenwolke, die stundenlang Landregen mit sich bringen kann. Er tritt häufig in Verbindung mit Warmfronten auf und endet erst mit Durchgang der Warmfront. Aber auch im Stau von Gebirgen ist er anzutreffen, oft mit ergiebigen Regen oder Schnee.



Wolkenangaben in Wetterberichten

In Wetterberichten oder Wettermeldungen werden Wolken mit dem **Bedeckungsgrad** und der Basis (=Wolkenhöhe) über Grund angegeben. Ist der Himmel nicht erkennbar, z.B. wegen Nebels, so kann anstelle der Wolkenuntergrenze eine Vertikalsicht in ft angegeben werden.

Achtel	Bezeichnung	Abkürzung
0	sky clear	SKN / CLR
1-2	few	FEW
3-4	scattered	SCT
5-7	broken	BKN
8	overcast	OVC
OBSC	obscured	VV [hhh]

Die **Wolkenart** wird mit folgenden beiden Ausnahmen nicht angegeben:

- TCU: Towering Cumulus, Cumulus Congestus
- CB: Cumulonimbus

Diese beiden Wolkenarten sind für die Luftfahrt gefährlich und müssen besonders beachtet werden. Liegt die Wolkenuntergrenze unterhalb von 500 ft, oder werden CB's gemeldet, sollte auf einen UAS-Flug verzichtet werden.



NIEDERSCHLAG

Die meisten unbemannten Luftfahrzeuge, die in der OFFENEN Kategorie geflogen werden, sind so genannte „consumer drones“. Diese werden in hohen Stückzahlen mit einem breiten Funktionsspektrum produziert, weisen jedoch auch Schwächen auf.

Viele dieser „Hobbydrohnen“ sind daher **nicht wasserdicht** und die Elektronik sowie die Motoren sind sehr empfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Zur Kühlung befinden sich am Gehäuse häufig Schlitze, wodurch schnell Wasser eindringen und den Motor zerstören kann.

Definition

In der Meteorologie versteht man unter Niederschlag alle aus den Wolken fallenden Formen des atmosphärischen **Wasserdampfs**, also beispielsweise Regen, Schnee oder Eis. In welcher Form der Niederschlag den Boden erreicht hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von der Temperaturverteilung und den Luftströmungen

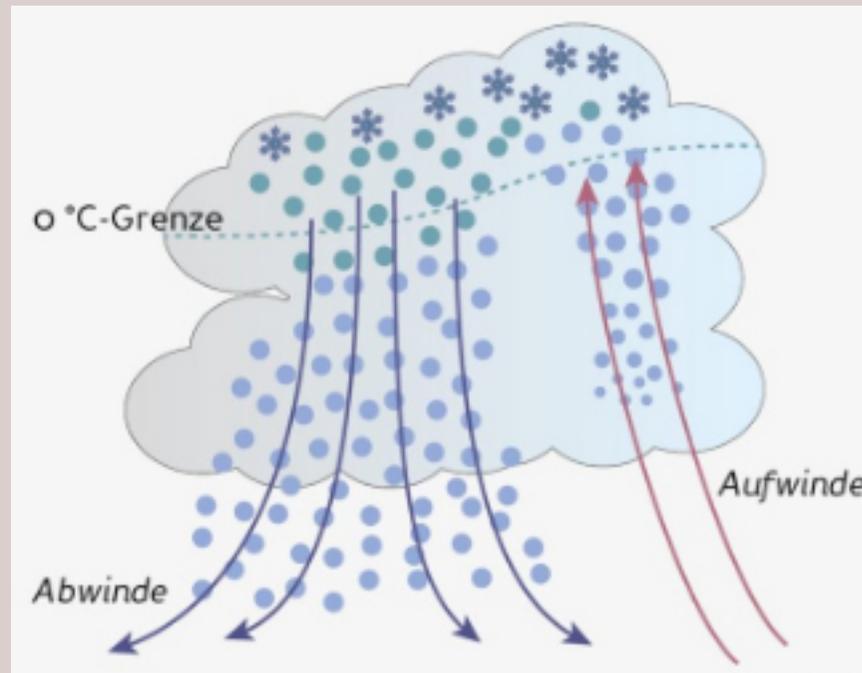
Zur **Messung** wird Niederschlag immer noch ganz einfach in einem zylindrischen Gefäß gesammelt und die Niederschlagssumme an einer Skala abgelesen. Automatische Wetterstationen verwenden i.d.R. die Kippwaagen-Niederschlags-Sensorik, bei welcher Tropfen mit bestimmter Größe gezählt werden.

Die **Niederschlagsmenge** gibt an, wie viel Niederschlag auf einen Quadratmeter einer ebenen Fläche gefallen ist. In mittleren Breiten beträgt die jährliche Niederschlagsmenge 600 bis 1.000 Liter pro Quadratmeter – im Hochgebirge bis zu 3.000 Liter pro Quadratmeter.

Niederschlagsentstehung

Niederschlag entwickelt sich in mitteleuropäischen Breiten hauptsächlich in sogenannten **Mischwolken**. Dies sind Wolken, die gleichzeitig unterkühlte Wassertröpfchen und Eiskristalle enthalten. Es ist wichtig zu wissen, dass Wolkentröpfchen unterhalb von 0 °C nicht spontan gefrieren, sondern bis -35 °C auch unterkühlt auftreten können (ohne zu gefrieren).

In solchen Wolken **wachsen die Eiskristalle** zulasten der unterkühlten Wassertröpfchen, werden dadurch allmählich schwerer und beginnen zu sinken. Auf dem Weg nach unten stoßen sie mit weiteren unterkühlten Wassertröpfchen zusammen, die dann anfrieren. Dadurch sinken die Eiskristalle schneller. Bei dem Regen, der am Boden ankommt, handelt es sich also eigentlich um geschmolzenen Schnee.



Dies bedeutet gleichzeitig, dass nennenswerter Niederschlag nur aus relativ **hochreichender Bewölkung** fallen kann, die auch genügend unterkühlte Wassertröpfchen enthält. Ist die Temperaturverteilung in der Wolke durchgängig negativ, dann handelt es sich um Schnee, ansonsten wird der Schnee in der Regel schmelzen.

Niederschlagsarten

Zunächst können **konvektive und stratiforme Niederschläge** unterschieden werden. Zu konvektiven Formen gehören Schauer und Gewitter, zu den stratiformen Land- und Sprühregen.

Konvektive Niederschläge, also insbesondere **Schauer und Gewitter**, stellen für UAS die größere Gefahr dar. Sie sind zum einen viel intensiver und gehen darüber hinaus häufig mit negativen Begleiterscheinungen wie Blitzen oder starken Böen einher. Gewitter treten entweder vereinzelt als sommerliches Wärmegewitter auf oder „in Gruppen“ an Kaltfronten.



Niederschlagsarten

Bei leichtem **Sprühregen** ist ein UAS-Flug hingegen nicht grundsätzlich gefährlich.

Wenn die unterkühlten Wassertröpfchen auf dem Weg zum Erdboden schmelzen gibt es **flüssige Niederschläge**. Man unterteilt diese je nach Tropfengröße in Regen (RA: rain) und Sprühregen (DZ: drizzle).

Bei den **festen Niederschlägen** kommen neben Schnee (SN: snow) auch weitere Formen wie Hagel oder Graupel vor.

Unter **gefrierenden Niederschlägen** versteht man insbesondere den Glätteisregen. Da dieser eine besondere Gefahr auch für UAS darstellt, wird er weiter unten bei der Vereisung gesondert behandelt.

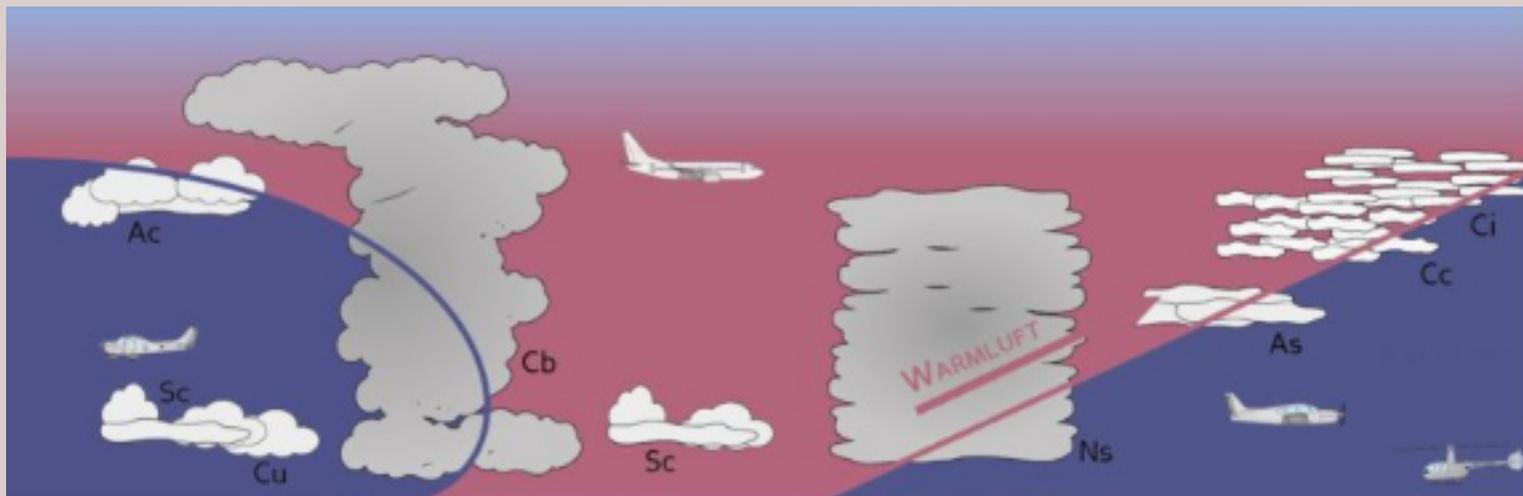
Tau oder Reif sind so genannte „**abgesetzte Niederschläge**“. Auch unbemannte Luftfahrzeuge können davon betroffen werden, wenn sie sich in sehr feuchten Luftschichten bewegen. Steigt ein UAS langsam ab, dann ist ihre Temperatur in der Regel kälter als der Taupunkt der Umgebungsluft. Somit kann sich Tau oder Reif auf der Oberfläche absetzen.

Niederschlag an Fronten

Als Fronten werden die Übergangsbereiche zwischen verschiedenen Luftmassen bezeichnet. Sie bieten ideale Voraussetzungen für die Bildung von Niederschlag, da die nach hinten geneigte Frontfläche als Gleitebene zum Aufsteigen von wärmerer Luft dient.

Vor Warmfronten (rechts in der Abbildung) kommt es oft zu länger anhaltendem Landregen, im Winter zu Beginn oft Schnee, der dann in Regen übergeht. Der Durchlauf einer Warmfront beginnt mit hoher Aufzugsbewölkung (CI, CS), gefolgt von Altostratus (AS). Aus diesem kann bereits der erste leichte Regen fallen. Anschließend verdichtet sich das Geschehen zu Nimbostratus (NS), aus dem es mehrere Stunden regnen kann. Gleichzeitig bildet sich auch noch tiefer Stratus durch den Regen. Erst mit der Passage der Warmfront hört der Niederschlag auf.

Bei Kaltfronten (links in der Abbildung) ist die Hebung sehr viel heftiger, sodass es insbesondere im Sommer häufig auch zu Gewittern kommen kann. Damit einher gehen heftige Schauer mit Blitzen und starken Böen. Die Passage einer Kaltfront ist also unbedingt abzuwarten, bevor es mit dem UAS in die Luft geht.



SICHT

Der Sicht kommt eine besondere Bedeutung zu, weil das UAS in der OFFENEN Kategorie ausschließlich in Sichtweite (VLOS) betrieben werden darf. Daher ist eine Beurteilung der Sicht im Umfeld des Startgebietes dringend empfehlenswert.



Dunst und Nebel

Per Definition spricht man in der Meteorologie von Nebel, wenn die Sichtweite **weniger als 1.000 m** beträgt. Der große Schwankungsbereich zwischen 1 km und 8 km wird als Dunst bezeichnet.

Gemessen wird an einem Flughafen immer die vorherrschende Sichtweite. Das muss nicht zwangsläufig die schlechteste Sicht sein, die am Flughafen anzutreffen ist. So kann es sein, dass es selbst an einem Flughafen sehr große Unterschiede in der Sicht gibt, insbesondere beim Auftreten von Nebelschwaden (fog patches).

Die Sichtweite aus Wettermeldungen kann also zwar zunächst als grobe Einschätzung dienen. Die **Entscheidung** ob der Flug durchführbar ist, kann in Bezug auf die Sicht jedoch meist nur direkt vor Ort getroffen werden.

Einflussfaktoren

Einen entscheidenden Einfluss spielt die **Luftfeuchtigkeit**. Ist diese hoch (relative Feuchtigkeit nahe 100 %, Spread unter 1 °C), kann sich feuchter Dunst oder gar Nebel bilden.

Sofern es sich um morgendlichen Strahlungsnebel handelt, besteht die Chance, dass dieser sich im Vormittagsverlauf **auf löst**. Wird wie beim Advektionsnebel jedoch immer neue Feuchtigkeit nachgeliefert, kann man von einer länger anhaltenden Sichtbeeinträchtigung ausgehen.

Darüber hinaus können **alle Niederschlagsformen** die Sicht stark beeinflussen. Bei stratiformen Niederschlägen (Landregen) wird die Sichteinschränkungen wahrscheinlich von längerer Dauer sein. Bei Schauern (konvektive Niederschläge) hat die Sichteinschränkung eine untergeordnete Bedeutung, weil der Niederschlag an sich das größere Problem darstellt. Insbesondere Schneeschauer können jedoch dazu führen, dass sich innerhalb von Minuten die Sicht von 20 km auf Werte unter 1.000 m verschlechtert.

Schlechte Sicht kann aber auch eine **Luftmasseneigenschaft** sein. Wenn eine Luftmasse beispielsweise bereits über viele Tage unter Hochdruckeinfluss liegt, dann können sich dort Staub- und Industriepartikel ansammeln. Der damit verbundene trockene Dunst verbessert sich auch dann nicht mehr, wenn die Sonne scheint.

VEREISUNG

Vereisung ist eine **generelle Gefahr** in der Luftfahrt und betrifft sowohl große Verkehrsflugzeuge als auch unbemannte Luftfahrzeuge. Es können Sensoren ausfallen, aber auch die Propeller sind vereisungsgefährdet. In der professionellen Luftfahrt gibt es verschiedene Enteisungsmöglichkeiten, UAS im Hobbybereich sind damit in der Regel aber nicht ausgestattet.



Definition

Eis an Luftfahrzeugen bildet sich durch das **Gefrieren von unterkühlten Wassertöpfchen** oder durch **Reifbildung** (Sublimation). Der Vereisungsprozess kann innerhalb von Wolken, in vereisendem Niederschlag, aber auch im wolkenfreien Raum erfolgen (gefrierender Regen).

Wasser kann in Form von kleinen Tröpfchen stark unter 0°C abgekühlt werden, bevor die Tröpfchen gefrieren. Das liegt daran, dass nicht in jedem Wolkentröpfchen ein sogenannter **Kristallisationskern** vorhanden ist, von dem der Gefrierprozess ausgehen kann. Daher besteht Wolkenluft bis zu -15°C fast ausschließlich aus unterkühlten Wassertröpfchen.

Beim **Aufschlag eines unterkühlten Wassertröpfchens** auf die Erdoberfläche oder an einem Flugzeug wird der Gefrierprozess spontan durch Schock ausgelöst. Die Art und Weise, wie sich das Eis dann am UAS ablagert hängt stark von der Temperatur ab. Bei Temperaturen von nur wenig unter 0°C ist der Gefrierprozess langsam, das Eis zerfließt und haftet gut.

Eine Erfahrung aus Praxis: Wer als „Laternenparker“ morgens im Winter zu seinem Auto kommt und eine mit Tau beschlagene Windschutzscheibe vorfindet, freut sich zunächst darüber, dass nicht „gekratzt“ werden muss. Beim Betätigen der Scheibenwischer kommt dann das kalte Erwachen: das unterkühlte Wasser auf der Scheibe **gefriert durch Schock** spontan.

Auch wenn am Boden noch **leicht positive Temperaturen** herrschen, muss daran gedacht werden, dass die Temperatur mit der Höhe um etwa $0,6^{\circ}\text{C}$ pro 100 m abnimmt. Wenn dann das UAS noch in der Nähe der Basis von Bewölkung geflogen wird, kann die erhöhte Anzahl an unterkühlten Wassertröpfchen in der Nähe der Wolke zu langsamen Eisansatz führen, insbesondere an den Propellern.

Merke: Unbemannte Luftfahrzeuge haben in der Nähe von Wolken nichts verloren. Das gilt insbesondere bei Temperaturen um den Gefrierpunkt oder darunter.



Eisansatz und Auswirkungen

Die **Propeller** sind von allen Bauteilen am meisten von Eisansatz gefährdet. Dies liegt vor allem an der hohen Umdrehungszahl von etwa 8.000 U/Min. Die Berührung mit den unterkühlten Wassertröpfchen erfolgt zunächst mit der Stirnkante; wenn das Eis aber sehr langsam gefriert, dann kann es nach hinten fließen und sich auch in anderen Bereichen ansiedeln.

Das Resultat ist eine **geringere Leistung** der Propeller, da sich das Profil verschlechtert. Darüber hinaus kommt es zu einer Gewichtszunahme, die jedoch zunächst nicht so groß ist. Außerdem kann der Lauf der Propeller unwuchtig werden, Teile des Eisansatzes können abbrechen und werden weggeschleudert. Beim Auftreffen auf das UAS-Gehäuse können Beschädigungen entstehen.

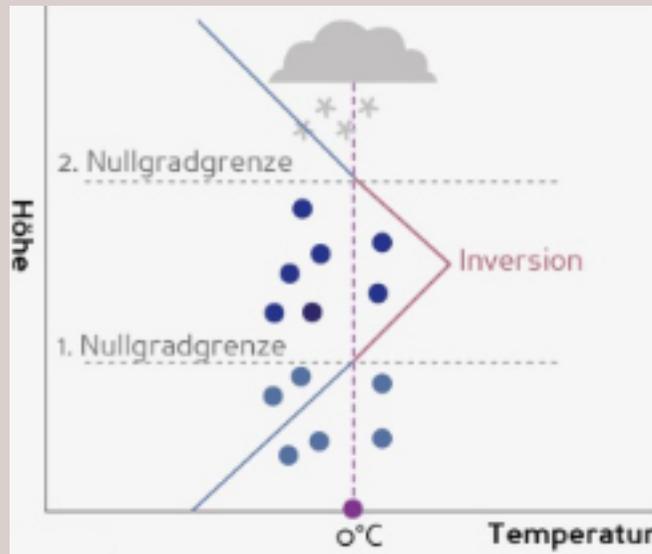
Eine weitere Gefahr besteht in der Vereisung von **Sensoren**, die für die Stabilisierung und Flugkontrolle notwendig sind. Der Luftdrucksensor wird beispielsweise für eine genaue Positionierung des UAS auf der Z-Achse benötigt (Altitude-Hold). Friert die Öffnung zu, kann der Luftdruck nicht mehr ermittelt werden und die Stabilisierung bricht zusammen.

Eisansatz und Auswirkungen

Gefrierender Regen (freezing rain) oder gefrierender Sprühregen (freezing drizzle) sind die gefährlichsten Vereisungsarten, nicht nur für die Luftfahrt. Das tückische daran ist, dass gefrierender Regen die einzige Vereisungsart ist, die **auch in völlig wolkenfreiem Raum** auftreten kann. Das dabei entstehende Eis haftet in der Regel gut und weist eine hohe Vereisungsintensität auf.

Gefrierender Niederschlag erfordert eine **Inversionswetterlage mit Niederschlag**: In Bodennähe herrschen negative Temperaturen, in der Höhe findet man aber eine positive Luftschicht, die vertikal so mächtig ist, dass der Schnee, der diese positive Schicht passiert, schmilzt. In der Regel sind 300 m hierfür ausreichend.

Der Regen (= geschmolzener Schnee) fällt dann wieder in eine negative bodennahe Grundsicht, ohne dass er erneut gefriert – er kommt als unterkühltes Wasser an und **schockgefriert** beim Kontakt mit der Erdoberfläche spontan. Glatteis entsteht. Während des Fluges gefriert der Regen schnell direkt am UAS.



Potenziell gefährliche Wetterlagen sind meist längere Frostperioden, die mit ersten leichten atlantischen Tiefausläufern zu Ende gehen. Die Warmfront, die dann in der Regel von Westen hereindrückt, ist zu schwach, um auch am Boden die flache Kaltluftschicht wegzuräumen. In der Höhe kann sie sich allerdings mit der positiven Nase durchsetzen. Daher tritt gefrierender Niederschlag am häufigsten im ausgehenden Winter auf.

WETTERMELDUNGEN UND VORHERSAGEN

Es sollte nun klar sein, dass das **Wettergeschehen einen großen Einfluss** auf jeden UAS-Flug hat. Ungünstige Wetterbedingungen können dem UAS schaden (z.B. durch Feuchtigkeit), sie können aber auch den sicheren Betrieb an sich gefährden. Beispiele hierfür gibt es viele, angefangen mit dem verlorenen Sichtkontakt, Abdriften in zu starkem Wind oder Vereisung bei Minustemperaturen.

Jeder Fernpilot hat sich gemäß den europäischen Luftverkehrsregeln (SERA) anhand verfügbarer Wetterberichte und -vorhersagen **ausreichend zu informieren**. Dies gilt auch für UAS-Flüge, wobei das Einsatzgebiet in der Regel deutlich kleiner ist als bei einem bemannten Flug. In jedem Fall muss auch das Betriebshandbuch des UAS hinzugezogen werden und die zulässigen Beschränkungen (z.B. maximale Windgeschwindigkeiten) dürfen nicht überschritten werden.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen folgenden Wetterinformationen:

- **Aktuellen Wetterdaten**, die den momentanen Wetterzustand textlich oder grafisch beschreiben, und
- **Vorhersagedaten** aus Wettermodellen sowie
- einer **Übergangszone** von ein bis zwei Stunden, deren Daten mit sogenannten Nowcasting-Verfahren gewonnen werden. Nowcasting ist aus „Now“ (jetzt) und „Forecast“ (Vorhersage) abgeleitet und soll ausdrücken, dass es sich um eine „Kurzfrist-Methode“ handelt. Auch diese Produkte, insbesondere Kurzfrist-Radar-Vorhersagen, sind für UAS-Flüge interessant.

Die Wetterdienste haben für die Luftfahrt **zugeschnittene Produkte** entwickelt, die teilweise kostenpflichtig sind. Im Folgenden wird auf eine Auswahl eingegangen, die auch für die professionelle Luftfahrt geeignet ist. Auch für UAS-Flüge – gerade wenn diese regelmäßig durchgeführt werden – kann es sinnvoll sein, auf solche Produkte zurückzugreifen. Letztlich ist auch die Einschätzung vor Ort entscheidend.

Wichtig zu wissen ist bei allen Wetterinformationen: Die Zeitangaben beziehen sich in der Regel auf die Zeit „**UTC**“ (Universal Time Coordinated).

Während der mitteleuropäischen Sommerzeit gilt: MESZ / CEST = UTC + 2 Std.

Außerhalb der Sommerzeit gilt: MEZ / CET = UTC + 1 Std.



METAR und TAF

Ein **METAR** ist eine Routinewettermeldung eines Flugplatzes. Sie können verwendet werden, um das **aktuelle Wetter** im Detail beurteilen zu können. Dazu sollte man einen Flugplatz verwenden, der dem Einsatzbereich geographisch und von der Höhenlage in etwa entspricht.

METARs werden **alle 30 Minuten** neu erstellt und haben folgendes Format:

Name	ICAO-Kennung	Zeit	Wind	Sicht	Wetter	Wolken	Temp./ Taup.	QNH	Trend
METAR	EDDL	081250Z	27010KT	4000	-DZ	BKN008	03/02	Q1011	NOSIG

Weitere Informationen und eine detaillierte Beschreibung findet man unter:

https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/luftfahrt/metar_taf.pdf?_blob=publicationFile&v=1

Ein **TAF** ist eine codierte Vorhersage für einen Flughafen in einem METAR-ähnlichen Format. Es gibt TAFs mit 9 Stunden Vorhersagezeitraum (Ausgabe alle 3 Stunden) und mit 24 oder 30 Stunden (Ausgabe alle 6 Stunden).

Da bei der Erstellung von TAFs ICAO-Vorschriften angewendet werden müssen, die sich an den Erfordernissen der Verkehrsluftfahrt orientieren, sind TAFs mit einer gewissen **Vorsicht** zu interpretieren. So ist z.B. leichter Niederschlag keine Wettererscheinung, die vorhergesagt werden muss, falls die Sicht nicht unter 4 km absinkt. Brauchbar in einem TAF sind die Windvorhersagen, weil hier zum Beispiel Windänderungen vorhergesagt werden.

Name	ICAO-Kennung	Zeit	Gültig	Wind	Sicht	Wetter	Wolken	Änderung
TAF	EDDL	031100Z	0312/ 0418	30010KT	1500	BR	BKN008	BECMG 0317/ 0319 0300 FZFG

TAFs sind sinnvoll, wenn ein **längerer Einsatz** geplant ist, um die Grundstruktur des Wetters in einem Zeitraum bis etwa 9 Stunden zu erfassen.

Weiterführende Informationen findet man unter:

https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/luftfahrt/metar_taf.pdf?_blob=publicationFile&v=1



GAFOR

Der GAFOR ist eine Wettervorhersage für den Sichtflug und beschreibt die Entwicklung von **Sicht und Wolkenuntergrenzen** in einem sogenannten GAFOR-Gebiet für einen Zeitraum von 6 Stunden.

Ein GAFOR-Gebiet ist ein recht einheitlicher Wetterraum und die Vorhersage bezieht sich auf den **überwiegenden Wetterzustand** innerhalb dieses Gebietes. Das impliziert allerdings, dass es innerhalb des Gebietes auch Bereiche mit besseren oder schlechteren Bedingungen geben kann. Im alpinen Gelände (Österreich, Schweiz) werden diese Vorhersagen für die Hauptflugstrecken gemacht.

Das Flugwetter wird in 5 Klassen eingeteilt, was Sichten und Wolkenuntergrenzen betrifft:

	Bodensicht		Untergrenze der Bewölkung (Bedeckungsgrad $\geq 5/8$) über Bezugshöhe
C = CHARLIE (frei/clear) (national)	mind. 10 km	und	mind. 5.000 ft
O = OSCAR (offen/open)	mind. 8 km	und	mind. 2.000 ft
D = DELTA (schwierig/difficult)	mind. 5 km	und / oder*	mind. 1.000 ft
M = MIKE (kritisch/marginal)	mind. 1,5 km	und / oder*	mind. 500 ft
X = X-RAY (geschlossen/closed)	weniger als 1,5 km	und / oder*	unter 500 ft

Es sollte beachtet werden, dass im GAFOR nur Wolken vorhergesagt werden deren Bedeckungsgrad 4 Achtel übersteigt, also BKN (broken, 5-7 Achtel) und OVC (overcast, 8 Achtel).

Die **Wolkenuntergrenze** bezieht sich dabei auf eine Referenzhöhe, die für jedes GAFOR-Gebiet festgelegt wurde. Zusätzlich zu Wolken und Wind werden auch gefährliche Wetterelemente (Gewitter, Hagel, gefrierender Niederschlag) oder störende Einflüsse (regen Sprühregen, Nebel) mit vorhergesagt.

Weiterführende Informationen findet man unter: <https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/luftfahrt/gafor.pdf?blob=publicationFile&v=1>



Radar- und Blitzbilder

Das Wetterradar ermöglicht flächendeckende **Niederschlagsmessungen** und kann zudem Blitzdaten anzeigen. Die Radarechos werden je nach Intensität entsprechend in unterschiedlichen Farben dargestellt, Blitze werden meist mit einem violetten Kreuz oder einem Blitzsymbol dargestellt.

Hochaufgelöste Radarbilder liegen alle 5 Minuten vor, Blitzdaten sogar in einminütigem Abstand. Die **Genauigkeit** der Radarmessung beträgt 1 km, kleinere Objekte können also nicht erfasst werden. Auch Sprühregen und leichter Schneefall wird von Radargeräten nicht immer erfasst.

In der Regel erlauben es die Apps zudem, die **Entwicklung** zu verfolgen und bis zu 2 Stunden in die Zukunft zu schauen. Spätestens 15 Minuten bevor der Niederschlag am jeweiligen Einsatzort des UAS erwartet wird, sollte der Flug beendet werden.



Flugleistung

Die von einem (unbemannten) Luftfahrzeug erbrachte Leistung ist nicht konstant, sondern von verschiedenen Faktoren abhängig. Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss hat dabei die aktuelle Wetterlage, denn sowohl der Luftdruck und die Dichte als auch die Luftfeuchtigkeit, Temperatur und bei Start und Landung auch der Bodenwind können sich in entscheidendem Maße auf die Flugeigenschaften auswirken.

Zudem spielt die Beladung – also die Menge und Verteilung der Masse an Bord – eine große Rolle. Bereits eine geringe Verschiebung des Schwerpunktes durch eine falsche Beladung kann sich gravierend auf die Flugeigenschaften und die Sicherheit auswirken. Das Anbringen von Zusatzausrüstung wie Kameras muss also exakt und gemäß den Herstellervorgaben erfolgen.

Die größte Zahl der unbemannten Luftfahrzeuge wird mit Hilfe von leistungsfähigen Batterien betrieben. Auch hier ist eine sachgemäße Handhabung essenziell, um Unfälle zu vermeiden und die Leistungsfähigkeit des UAS nicht zu beeinträchtigen.

Es ist äußerst wichtig, dass Sie sich vor dem Flug mit diesen Faktoren auseinandersetzen und in die Flugplanung miteinbeziehen.



MASSEN

Die Masse eines unbemannten Luftfahrzeuges spielt nicht nur rechtlich bei der kategorischen Einordnung in eine Klasse, sondern auch in Bezug auf die Flugleistungen eine große Rolle. So gibt es vom UAS-Hersteller vorgegebene Grenzen für Maximalbeladungen, die sich jeweils auf ein spezielles UAS beziehen und im Handbuch nachzulesen sind. Ein Überschreiten dieser Maximalwerte ist nicht zulässig und kann zu einem fahrlässig herbeigeführten Absturz führen.

Darüber hinaus hat die Masse Einfluss auf die (theoretische) maximale Flughöhe, die Steigleistungen, den Energieverbrauch und die Fluggeschwindigkeit. Sie sollten also die maximal zulässige Masse Ihres UAS kennen und sicher sein, dass diese bei einem Flug nicht überschritten wird.



Definitionen und Begriffe

In der Luftfahrtliteratur werden gelegentlich die beiden Begriffe „Masse“ (Mass) und „Gewicht“ (Weight) synonym verwendet. Es ist jedoch seit einigen Jahren recht konsequent dazu übergegangen worden, als korrekte Bezeichnung „Masse“ zu verwenden. Allerdings wird nach wie vor auch der Begriff „Gewicht“ verwendet, insbesondere in älterer Literatur.

Die **Masse** wird als eine Grundgröße in der Physik in der SI-Einheit Kilogramm [kg] angegeben. Die Bestimmung einer Masse wird üblicherweise mittels einer Vergleichsmessung (z.B. durch eine Balkenwaage) mit Hilfe einer Referenzmasse durchgeführt. Definiert wird das Kilogramm auf Basis der Planckschen Konstante und den Definitionen von Meter und Sekunde.

Im Gegensatz dazu ist das **Gewicht**, bzw. eigentlich die **Gewichtskraft** abhängig von der Ortsgravitation. Es handelt sich beim Gewicht um eine Kraft, welche in der Einheit Newton [N] gemessen wird. Sie berechnet sich aus der oben genannten Masse eines Körpers und der Gravitationsbeschleunigung, welche auf der Erde im Mittel $9,81 \text{ m/s}^2$ beträgt.

Das Gewicht eines Körpers unterscheidet sich demnach bei großen Höhenunterschieden oder auf unterschiedlichen Planeten. Ein Newton entspricht dabei der Kraft, welche die Masse von 1 kg durch die mittlere Erdbeschleunigung am Boden erfährt (1kg à ca. 10N (9,81N)).

Massebezeichnungen

Bei einem unbemannten Luftfahrzeug können im Wesentlichen die folgenden **Massen unterschieden** werden:

- Leermasse (Empty Mass)
- Nutzlast (Payload)
- Startmasse (Take-Off Mass)

Die Leermasse bezeichnet die bei der vom Hersteller initiierten Wägung ermittelte Masse. Sie umfasst nicht nur das UAS-Gerüst selbst, sondern auch Einbauten. Dazu gehören:

- Zelle
- Motoren
- Standard- und Sonderausrüstung
- Sensoren und Bordanlagen
- Nicht wechselbare Öle und Schmierstoffe
- Weitere Systemflüssigkeiten

Die Nutzlast setzt sich aus allem zusammen, was zusätzlich an Bord geladen oder am UAS befestigt wird und nicht bei der Leermasse eingeschlossen ist. Dies sind zum Beispiel:

- Ausfliegbare Kraftstoff (bei Verbrennungsmotoren)
- Wechselbare Flüssigkeiten
- Besatzung und Passagiere (zukünftig)
- Gepäck und Fracht
- Kameras
- Sonstige nicht fest eingebaute Gegenstände

Die **Startmasse** setzt sich schließlich aus dem Leergewicht und der Zuladung zusammen. Extrem wichtig ist, dass die vom Hersteller vorgegebene **maximale Startmasse (Maximum Take-Off Mass – MTOM)** in keinen Fall überschritten wird. Sollten Sie sich nicht sicher sein, müssen Sie vor dem Flug eine Wägung durchführen und gegebenenfalls Nutzlast entfernen.

SCHWERPUNKTLAGE

Wenn die einzelnen Massen bekannt sind, muss die Verteilung der Nutzlast organisiert werden. Durch die Zuladung wirken Kräfte an unterschiedlichen Positionen des unbemannten Luftfahrzeuges, was insbesondere bei falscher Positionierung zu starken Drehmomenten führen kann.

Ein UAS, das sich nicht im zulässigen Schwerpunktbereich befindet oder sogar überladen ist, lässt sich nicht mehr stabil steuern und droht im schlimmsten Fall sogar abzustürzen. Zwar muss bei unbemannten Luftfahrzeugen der OPEN-Kategorie in der Regel vor dem Flugantritt keine Masse- und Schwerpunktberechnung durchgeführt werden. Dennoch ist es essenziell, die Grundlagen der Schwerpunktverteilung zu kennen und die maximal erlaubten Massen nicht zu überschreiten.

Dabei hat insbesondere die Beladung einen entscheidenden Einfluss auf das Flugverhalten. Nicht nur die Masse ist hier entscheidend, sondern auch die Positionierung. Mit der Beladung verändern sich der Masseschwerpunkt und damit ebenfalls die Flugeigenschaften. Wird zu viel Masse im vorderen UAS-Bereich befestigt, neigt es sich (auch im Flug) nach vorne, wird zu viel nach hinten geladen, neigt es sich dementsprechend nach hinten. Diese unerwünschten Effekte können so hohe Kräfte verursachen, dass die Motoren ungleich verteilten Schwerpunkt im schlimmsten Fall nicht mehr ausgleichen können.

Definitionen und Begriffe

Das **Drehmoment** (torque) ist eine Kraft, die bei einem drehbaren Körper eine Beschleunigung oder Verzögerung über einen Hebel bewirkt. Bei der Größe des wirkenden Drehmoments spielt nicht nur die Kraft, sondern auch die Länge des Hebelarms eine Rolle. Die Einheit Newtonmeter [Nm] setzt sich eben aus diesen beiden Faktoren zusammen.

M: Drehmoment; F: Wirkende Kraft; r: Länge des Hebelarms

Im **Schwerpunkt** (center of gravity – CG oder CoG) können sich alle Massen eines Körpers vereint vorgestellt werden. Gleichzeitig heben sich im Schwerpunkt alle wirkenden Drehmomente gegenseitig auf, der Gegenstand kann an diesem Punkt also im Gleichgewicht gehalten werden.

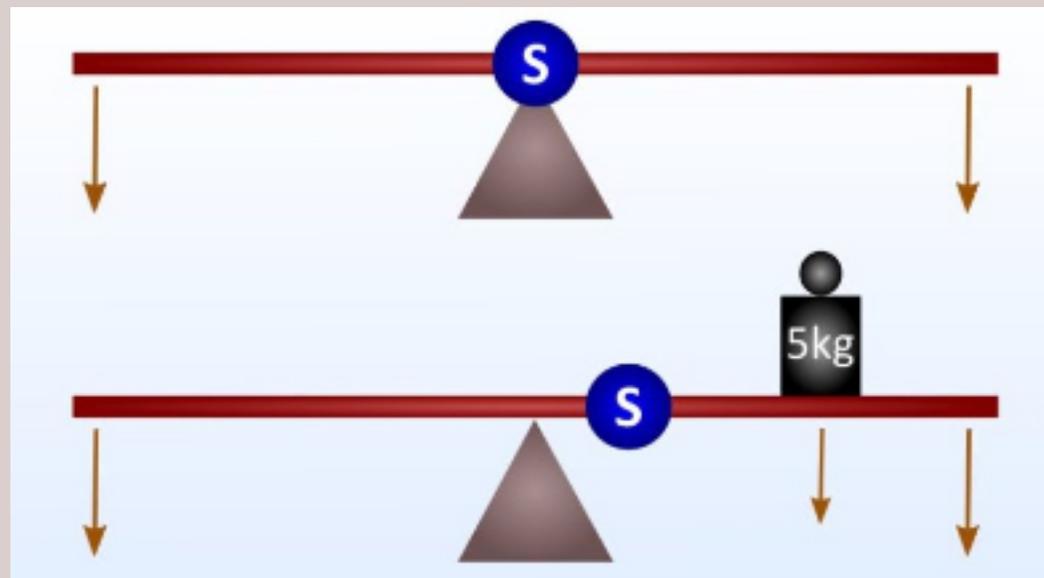


Schwerpunktverschiebung

Um beispielsweise einen **Stock** mit nur einem Finger zu balancieren, muss er genau im Schwerpunkt gehalten werden. Bereits direkt daneben wird in diesem Fall durch die Gravitationskraft an der einen Seite eine größere Kraft ausgeübt als an der anderen Seite und der Stock beginnt zu kippen.

Sobald sich die Massen eines Körpers außerhalb des Schwerpunktes verändern – wird also beispielsweise eine Münze auf eine Seite des Stockes gelegt – verändert sich auch die Lage des Schwerpunktes in Richtung der größer gewordenen Gewichtskraft.

Ebenso verhält es sich mit einer **Wippe**: Wirkt auf eine Seite der Wippe eine höhere Kraft (in diesem Fall durch die Erdgravitation), verschiebt sich der Schwerpunkt in diese Richtung und die Wippe würde kippen.



Schwerpunktverschiebung

Der Schwerpunkt eines unbemannten Luftfahrzeuges darf sich nur innerhalb vom Hersteller festgelegter Grenzen bewegen, damit durch die Ruder die Manövrierfähigkeit gewährleistet bleibt.

Wird das UAS so beladen, dass sich der Schwerpunkt **vor dem zulässigen Bereich** befindet, hat dies negative Auswirkungen auf die Flugleistungen. Während des Fluges erhöhen sich bei einem Tragflächen-UAS die Überziehgeschwindigkeit und die Steuerdrücke am Ruder in Richtung Boden. Zudem wird das Abheben mit dem korrekten Startwinkel erschwert, was zu einem Flugunfall führen kann.

Liegt der Schwerpunkt **hinter dem zulässigen Bereich**, neigt ein Tragflächen-UAS im Langsamflugbereich deutlich stärker zum Trudeln. Darüber hinaus ist das UAS in kritischen Situationen schwerer zu kontrollieren, auch weil die Längsstabilität abnimmt.

Bei einem Multirotor-UAS führt eine Beladung außerhalb des zulässigen Schwerpunktbereichs zu einer ungleichen Lastverteilung der Rotoren. Einige Rotoren müssen sich schneller drehen, um die höhere Gewichtskraft auszugleichen, was zu einer Überhitzung und im schlimmsten Fall auch einem Ausfall führen kann.

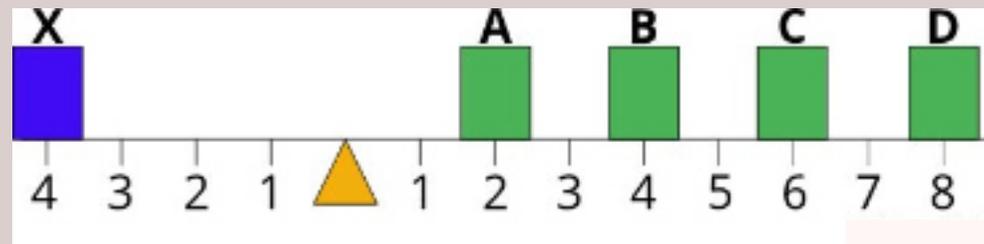
Nutzlastverteilung

Im Idealfall sollten Sie die Nutzlast genau im **Schwerpunkt** des unbemannten Luftfahrzeuges anbringen, sodass es zu keiner Schwerpunktverschiebung kommt.

Wenn dies nicht möglich ist, müssen Sie gegebenenfalls **Gegengewichte** anbringen, um die Schwerpunktverschiebung auszugleichen. Achten Sie in diesem Fall darauf, dass die Maximale Abflugmasse (MTOM) nicht überschritten wird. Bei der Positionierung der Gegengewichte müssen Sie die Wirkung des Hebelarms berücksichtigen, sodass die Schwerpunktverschiebung durch die Nutzlast optimal ausgeglichen werden kann.

Wenn Sie beispielsweise eine Masse X von 2 kg in einer Entfernung von 4 cm vom Schwerpunkt platzieren, können Sie dies durch das Anbringen folgender Massen an der entgegengesetzten Seite ausgleichen:

- Eine Masse A von 4 kg in einer Entfernung von 2 cm vom Schwerpunkt
- Eine Masse B von 2 kg in einer Entfernung von 4 cm vom Schwerpunkt
- Eine Masse C von 1,5 kg in einer Entfernung von 6 cm vom Schwerpunkt
- Eine Masse D von 1 kg in einer Entfernung von 8 cm vom Schwerpunkt



FLIGHT ENVELOPE (FLUGBEREICHSGRENZE)

Die so genannte Flugbereichsgrenze wird auch im Deutschen in der Regel als „Flight Envelope“ bezeichnet. Der Flight Envelope beschreibt die Grenzen des zulässigen und sicheren Betriebsbereichs in Bezug auf die Fluggeschwindigkeit und das Lastvielfache unter Berücksichtigung der Luftdichte und ggf. weiterer Faktoren. Für einen sicheren Flugbetrieb muss sich das UAS zu jedem Zeitpunkt des Fluges innerhalb des Flight Envelopes befinden.



Definitionen und Begriffe

Damit ein unbemanntes Luftfahrzeug zugelassen wird, muss es in zahlreichen Tests unter anderem nachweisen, dass es Belastungen in extremen Situationen standhalten kann. Dies können steil geflogenen Kurven oder das Abfangen aus dem Sinkflug sein.

Das **Lastvielfache „n“** (load factor) beschreibt dabei das Verhältnis von Auftriebs- und Gewichtskraft – also von zwei Kräften, die entgegengesetzt auf die Zelle wirken. Wird das Lastvielfache zu groß, können durch die am UAS wirkenden Kräfte Schäden an Luftfahrzeugteilen entstehen. Das Lastvielfache beschreibt also den Faktor, um welchen das scheinbare Gewicht des UAS bei einem Flugmanöver zunimmt. Dies betrifft insbesondere den Kurvenflug.

Angegeben wird das Lastvielfache in **[g]**, was dem Vielfachen der Erdbeschleunigung entspricht. Das Lastvielfache im unbeschleunigten Horizontalflug beträgt 1g. Wirken im Kurvenflug 2g, entspricht dies Kräften der doppelten Luftfahrzeugmasse.

Die **Geschwindigkeit „v“** (velocity / speed) eines Luftfahrzeuges ist nicht so eindeutig zu ermitteln wie die eines Autos. In der professionellen Luftfahrt werden viele verschiedene Geschwindigkeiten unterschieden. An dieser Stelle sind zumindest zwei Geschwindigkeiten wichtig zu unterscheiden:

Die angezeigte Eigengeschwindigkeit (**IAS – Indicated Airspeed**) wird durch die Sensoren am UAS gemessen und kann direkt angezeigt werden. Die IAS ist die Relativgeschwindigkeit zur umgebenden Luft. Sie hat große Bedeutung bei der Einschätzung von geschwindigkeitsabhängigen Flugeigenschaften und ist entscheidend in Bezug auf die Belastungen der Struktur. Die Herstellerangaben im Flughandbuch beziehen sich ebenfalls meist auf diese angezeigte Eigengeschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit über Grund (**GS – Ground Speed**) gibt schließlich die Geschwindigkeit relativ zur Erdoberfläche an, berücksichtigt also auch den Windeinfluss. Bei starkem Gegenwind kann die GS erheblich von der IAS abweichen, was vor allem Auswirkungen auf die Flugdauer haben kann. Dementsprechend ist die Ground Speed entscheidend für die Planung von Flügen.



Belastungen der Zelle

Die Zelle des unbemannten Luftfahrzeuges ist während des Fluges permanent Belastungen ausgesetzt, die in Abhängigkeit vom Flugmanöver eine unterschiedliche Stärke aufweisen. Die einzelnen Bauteile müssen dadurch Kräfte in unterschiedliche Richtungen aushalten können, bzw. an Bauteile weitergeben, die eine ausreichende Stabilität aufweisen.

Der Auftrieb bewirkt beispielsweise, dass sich die Tragfläche (bzw. das Rotorblatt) nach oben bewegt, wohingegen die Gewichtskraft im UAS-Schwerpunkt in die entgegengesetzte Richtung angreift. Hierdurch entstehen auf der einen Seite **Zug-** und auf der anderen Seite **Druckkräfte**, welche durch die Bauteile abgefangen und ausgehalten werden müssen. Nicht unbedingt erforderliche Belastungsspitzen müssen in jedem Fall vermieden und vorgeschriebene Geschwindigkeiten dürfen nicht überschritten werden.

Auch eine durch den **Wind** verursachte zu hohe Geschwindigkeit kann zu starken Belastungen und Schäden an der Zelle führen. Dies kann beispielsweise bei sehr starkem Rückenwind oder Böen mit Richtungsänderungen des Windes passieren. Hier ist insbesondere das Durchfliegen von Auf- und Abwindfeldern sowie Querwinden zu vermeiden.

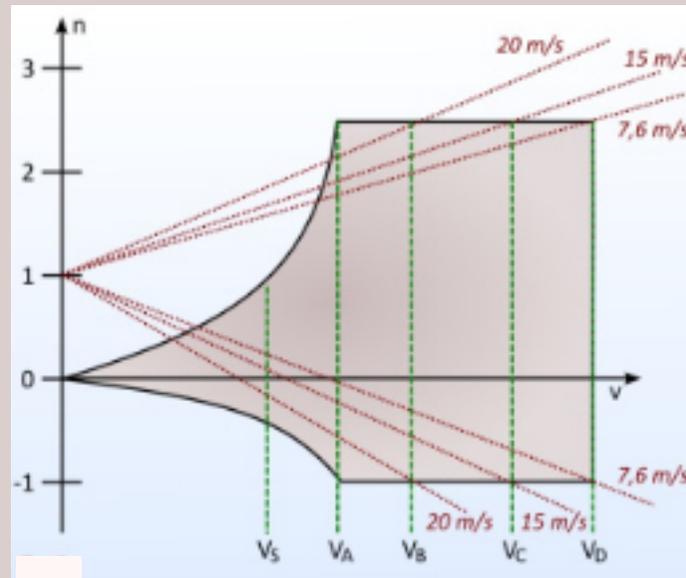
Bei zu erwartenden **Turbulenzen** muss die Geschwindigkeit entsprechend reduziert werden. Gegebenenfalls gibt das Handbuch weitere Hinweise zu erlaubten Geschwindigkeiten und Verfahren.

Grundsätzlich kann zwischen statischen und dynamischen Belastungen unterschieden werden. Bei **statischen Belastungen** wirken punktuell extreme Kräfte, wohingegen die Krafteinwirkung bei einer **dynamischen Belastung** eher moderat ist, sich aber über eine längere Zeitspanne in Richtung und Stärke ändert. Dies ist zum Beispiel bei Ruderbewegungen oder Böen der Fall. Unterschätzen Sie also nicht die Langzeitfolgen solcher Belastungen, die meist nicht unmittelbar zu erkennen sind.

Das v-n-Diagramm

Um die Belastungsgrenzen bei allen Geschwindigkeiten eines Luftfahrzeuges darzustellen, werden im so genannten v-n-Diagramm das Lastvielfache (n) und die Fluggeschwindigkeit (v) gegeneinander abgetragen. Das maximal zulässige Lastvielfache darf dabei zu keiner Zeit während des Fluges überschritten werden, das unbemannte Luftfahrzeug muss sich also jederzeit innerhalb des Diagramms befinden.

Einer zusätzlichen besonderen Beanspruchung während des Fluges sind Luftfahrzeuge durch Böen ausgesetzt, die plötzlich und heftig auftreten können. Dabei erfährt das Flugzeug zusätzlichen Auf- oder Abtrieb, so dass die Grenzwerte des v-n-Diagramms unerwartet überschritten werden können. Deswegen wird in dem v-n-Diagramm zusätzlich ein **Böenlastvielfaches** berücksichtigt, das diese Situationen einschließt.



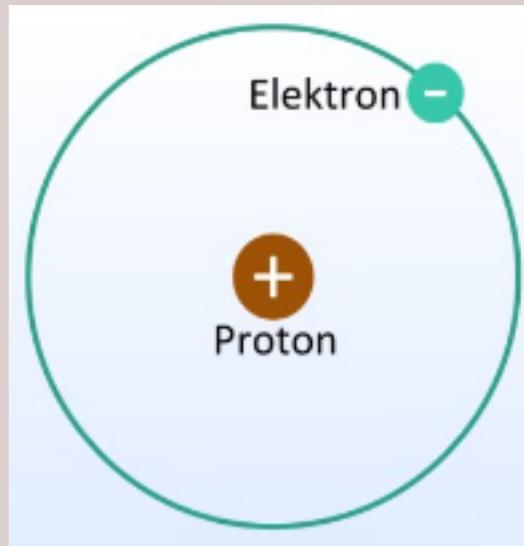
BATTERIEN

Die Energie, um sowohl die unbemannten Luftfahrzeuge als auch die Bodenstation und eventuelle Zusatzgeräte zu betreiben, wird in der Regel von Batterien bereitgestellt. Diese haben in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung durchlaufen, sodass am Markt bereits „intelligente“ Batterien angeboten werden.

Ein gutes Basiswissen über Batterien ist sowohl für die Lebensdauer einer Batterie als auch für die Sicherheit essenziell. Im Folgenden werden dementsprechend die wichtigsten Aspekte in Bezug auf die Funktionsweise und die Behandlung von Batterien angesprochen.

Definitionen und Begriffe

Jedes Element besteht aus **Atomen**, kleinsten und chemisch nicht weiter teilbaren Bausteinen. Nach einem Atommodell von Nils Bohr besteht der Atomkern aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Dieser also insgesamt positiv geladene Atomkern wird von negativ geladenen Elektronen auf einer oder mehreren Bahnen umkreist.



Das Wasserstoffatom (H) ist beispielsweise sehr einfach aufgebaut und besteht nach dem Bohrschen Atommodell aus einem positiv geladenen Proton im Kern und einem darum kreisenden Elektron.

Definitionen und Begriffe

Ein Atom gilt als elektrisch neutral, wenn die Anzahl der Protonen und Elektronen gleich ist. Herrscht hingegen ein Ungleichgewicht zwischen Protonen und Elektronen, wird das Atom als Ion bezeichnet. Überwiegen die Protonen, ist das Ion positiv geladen, überwiegen hingegen die Elektronen, ist es negativ geladen.

Wird das Gleichgewicht zwischen Elektronen und Protonen in einem Material verändert (beispielsweise durch Reibung von außen), sind die Ladungen bestrebt, diesen Ausgleich wieder herzustellen. Dabei gilt, dass sich gleiche Ladungen abstoßen und gegenteilige Ladungen anziehen. Ein solcher Ladungsunterschied erzeugt eine mit einem elektrischen Feld verbundene **Spannung (U)**. Diese veranlasst freie Elektronen zu einer Bewegung entlang der elektrischen Feldlinien in Richtung des Elektronenmangels. Die Spannung wird in Volt [V] angegeben.

Die **Minimalspannung** (minimum voltage) ist dabei die Spannung, welche in keiner Zelle unterschritten werden sollte. Sollte dies passieren, nimmt die Batterie Schaden und kann nicht mehr verwendet werden. Die **Nominalspannung** (nominal voltage) ist die verfügbare Spannung, wenn die Batterie unter Last arbeitet.

Durch Elektronenbewegung entsteht ein elektrischer **Strom**, welcher als strömende Bewegung von Ladungen angesehen werden kann. Die **Stromstärke (I)** bezeichnet dabei die Anzahl von Ladungsträgern, die sich in einer bestimmten Zeit durch einen Querschnitt bewegen. Becken in das untere (es entsteht ein Wasserstrom). Die herabfließende Wassermenge innerhalb einer bestimmten Zeitspanne entspricht dabei der Stromstärke, der herrschende Wasserdruck der Spannung.



Definitionen und Begriffe

Die **tatsächliche Fließrichtung** (also die Bewegungsrichtung der Elektronen) ist vom Ort mit zu vielen Elektronen (Minuspole) zum Ort mit einem Mangel an Elektronen (Pluspol). Die gebräuchliche **technische (oder konventionelle) Stromrichtung** wurde allerdings willkürlich in entgegen gesetzter Richtung festgelegt, also vom Pluspol zum Minuspole. Maßeinheit für den Strom ist das Ampere [A].

Eine elektrische Spannung versetzt Elektronen durch das mit ihr verbundene **elektrische Feld** potentiell in die Lage, entlang der elektrischen Feldlinien zu fließen. Über das elektrische Feld wirkt auf die Elektronen eine Kraft in Richtung des Elektronenmangels. Je größer die Spannung, umso stärker ist auch das elektrische Feld und damit die Kraft auf die Elektronen. Ein Strom fließt aber erst, wenn eine elektrische Verbindung zwischen den Spannungspolen hergestellt ist und der Stromkreis somit geschlossen wird.

Die **Ladungstrennung** kann auf unterschiedliche Weisen herbeigeführt werden. In UAS und dem Zubehör wird in der Regel auf Batterien, bzw. Akkumulatoren, also eine chemische Ladungstrennung zurückgegriffen.

Zur Veranschaulichung dieses Vorgangs kann ein abstrakter **Vergleich mit Wasser** dienen: Um eine Potentialdifferenz zwischen zwei miteinander verbundenen Wasserbecken herzustellen, wird eines der beiden Becken erhöht (beispielsweise auf einem Berg) aufgestellt. Aufgrund der Gewichtskraft fließt das Wasser nun vom oberen



Definitionen und Begriffe

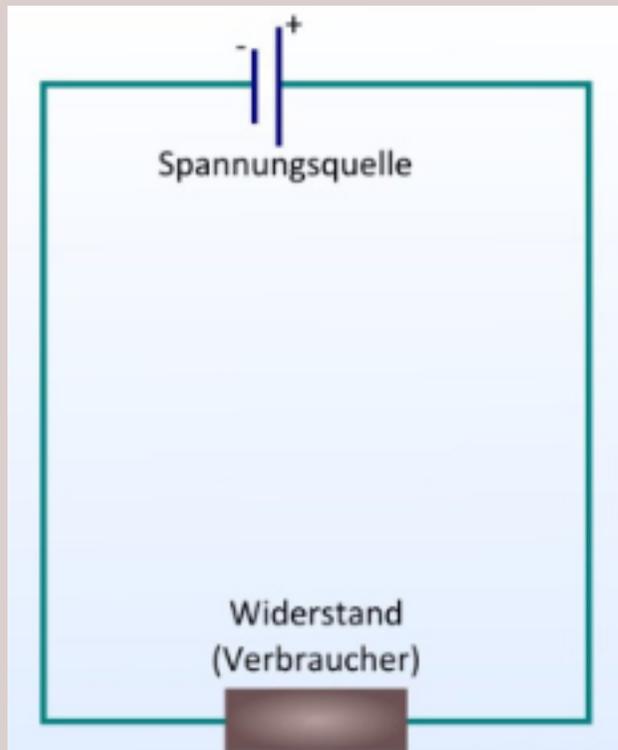


Stoffe, die elektrische Energie in Form von fließenden Elektronen weiterleiten können, werden als **elektrische Leiter** bezeichnet. Die sich in einem solchen elektrischen Leiter bewegend Elektronen werden währenddessen permanent durch Zusammenstöße mit anderen Atomen gehemmt, sie stoßen also auf Widerstand innerhalb dieses Leiters.

Die Größe des **elektrischen Widerstandes (R)** wird in Ohm [Ω] angegeben und ist abhängig von den spezifischen Materialeigenschaften, der Temperatur, dem Querschnitt und der Länge des Leiters.

Damit ein Strom fließen kann, muss ein **geschlossener Stromkreis** gegeben sein. Dieser besteht aus wenigstens einer Spannungsquelle und einem Verbraucher (Widerstand), die durch einen elektrischen Leiter miteinander verbunden sind. Die Stromrichtung wird dabei durch die Polung der Spannungsquelle bestimmt.

Definitionen und Begriffe



Die Zusammenhänge zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand sind im **Ohmschen Gesetz** beschrieben:

Die Stärke des durch ein Objekt fließenden elektrischen Stroms ist proportional der elektrischen Spannung.

Wird die Quellspannung erhöht, steigt demnach die Stromstärke, wird hingegen der Widerstand erhöht, sinkt die Stromstärke.

Die **Kapazität** einer Batterie gibt die maximale Ladungsmenge an, die in ihr gespeichert (und in einer Stunde abgegeben werden) kann. Die Angabe der Kapazität erfolgt in Amperestunden [Ah]. Eine Batterie mit einer Kapazität von 20 Ah kann also 20 Ampere für eine Stunde oder 40 Ampere für 30 Minuten abgeben. Die Kapazität von UAS-Akkus wird in der Regel in Milli-Amperestunden [mAh] angegeben.

Die einfache Schlussfolgerung lautet: Je höher die Kapazität einer Batterie ist, umso länger ist auch die maximale Flugdauer eines UAS.

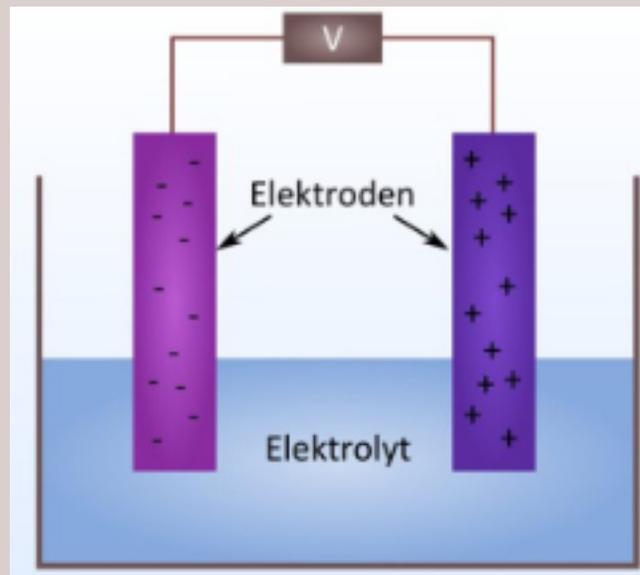
Die **Lade-/ Entladekapazität** – oder „C-Rate / C-Koeffizient“ – beschreibt den möglichen Lade-/ Entladestrom einer Batterie bezogen auf die Kapazität. Eine Rate von 1C meint dabei, dass die Batterie in einer Stunde vollständig ge- oder entladen ist. Eine Rate von 2C bedeutet, dass die Batterie „doppelt so schnell“ – also in einer halben Stunde – ge- oder entladen ist.

Eine Entladekapazität von 2C gibt bei einem Akku mit einer Kapazität von 4.000 mAh beispielsweise an, dass für eine halbe Stunde eine Stromstärke von 8.000 mA (2 x 4000 mAh) abgegeben wird.

Funktionsweise

Die Batterie ist ein Energiespeicher, in welchem chemische Vorgänge zu einer Ladungstrennung führen und somit eine Spannung verursachen. Chemische Energie wird in dabei elektrische Energie umgewandelt. Batterien werden auch als Galvanische Elemente bezeichnet.

Um eine Ladungstrennung zu bewirken, sind zwei Elektronenleiter (**Elektroden**) aus unterschiedlichen Materialien und ein elektrisch leitendes Medium (**Elektrolyt**) notwendig. Zwischen dem Medium und jeder Elektrode findet nun eine chemische Reaktion statt, die eine Ladungstrennung bewirkt und das Elektrolyt in eine andere Substanz verwandelt. So entsteht eine elektrische Gleichspannung. Die Batterie ist leer, wenn das Elektrolyt vollständig umgewandelt ist.



Eine Batterie besteht in der Regel aus **mehreren Zellen**, wobei in jeder Zelle der beschriebene Prozess abläuft.

Mehrere Zellen – oder sogar ganze Batterien – können entweder durch eine Serien- oder Parallelschaltung miteinander verbunden werden. Bei einer **Parallelschaltung** steigt die Kapazität, die Spannung bleibt jedoch gleich. Bei einer **Reihenschaltung** erhöht sich die Spannung, was in der Regel ein Vorteil und gewünscht ist.

Arten von Batterien

Auf dem Markt gibt es ganz verschiedene Arten von Batterien, die sich beispielsweise in Material, Größe und Kapazität unterscheiden. Ferner wird zwischen **Primär- und Sekundärelementen** unterschieden.

Primärelemente werden in **Trockenbatterien** verwendet und lassen nur einen einmaligen chemischen Prozess in eine Richtung zu. Die chemische Energie wird dabei einmalig in elektrische Energie umgewandelt, die Elektrode wird während des Entladens zerstört.

Sekundärelemente hingegen finden Verwendung in **Akkumulatoren** und können wieder aufgeladen werden, der chemische Prozess ist also umkehrbar. Wie oft dies geschehen kann, ist von dem Material der Batterie abhängig. Sekundärelemente finden in der Regel Verwendung in UAS und deren Zubehör.

In den meisten UAS werden inzwischen aufgrund ihrer sehr guten Leistung bei gleichzeitig geringem Gewicht **Lithium Polymer- (Li-Po-) Akkus** verbaut. Einzig bei UAS, die eine höhere Flugzeit erreichen müssen, werden auch Lithium Ionen- (Li-Ion-) Akkus eingesetzt. Dies ist oft bei Tragflächen-UAS der Fall. Li-Ion-Akkus haben also eine höhere Lebensdauer als Li-Po-Akkus, jedoch ein etwas höheres Gewicht.

Auf einem Akku finden sich wie im Beispielbild erkennbar diverse Informationen, von denen die folgenden besonders wichtig sind:

- Die Nominalspannung (V)
- Die Kapazität (mAh)
- Die Entladekapazität (C)



Eigenschaften von Batterien

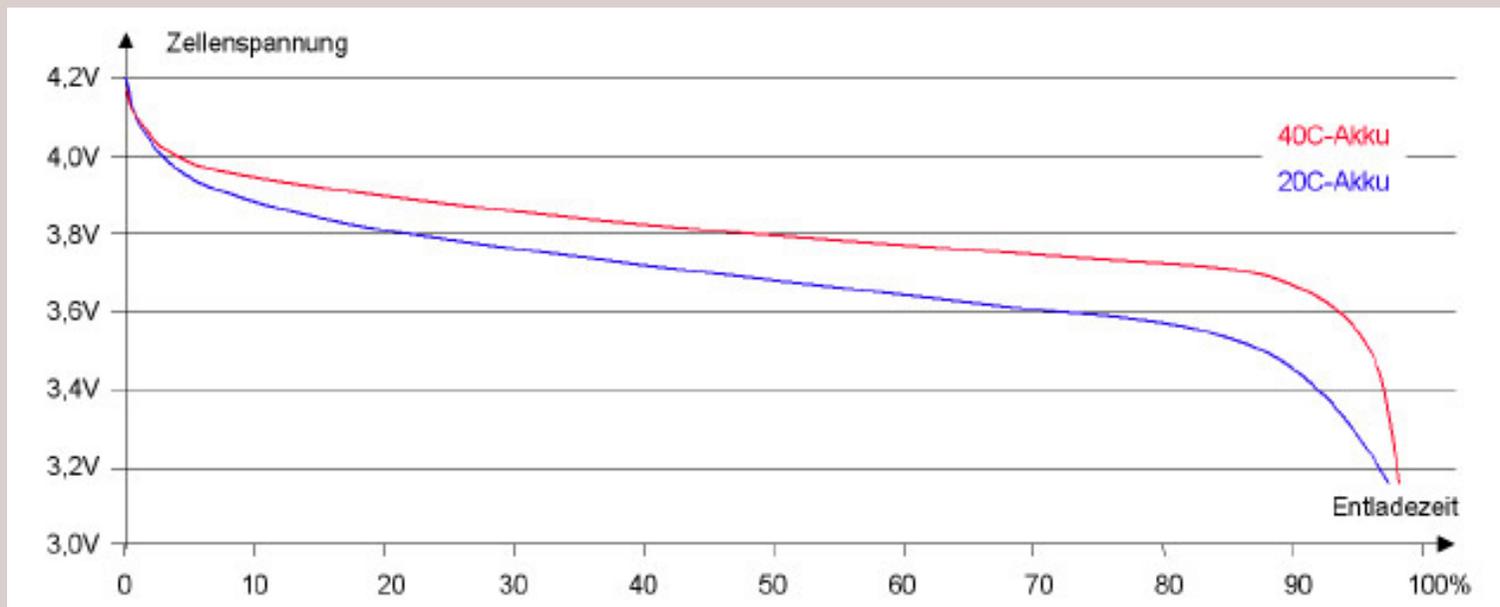
Grundsätzlich gilt, dass die mögliche **Flugzeit** eines UAS mit der Batteriekapazität steigt. Bei einer Akkukapazität von 10.000 mAh und einem Bedarf von 20.000 mAh ist die Batterie nach einer halben Stunde vollständig entladen. Selbstverständlich darf ein Akku aus verschiedenen Gründen niemals vollständig leergeflogen werden – der wichtigste Grund sind Flugsicherheitsaspekte. Es handelt sich bei einer solchen Berechnung also um die theoretisch mögliche und nicht um die praktische Flugzeit.

- Die **Leistungsfähigkeit** wird von den folgenden Faktoren beeinflusst:
- Die **Anzahl der Lade-/ Entladezyklen**: Je älter und beanspruchter ein Akku ist, umso geringer ist seine Leistung.
- Die **Umgebungstemperatur**: Kalte Temperaturen haben einen negativen Einfluss auf die chemischen Prozesse und verringern die Leistungsfähigkeit. Spezielle Batteriewärmer können die Batterien vor dem Start auf eine gute Temperatur bringen.

Falsches Ladeverhalten: Wenn die Batterien voll aufgeladen über mehrere Tage nicht benutzt werden, sinkt die Leistungsfähigkeit. Dieser Schaden ist dauerhaft und kann nicht rückgängig gemacht werden.

Eigenschaften von Batterien

Sehr wichtig ist die Kenntnis der **Entladekurve** von Li-Po- oder Li-Ion-Akkus. Nach dem Abheben des UAS wird der Ladestand zunächst schnell abnehmen, anschließend jedoch nur sehr langsam abnehmen. Dies darf nicht so interpretiert werden, dass die Batterie länger als erwartet halten wird. Denn gegen Ende der Entladekurve kommt es zu einem plötzlichen Starke Abfall der Spannung. Darüber müssen Sie sich als Fernpilot in jedem Fall bewusst sein.



Beispielentladekurve eines Li-Po-Akkus

Eigenschaften von Batterien

Darüber hinaus hat die **Außentemperatur** einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die verfügbare Spannung. Sowohl die grundsätzliche Leistungsfähigkeit als auch die Flugzeit nehmen bei kalten Temperaturen ab.

In jedem Fall ist es ratsam, nur mit vollständig geladenen Akkus zu starten. Im Fall von nicht-intelligenten Batterien kann mit Hilfe eines **Spannungsprüfers** die Spannung in den Batteriezellen geprüft werden. So kann frühzeitig bemerkt werden, wenn eine Batterie defekt ist oder nicht mehr über die erforderliche Leistungsfähigkeit verfügt.

Beachtet werden muss auch, dass die **Ladestanddifferenz** zwischen den einzelnen Batteriezellen eines Li-Po-Akkus 0,2 V nicht überschreitet. Sollte dies der Fall sein, muss die Batterie zunächst entladen und anschließend wieder geladen werden. Wenn das Problem auch damit nicht gelöst werden kann, sollte die Batterie entsorgt werden.

Immer mehr UAS werden direkt mit so genannten „**intelligenten Batterien**“ ausgestattet. Diese Akkus sind mit einem Batteriemanagementsystem ausgestattet, das folgende Funktionen enthalten kann:

- Anzeige des Ladestandes (i.d.R. über LEDs)
- Überspannungs- und Entladeschutz
- Automatische Entladefunktion, wenn die geladene Batterie über einen längeren Zeitraum nicht genutzt wird
- Eingebauter Ausgleichsregler
- Speicher der Lade-/ Entladezyklen

Beachten Sie, dass eine „intelligente“ Batterie nicht mit einem Standard-Ladegerät aufgeladen werden darf. Beachten Sie die Herstellerhinweise und verwenden Sie ausschließlich dafür geeignete Ladegeräte.



Laden und Entladen

Es ist wichtig, dass alle Batteriezellen während des Ladevorgangs die **gleiche Spannung** aufweisen (mit einer geringen Toleranz von 0,2V). Bei einem zu großen Spannungsunterschied kann es zu internen Entladevorgängen kommen (von einer Zelle zur anderen), was zur Zerstörung des Akkus und einem Batteriebrand führen kann.

Um dies zu verhindern, sollten entsprechende **Ladegeräte** mit Ausgleichsregler verwendet werden (sofern die Batterie diesen nicht bereits eingebaut hat). Diese sorgen dafür, dass der Spannungsunterschied zwischen den Batteriezellen sehr gering gehalten wird (i.d.R. bei ca. 0,01 V). Beachten Sie hier die Herstellerangaben. Nur so kann zudem gewährleistet werden, dass sich die Batterie gleichmäßig entlädt und keine Schäden verursacht.

Li-Po-Batterien, die vollständig aufgeladen mehrere Tage nicht benutzt werden, verlieren dauerhaft an Leistungsfähigkeit. Es ist daher dringend empfohlen, **Batterien zu entladen**, wenn diese über einen längeren Zeitraum nicht genutzt werden. Handelsübliche Ladegeräte verfügen i.d.R. auch über eine Entladefunktion. Beachten Sie dabei unbedingt die Herstellerhinweise.

Sicherheitsaspekte

Das Lithium in einer Li-Po-Batterie ist ein sehr **reaktionsfreudiges Metall** und als solches mit großer Vorsicht zu behandeln. Bei unsachgemäßer Behandlung kann es zu einem Brand oder sogar einer Explosion kommen. Ein solcher Brand darf nicht unterschätzt werden und kann nicht einfach mit Wasser gelöscht werden.



Folgende **Sicherheitsvorkehrungen** sollten beim Umgang mit Li-Po- und Li-Ion-Akkus getroffen und beachtet werden:

- Verwenden Sie ausschließlich Ladegeräte, die für Li-Po-, bzw. Li-Ion-Akkus geeignet sind.
- Laden Sie Batterien nie unbeaufsichtigt und halten Sie einen geeigneten Feuerlöscher bereit oder laden Sie in einem feuersicherem Koffer.
- Transportieren Sie die Batterien in einer „LiPo Safe Bag“.
- Prüfen Sie die Spannung jeder Batteriezelle vor jedem Flug, sofern Sie keine intelligenten Batterien verwenden.
- Prüfen Sie die Batterien sehr genau nach einem Absturz oder Beschädigungen und verwenden Sie diese nur weiter, wenn keine Zweifel an der Funktionsfähigkeit bestehen.
- Stechen Sie niemals in eine Li-Po-Batterie.
- Starten Sie nur mit einer vollständig aufgeladenen Batterie.
- Wenn Sie mehrere Akkus für Ihr UAS nutzen, setzen Sie diese im Wechsel ein.
- Entladen und laden Sie Ihre Li-Po-Batterien vollständig nach etwa 20 Zyklen.
- LiPo-Batterien sind Sondermüll und können nicht über den Hausmüll entsorgt werden. Informieren Sie sich über die Entsorgungsmöglichkeiten in Ihrer Region.

Risikominderung

Das mit dem UAS-Flug verbundene Risiko für Personen und Dinge sowohl in der Luft als auch am Boden ist die Grundlage für viele Vorschriften und operative Verfahren. Auch die Kategorien für Fernpilot*innen basieren auf einer solchen Abwägung.

Im praktischen Betrieb steht zudem die Minimierung des Risikos bereits bei der Flugvorbereitung und in allen weiteren Phasen des Fluges im Vordergrund. Zu jedem Zeitpunkt müssen Sie sich über das aktuelle Risiko bewusst sein und gleichzeitig Maßnahmen ergreifen, um es so niedrig wie möglich zu halten – für unbeteiligte und beteiligte Personen, für Sachen und letztlich auch für Sie selbst.

Bei der Minderung von Risiken kann zwischen zwei Bereichen unterschieden werden, auf die im Folgenden eingegangen werden soll:

- Technische Risikominderung
- Flugbetriebliche Risikominderung

TECHNISCHE RISIKOMINDERUNG

Im Bereich der Technik gibt es bereits Hilfestellungen zur Risikominderung, die unbedingt genutzt werden sollten. Es ist davon auszugehen, dass diese Möglichkeiten in Zukunft weiter zunehmen werden. Dabei dürfen Sie allerdings nie aus den Augen verlieren, dass Sie letztlich für den Flug verantwortlich sind – lassen Sie sich also von der Technik unterstützen, verlassen Sie sich aber niemals vollständig darauf.



Eisansatz und Auswirkungen

Die Unterkategorie A2 ermöglicht es Ihnen, sich **Personen bis auf maximal 5 Meter anzunähern**, sofern bestimmte Bedingungen gegeben sind:

- Das UAS muss mit einem Langsamflugmodus (low speed mode) ausgestattet sein (C2-zertifiziert).
- Der Langsamflugmodus muss aktiviert sein.
- Die Wetterbedingungen müssen für das Manöver ausreichend sein.
- Die Leistungsfähigkeit des UAS muss ausreichend sein.
- Es muss eine Abtrennung des überflogenen Gebietes erfolgen.

Der Langsamflugmodus beschränkt die **maximale Geschwindigkeit des UAS auf 3 m/s**, wodurch die Reaktionszeit bis zum Eintritt eines Ereignisses erhöht wird. Sie als Fernpilot*in haben also mehr Zeit, um auf eine unvorhergesehene und potenziell gefährliche Situation zu reagieren.

Stellen Sie in jedem Fall sicher, dass Sie den Sicherheitsabstand von 30 Metern zu unbeteiligten Personen strikt einhalten, wenn der Langsamflugmodus nicht aktiviert ist. Wenn Sie sich Personen auf weniger als 30 Meter im Langsamflugmodus angenähert haben und möchten wieder in den **normalen Modus übergehen**, müssen Sie zuvor erneut mindestens 30 Meter Sicherheitsabstand erreichen.

Verlieren Sie in jedem Fall nicht die **spezifische Situation** aus den Augen. Unabhängig vom Langsamflugmodus müssen Sie eine höhere Sicherheitsentfernung zu Personen einnehmen, wenn die Umstände dies erfordern – also beispielsweise bei starken Windböen oder niedrigem Batteriestand. Behalten Sie immer im Hinterkopf: Nur weil etwas formal nicht verboten oder sogar explizit erlaubt ist, ist es noch lange nicht in jedem Fall bedenkenlos und folgenlos anzuwenden.

Weitere Möglichkeiten

Neben dem Langsamflugmodus gibt es bereits heute weitere Möglichkeiten der technischen Risikominderung, die jedoch meist nicht verpflichtend oder flächendeckend umgesetzt sind. Dennoch soll hier ein kleiner Ausblick gegeben werden.

Es gibt bereits einige Anbieter für **UAS-Fallschirmsysteme**. Diese werden automatisch ausgelöst, sobald bestimmte Parameter überschritten sind – beispielsweise eine ungewöhnlich hohe Sinkgeschwindigkeit oder ein extremer Neigungswinkel. Derzeit begrenzen die meisten Fallschirmsysteme die Sinkgeschwindigkeit auf ungefähr 4 m/s. So kann im Falle eines Absturzes zwar nicht immer jeglicher Schaden, aber zumindest in den allermeisten Fällen ein Todesfall oder schwere Verletzungen vermieden werden.

Auch Systeme wie ein **Geo-Fence** tragen zu technischer Risikominderung bei. Dabei handelt es sich um einen „virtuellen Zaun“, der ein bestimmtes Gebiet anhand vorgegebener Koordinaten begrenzt. Sobald das UAS an diese Grenze kommt, führt es ein vordefiniertes Manöver durch, beispielsweise hält es in der Luft an und schwebt auf der Stelle.

Mit Hilfe eines solchen Zaunes können zum einen Gebiete definiert werden, aus welchen das UAS nicht herausfliegen kann. So wird beispielsweise vermieden, dass das unbemannte Luftfahrzeug bei einem Kontrollverlust in verbotene oder potenziell risikobehaftete Gebiete fliegt.

Auf der anderen Seite können auch Gebiete definiert werden, in welche unbemannte Luftfahrzeuge nicht hineinfliegen dürfen. Dies können dicht besiedelte Innenstädte oder Industrieanlagen sein.

BETRIEBLICHE RISIKOMINDERUNG

Eine der größten und folgenschwersten Gefahren jedes UAS-Fluges ist der Absturz des unbemannten Luftfahrzeuges auf Personen. Machen Sie sich vor jedem Flug bewusst, dass dieses Risiko besteht und Sie es mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln möglichst gering halten müssen.

Eine im Jahr 2018 veröffentlichte Statistik der DCRO (Dutch Association of Certified RPAS Operators) hat gezeigt, dass es bei einem von 1.000 UAS-Flügen zu einem Absturz kommt. Wichtig zu wissen ist dabei, dass es sich um Flüge handelte, die von zertifizierten Fernpilot*innen durchgeführt wurden. Es ist dementsprechend davon auszugehen, dass die **gute Ausbildung der Fernpilot*innen** wesentlich zu der niedrigen Absturzrate beigetragen hat.

In Bezug auf Personen ist die Grundregel zur Minderung des Risikos schlicht, dass **keine Personen überflogen werden** sollten. Gehen Sie immer davon aus, dass es jederzeit zu unvorhergesehenen Situationen kommen kann und Ihre Handlungsoptionen zur Vermeidung eines Schadens oberhalb von Menschen deutlich geringer sind.

Dabei geht es grundsätzlich nicht nur um menschliche Fehleinschätzungen oder Bedienungsfehler. Auch das **technische Risiko von Fehlfunktionen** ist dabei zu berücksichtigen. Selbst wenn die eingebaute Technik vielen Tests unterworfen, geprüft und zertifiziert wurde, sind Fehlfunktionen nicht gänzlich auszuschließen. Die folgenden Maßnahmen können Sie ergreifen, um auch das technische Risiko zu mindern:

- Führen Sie regelmäßige und sorgfältige Kontrollen durch; beauftragen Sie hierfür ggf. Fachpersonal.
- Befolgen Sie die Herstelleranweisungen und Bedienungshinweise aus dem Betriebshandbuch.
- Halten Sie jede genutzte Software auf dem aktuellen Stand.
- Bringen Sie sich selbst auf einen technischen Kenntnisstand, der es Ihnen ermöglicht, Zusammenhänge zu verstehen und frühzeitig mögliche technische Probleme zu erkennen.

Entfernung zu Personen

Wie weit das UAS von Ihnen als Fernpilot*in entfernt ist, kann ziemlich präzise und schnell mit Hilfe der Technik ermittelt werden. Ein Blick auf die Fernbedienung ist dafür oft ausreichend.

Ganz anders sieht es bei der Einschätzung der Entfernung zu anderen Personen aus. Diese verfügen in der Regel nicht über technische Geräte, welche die Entfernung zum UAS automatisch messen. Somit ist es an Ihnen, die Entfernung zwischen dem UAS (welches ja auch bereits in einer gewissen Entfernung von Ihnen fliegt) und Personen am Boden zu ermitteln. Diese **Einschätzung ist essenziell**, um konform mit den Vorschriften zu fliegen und das Bodenrisiko zu mindern.

Die Beurteilung der Entfernung zwischen Ihnen oder dem UAS und Personen ist komplex und basiert zu einem großen Teil auf **Erfahrung und guter Beobachtung**. Ein gutes Hilfsmittel ist dabei der Bezug auf bekannte Gegenstände, die Sie als Referenz nutzen können, beispielsweise ein Auto oder ein Gebäude. Wenn Sie wissen, dass ein Auto, welches zwischen den Personen und dem UAS geparkt ist, 4,50 Meter lang ist, können Sie abschätzen, wie oft dieses Auto zwischen das UAS und die Personen passt und daraus die Distanz ermitteln.

Dabei sind mehrere Dinge zu bedenken. Nicht immer befindet sich ein Gegenstand, dessen Maße Sie kennen, zwischen UAS und Personen – die sich in der Regel auch noch bewegen. Vorteilhaft ist es, wenn Sie in einem **gut bekannten Gebiet** operieren und einige Maße in diesem Gebiet vorher evaluiert haben. Dies können beispielsweise Entfernungen zwischen Zäunen, Bächen, Wegen und Landschaftsmerkmalen sein. Je besser Sie Ihr Einsatzgebiet kennen und je mehr Erfahrung Sie darin haben, umso einfacher wird Ihnen die Einschätzung von Distanzen fallen. Hier gilt wie so oft: Übung macht den Meister. Nutzen Sie jede Gelegenheit, um Ihr Einsatzgebiet kennenzulernen und das Einschätzen von Entfernungen zu üben.

Verläuft beispielsweise ein **Wanderweg oder eine Bahntrasse** durch Ihr Einsatzgebiet, können Sie bereits während der Flugvorbereitung die Entfernung messen und einen **Sicherheitsabstand festlegen**. Sobald sich Personen oder ein Zug nähern, fliegen Sie Ihr UAS dann zu der vordefinierten Stelle (beispielsweise einem Baum in ausreichender Entfernung).

Entfernung zu Personen

Sollten Sie in einem unbekanntem Gebiet operieren und auch keine bekannten Referenzen vorhanden sein, können Sie sich auch die **Länge von etwas bekanntem vorstellen** (beispielsweise einem Fußballfeld oder Auto). Dies ist natürlich wesentlich schwieriger als der Bezug auf tatsächlich vorhandene Dinge. Eine umfassende Beschäftigung mit dem Einsatzgebiet ist auch aus diesem Grund essenziell.

Ein weiterer wesentlicher Faktor bei der Einschätzung der Distanz zwischen zwei Objekten / Personen (z.B. UAS und Personen) ist die **örtliche Relation zu Ihnen**. Es ist ein Unterschied in Bezug auf die Einschätzung der Distanz, ob sich beide Objekte horizontal oder vertikal zu Ihrer Sichtrichtung befinden. Am einfachsten ist die Einschätzung, wenn sich UAS und Personen (oder Objekt) rechts und links direkt vor Ihnen befinden. Am schwierigsten ist die Einschätzung hingegen, wenn sich beides in Verlängerung Ihrer Sichtlinie bereits in einiger Entfernung von Ihnen befinden. Dabei kann es zu verschiedenen visuellen Einschätzungs- und Sichtfehlern kommen, die Sie berücksichtigen müssen.

Weitere Faktoren, welche sich auf die Einschätzung von Entfernungen auswirken können, sind:

- Die Tatsache, dass es sich in der Regel um eine Schrägentfernung handelt (z.B. zwischen einem UAS, das in einer bestimmten Flughöhe operiert und Personen, die am Boden sind).
- Die Sichtbedingungen wie Dunst oder grelle Sonneneinstrahlung.
- Niederschlag, insbesondere Schnee.

In der Praxis müssen Sie auch bedenken, dass sich in der Regel sowohl das UAS als auch die Personen bewegen. Sollte das unbemannte Luftfahrzeug mit Rückenwind auf Personen zufliegen, müssen Sie den **Rückenwind** auch bei der Einschätzung des (in diesem Fall verlängerten) Bremsweges berücksichtigen.

Seien Sie immer aufmerksam und rechnen Sie mit **Unvorhergesehenem**, um das operative Risiko zu mindern. Sollten Sie beispielsweise Filmaufnahmen durchführen und bemerken eine Gruppe Personen, die sich nähern, stoppen Sie die Aufnahme und fliegen Sie in eine sichere Distanz oder landen Sie vorübergehend. Auch kann es vorkommen, dass ein Kind unvermittelt aus einer Gruppe herausrennt und sich dem UAS schnell annähert. Auch in diesem Fall müssen Sie schnell reagieren und die Distanz wahren.

Sollten Sie **Zweifel** haben, ob Sie sich Personen angenähert haben, wenn das UAS in einer größeren Entfernung von Ihnen operiert, richten Sie die Kamera, wenn möglich, unter das UAS und prüfen Sie die Lage. Sollten Sie anschließend immer noch unsicher sein, lassen Sie das UAS zurückkehren und sicher landen.



Die 1:1-Regel

Neben den grundsätzlichen Vorschriften in Bezug auf den Mindestabstand (mindestens 30 m / 5 m unter bestimmten Bedingungen) hat sich die 1:1-Regel etabliert und ist fester Bestandteil einer Situationseinschätzung. Sie besagt, dass der laterale Abstand zwischen dem UAS und unbeteiligten Personen nicht geringer sein darf als die Flughöhe des UAS.

Sollte Ihr UAS also in einer Höhe von 100 Metern AGL fliegen, müssen Sie zu unbeteiligten Personen oder Objekten einen horizontalen Mindestabstand von ebenfalls 100 Metern einhalten. Dies ist unabhängig von einem eventuell eingeschalteten Langsamflugmodus.

Unberührt davon ist die Vorschrift, dass der Sicherheitsabstand niemals geringer als 30 m, bzw. 5 Meter unter bestimmten Bedingungen sein darf.

