

# Aerodynamik der Hubschrauber

## 1. Grundlagen

Bevor wir in die Aerodynamik der Helikopter einsteigen können, sollten wir einige grundlegende aerodynamischen Prinzipien kennen.

Damit die Flugzeuge, die "schwerer als Luft" sind vom Boden abheben können, muss eine Kraft nach oben wirken, die mindestens so gross ist, wie das Gewicht des Flugzeuges. Diese Kraft nennt man Auftrieb und wird durch die Tragflächen erzeugt.

Die Tragflächen oder Flügel haben im Querschnitt eine bestimmte Form, das Profil. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Profilarten, je nachdem welche Flugeigenschaften ein Flugzeug erreichen soll.

Bewegt sich nun eine Tragfläche vorwärts, teilt das Profil den Luftstrom in einen unteren und einen oberen Teil (Abb 1).

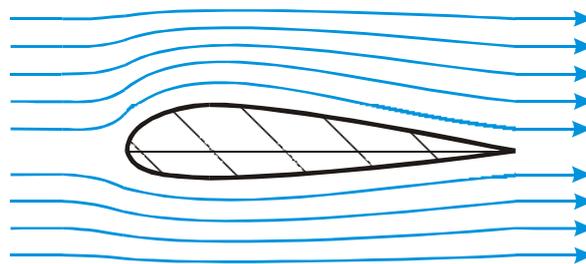


Abb 1

Da die Luft durch die Wölbung um das Profil verdrängt wird, muss sie einen "weiteren Weg" zurücklegen, wodurch sich die Strömungsgeschwindigkeit erhöht. Nach dem Gesetz der Strömungslehre (Bernoulli-Gleichung) führt die Geschwindigkeitszunahme zu einer Reduktion des Drucks. Es entsteht auf der Oberfläche des Flügels ein "Sog" (Abb 2). Da die obere und untere Seite des Profils eine unterschiedliche Wölbung aufweisen, wird auch ein unterschiedlicher "Sog" erzeugt.

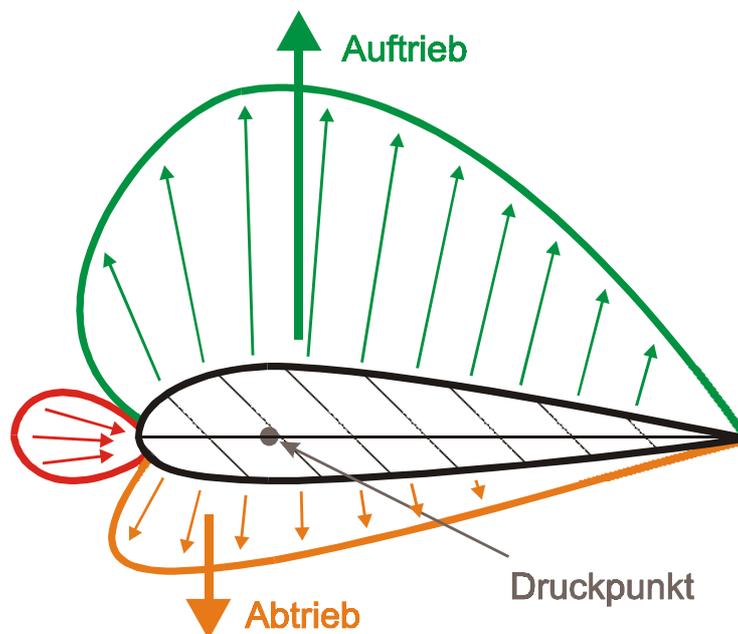


Abb 2

Bei einem vollsymmetrischen Profil (hier ist ein halbsymmetrisches dargestellt) ist der Unterdruck auf der Flügeloberseite genau gleich gross wie auf der Unterseite.

Diese rein aerodynamischen Kräfte reichen noch nicht aus, um ein Flugzeug zum Fliegen zu

bringen. Ein Flügel muss im Luftstrom leicht angestellt werden, wodurch die Luft nach unten abgelenkt wird, was zu einem Überdruck auf der Flügelunterseite führt, welcher den Gesamtauftrieb erhöht (Abb 3).

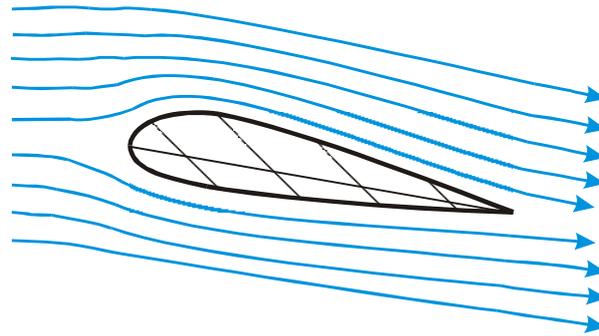


Abb 3

Dieser Anstellwinkel bewirkt zusätzlich eine Erhöhung des Unterdrucks auf der Oberseite, da die Luft einen noch weiteren Weg zurücklegen muss und dadurch stärker beschleunigt wird. Durch die Anstellung des Flügels wird aber auch der Luftwiderstand erhöht, was mit einer grösseren Leistung für den Vortrieb kompensiert werden muss.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass der Auftrieb grösser wird je schneller sich das Flugzeug vorwärts bewegt. Gleichzeitig wird aber auch der Luftwiderstand erhöht. Aus diesem Grund besitzen Flugzeuge welche nur langsam fliegen dicke Profile, bei sehr schnellen Flugzeugen reichen schlanke Profile für die Erzeugung des Auftriebs aus.

Der Anstellwinkel und die Geschwindigkeit können aber nicht beliebig erhöht werden da die Luftströmung auf der Oberseite abreißen kann. Das heisst die Strömung fliesst nicht mehr entlang dem Profil, sondern bildet Wirbel (Abb 4).

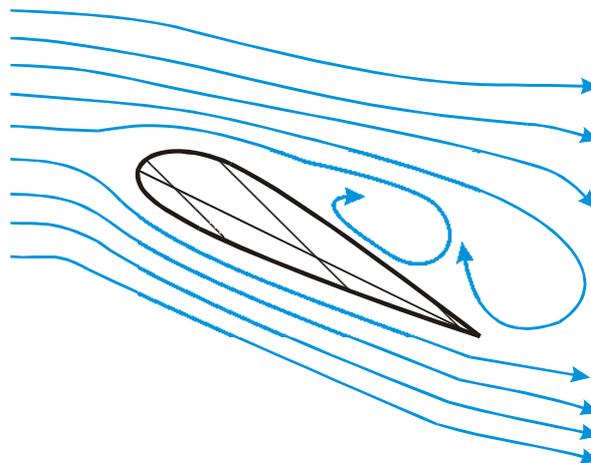


Abb 4

Zuerst entstehen die Wirbel an der Austrittskante. Wird der Anstellwinkel weiter erhöht, bilden sich immer mehr Wirbel Richtung Eintrittskante, bis der Auftrieb nicht mehr ausreicht um das Flugzeug in der Luft zu halten. Dieser Flugzustand wird als Stall (engl.) bezeichnet und tritt vor allem dann auf, wenn das Flugzeug zu langsam fliegt.

Sobald die Strömung wieder sauber am Profil entlang fliesst, ist auch der notwendige Auftrieb wieder vorhanden und das Flugzeug fliegt wieder.

## 2. Unterschiede Flugzeug - Helikopter

Die Helikopter unterscheiden sich ganz grundsätzlich von den Flächenflugzeugen. Zwar wirken auch beim Helikopter aerodynamische Kräfte, die sind aber viel schwieriger zu berechnen und zu erklären als bei einem Flugzeug. Dies vor allem weil beim sich drehenden Rotor zusätzliche Kräfte entstehen, welche bei einem Flächenflugzeug nicht vorhanden sind.

Bei einem Flugzeug mit Flügeln sind die Verhältnisse einigermaßen klar. Der Vortrieb wird entweder durch einen Propeller oder ein Düsentriebwerk geliefert (ausser bei einem Segelflugzeug). Der Auftrieb wird durch die Flügel erzeugt und das Ganze wird mit Klappen, Ruder und Leitwerken gesteuert (Abb 5).

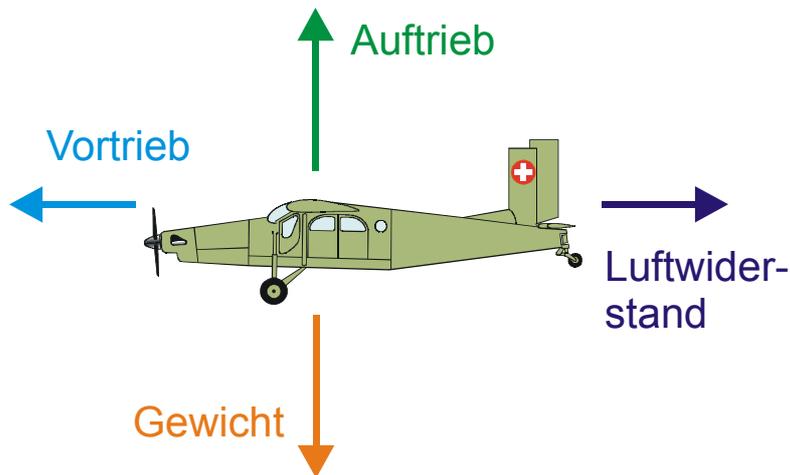


Abb 5

Anders sieht es beim Hubschrauber aus. Die sich drehenden Rotorblätter beschleunigen die Luft von oben nach unten. Dies geschieht indem bei allen Rotorblättern der Anstellwinkel gleichzeitig erhöht wird, auch kollektive Blattverstellung genannt. Dadurch wird die Luft, ähnlich wie bei einem Ventilator, nach unten "geblasen", der Auftrieb wird erhöht und der Helikopter beginnt zu steigen. Damit sich dieses Gefährt nach vorne bewegt, muss "nur" die Rotorebene nach vorne geneigt werden, so dass der Luftstrom durch den Rotor leicht nach hinten "geblasen" wird (Abb 6).

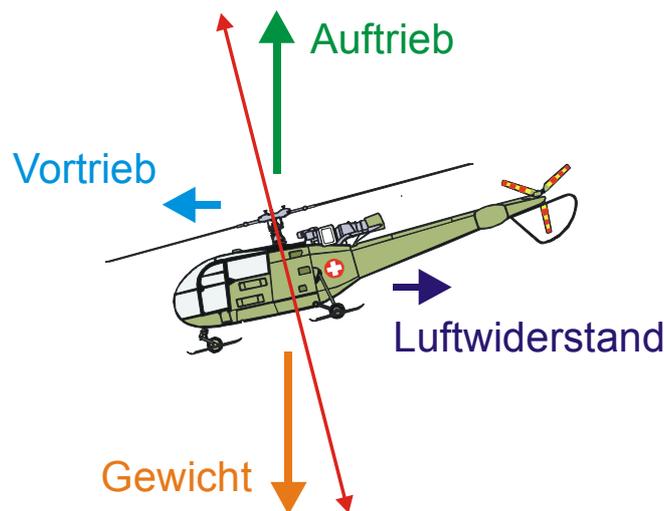


Abb 6

Die Steuerung des Helikopters erfolgt nach dem gleichen Prinzip. Die Rotorebene wird in die Richtung geneigt wohin der Hubschrauber fliegen soll. Dies tönt sehr einfach, ist in Wirklichkeit aber ein sehr komplexer aerodynamischer Vorgang (davon sprechen wir später). Gemeinerweise besagt ein physikalisches Gesetz (von Newton), dass eine Aktion eine

Reaktion hervorruft. Dies bewirkt, dass sich der Rumpf des Helikopter entgegen der Drehrichtung des Rotors drehen möchte. Um dies zu verhindern wird bei den meisten Hubschraubern ein senkrecht drehender Rotor, der Heckrotor angebracht, welcher dieses Drehmoment ausgleicht (Abb 7). Mit diesem Heckrotor kann der Helikopter im Schwebeflug um die Hochachse gesteuert werden.

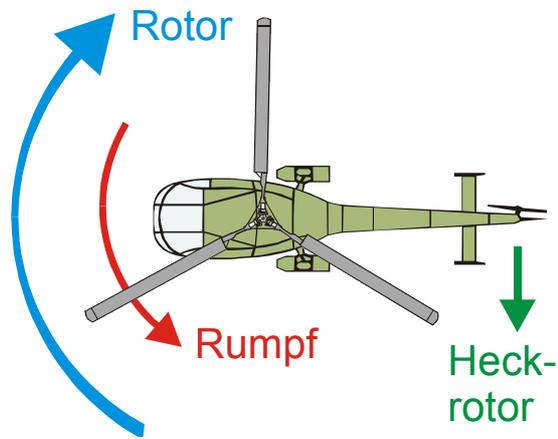


Abb 7

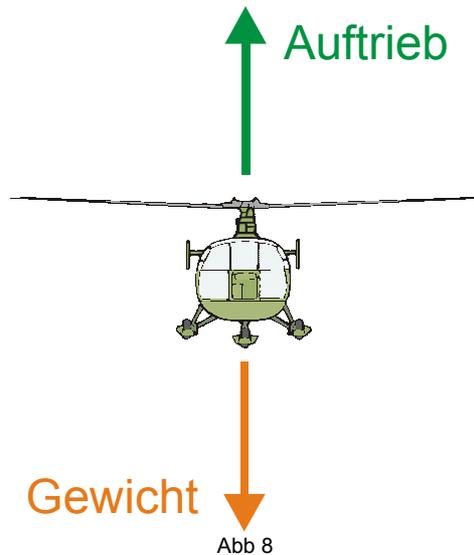
Bei Konstruktionen mit zwei gegenläufig drehen Hauptrotoren, entsteht kein Drehmoment auf den Rumpf, resp die Drehmomente der beiden Rotoren heben sich gegenseitig auf.

### 3. Der Helikopter im Schwebeflug

Gegenüber den Flächenflugzeugen können die Hubschrauber in der Luft stehen bleiben. Dies ist möglich, da die Hauptrotorblätter, wegen der Rotation immer durch die Luft angeströmt werden und dadurch den notwendigen Auftrieb liefern. Ein Flächenflugzeug erzeugt den Auftrieb erst, wenn eine genügend hohe Vorwärtsgeschwindigkeit erreicht ist.

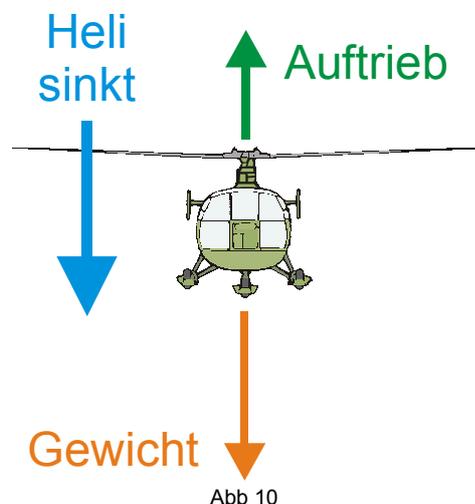
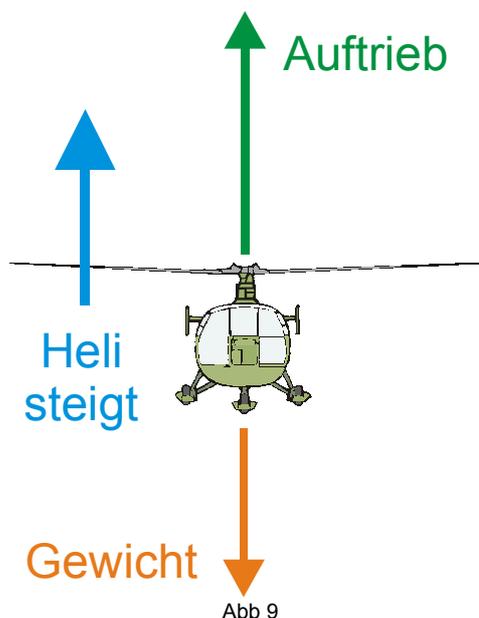
Im Schwebeflug werden wir, der Einfachheit halber, den Rotor als eine Scheibe betrachten und nicht die Verhältnisse am einzelnen Rotorblatt untersuchen. Dies ist möglich, da die aerodynamischen Kräfte einigermaßen symmetrisch, über die gesamte Rotorscheibe verteilt sind.

Damit sich ein Helikopter in der Luft halten kann, muss der Auftrieb genau gleich gross, wie sein Gewicht sein (Abb 8).



Wird nun bei allen Rotorblättern mit der kollektiven Blattverstellung gleichzeitig der Anstellwinkel erhöht, wird der Luftdurchsatz von oben nach unten durch die Rotorscheibe grösser, der Auftrieb nimmt zu und der Helikopter beginnt an Ort zu steigen (Abb 9).

Reduziert man den Anstellwinkel wird der Gesamtauftrieb kleiner, und der Hubschrauber beginnt sinngemäss zu sinken (Abb 10).



Wegen der Drehung des Hauptrotors entsteht ein Moment, welches bewirkt, dass sich der Rumpf entgegen der Drehrichtung des Hauptrotor dreht. Diese ungewollte Drehung wird durch den senkrecht stehenden Heckrotor korrigiert (Abb 11). Je grösser die Leistung des Hauptrotors ist, desto grösser ist auch das Drehmoment, und entsprechend mehr muss der Heckrotor leisten, um das Drehmoment zu korrigieren. Da der Heckrotor einen bestimmten horizontalen Schub produziert, hat der Helikopter die Tendenz sich in die entsprechende Richtung zu verschieben. Die Richtung ist abhängig von der Drehrichtung des Hauptrotors.

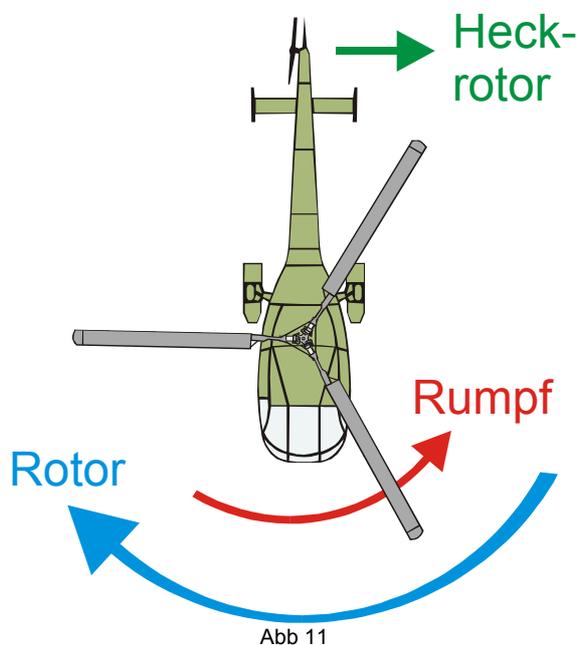


Abb 11

Dieses seitliche Versetzen muss wiederum mit dem Hauptrotor korrigiert werden. Der Luftstrom, auch Downwash genannt, wird leicht entgegen der Verschieberichtung geleitet, wodurch der Hubschrauber im stationären Schwebeflug bleibt.

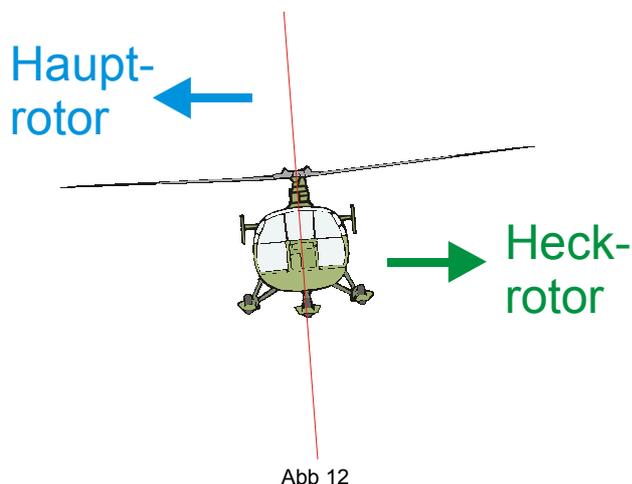


Abb 12

Die Kräfte des Haupt- und Heckrotors wirken bei vielen Hubschraubern nicht in der gleichen horizontalen Ebene. Aus diesem Grund kann es sein, dass der Helikopter im Schwebeflug nicht horizontal, sondern mit einer leichten Querlage da steht. Ob die Querlage links oder rechts ist, hängt primär wieder von der Drehrichtung des Hauptrotors ab (Abb 12).

Der Schwebeflug benötigt in der Regel mehr Leistung als der Vorwärtsflug. Eine wesentliche Rolle für die Leistungsfähigkeit spielt vor allem die Luftdichte. Je dichter die Luft, desto weniger muss der Antrieb leisten und desto mehr Gewicht kann der Hubschrauber tragen. Da mit zunehmender Flughöhe die Luftdichte abnimmt, muss das Gewicht des Helikopters reduziert werden, um ihn im Schwebeflug halten zu können. Grundsätzlich kann gesagt werden, je grösser die Aussentemperatur und je höher die Flughöhe ist, desto kleiner ist die Leistungsfähigkeit des Hubschrauber.

Einen weiteren Einfluss auf die Leistung hat der Downwash. Kann der Luftstrom ungehindert

abfließen, nennt man diesen Zustand Schwebeflug ausserhalb Bodeneffekt (hover out of ground effect, OGE) (Abb 13).

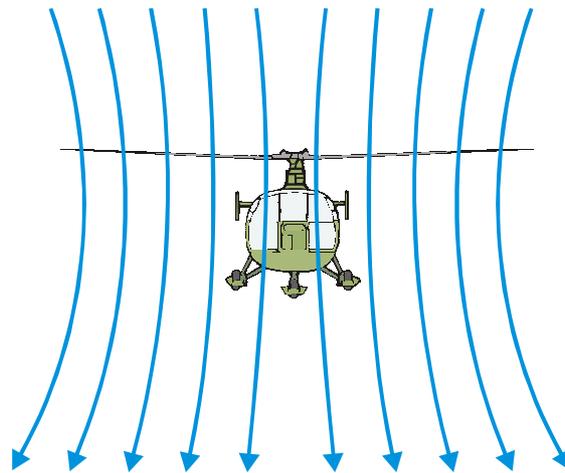


Abb 13

Schwebt der Helikopter in der Nähe des Bodens, nennt man dies Schwebeflug im Bodeneffekt (hover in ground effect, IGE). Durch den Downwash, welcher zur Seite abgeleitet werden muss, entsteht eine Art Luftkissen (Abb 14). Dadurch benötigt der Hubschrauber weniger Leistung für den stationären Schwebeflug.

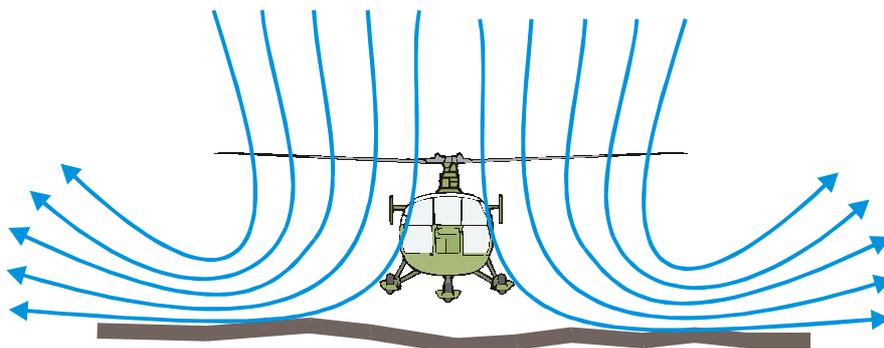


Abb 14

Je höher der Helikopter über dem Boden schwebt, desto kleiner ist der Einfluss des Bodeneffekts. Bei einer Schwebehöhe von ca. 1.5x dem Rotordurchmesser ist kein Bodeneffekt mehr vorhanden.

Einen grossen Einfluss auf den Bodeneffekt hat auch die Bodenbeschaffenheit und vor allem die Neigung des Geländes. Je stärker der Boden geneigt ist, desto besser kann der Downwash abfließen und desto geringer ist der Bodeneffekt.

## 4. Der Helikopter im Vorwärtsflug

Der wohl grösste Vorteil der Hubschrauber liegt darin, dass sie sowohl schweben, als auch vorwärts fliegen können. Der Übergang vom Schwebeflug in den Vorwärtsflug wird als sogenannte Transition bezeichnet und ist ein aerodynamisch wie auch mechanisch äusserst komplizierter Vorgang. Der Einfachheit halber werden wir den Rotor als eine Scheibe und nicht die aerodynamischen Verhältnisse am einzelnen Rotorblatt betrachten.

Wie bereits erwähnt, wird die Luft im Schwebeflug von oben nach unten durch den Rotor beschleunigt (Abb 15). Damit der Hubschrauber in den Vorwärtsflug übergeht, muss die gesamte Rotorscheibe nach vorne geneigt werden.

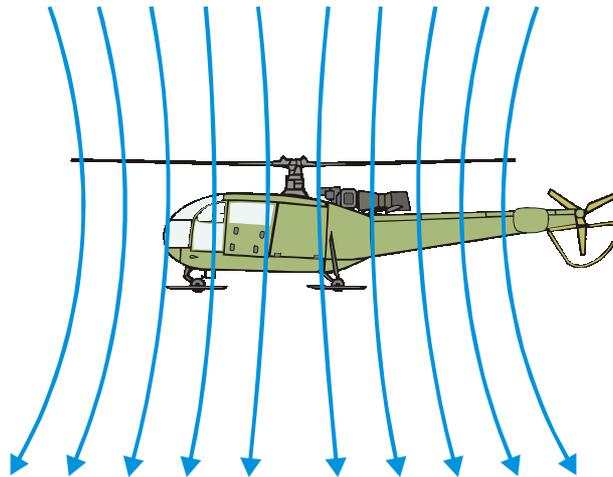


Abb 15

Durch die Neigung nach vorne wird die Luft nicht mehr senkrecht nach unten, sondern nach hinten beschleunigt (Abb 16). Dadurch beginnt sich der Hubschrauber nach vorne zu bewegen. Da aber auch der Auftrieb nicht mehr senkrecht nach oben wirkt, muss die Leistung durch den Piloten in der Startphase leicht erhöht werden, um das richtige Verhältnis zwischen Auftrieb und Gewicht zu erreichen.

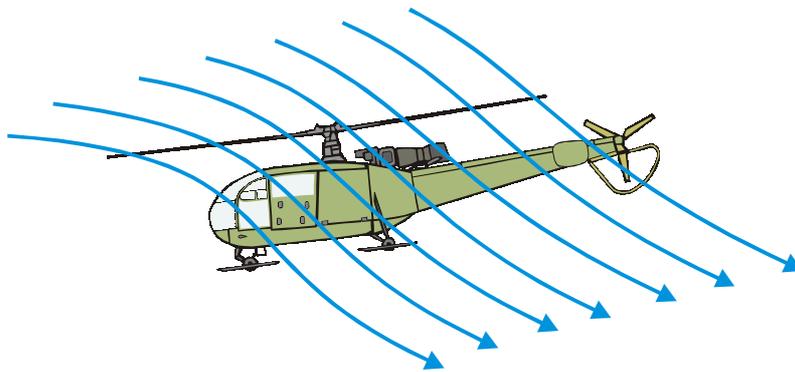
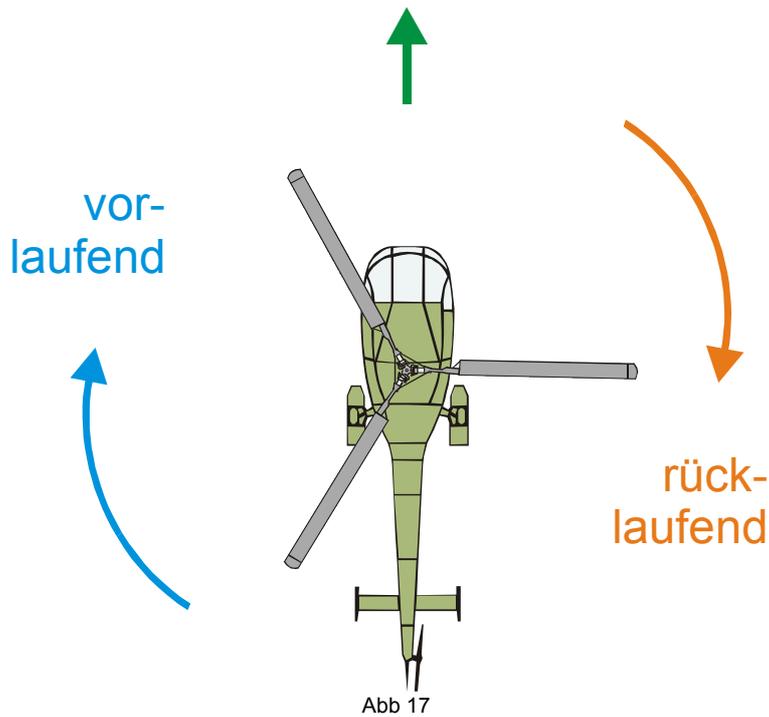


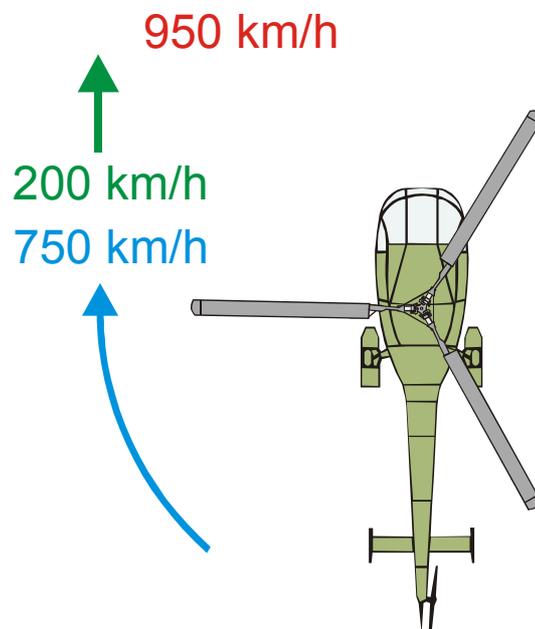
Abb 16

Durch die Rotation des Rotors entstehen im Vorwärtsflug unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten an den Rotorblättern. Das Rotorblatt, welches sich in Flugrichtung gesehen nach vorne bewegt wird als vorlaufendes Blatt, dasjenige welches sich nach hinten bewegt als rücklaufendes Blatt bezeichnet (Abb 17).



Die Anströmgeschwindigkeit ist abhängig von der Vorwärtsgeschwindigkeit, der Rotordrehzahl und dem Rotordurchmesser. Gehen wir davon aus, dass sich der Helikopter mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h vorwärts bewegt und eine Blattspitzengeschwindigkeit von 750 km/h aufweist, entstehen folgende Verhältnisse am Rotor:

Das vorlaufende Blatt erreicht eine effektive Geschwindigkeit an der Blattspitze von 950 km/h (750 + 200). Diese Geschwindigkeit befindet sich bereits sehr nahe an der Schallgeschwindigkeit. An der Blattwurzel wird immer noch eine Anströmung mit über 200 km/h erreicht (Abb 18).



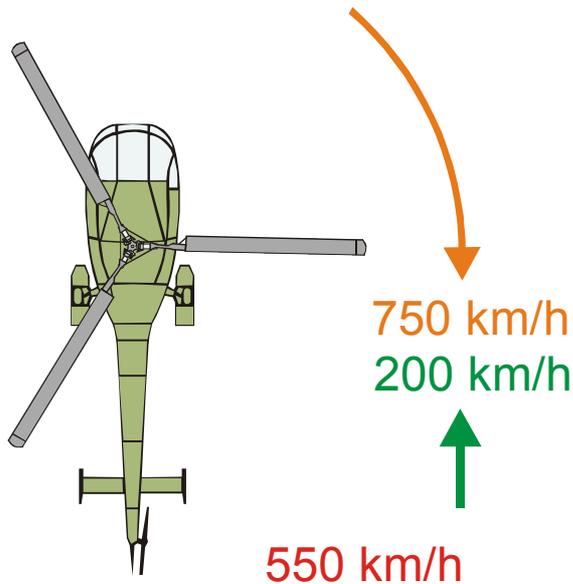


Abb 19

Das rücklaufende Blatt wird nur noch mit einer Geschwindigkeit von 550 km/h an der Blattspitze angeströmt (750 - 200). Die Anströmgeschwindigkeit nimmt ab, je näher man sich dem Rotationszentrum befindet. In der Gegend der Blattwurzel kann das Blatt sogar von hinten angeströmt werden und liefert demzufolge in diesem Bereich keinen Auftrieb mehr (Abb 19).

Der Auftrieb ist bekannterweise von der Anströmgeschwindigkeit und dem Anstellwinkel (nebst der Art des Profils) abhängig. Um einigermaßen konstante Auftriebsverhältnisse über die gesamte Rotorscheibe zu erreichen, muss der Anstellwinkel während dem Umlauf des Blattes konstant verändert werden, da sich die Anströmgeschwindigkeit ja auch konstant ändert. Diese Verstellung des Anstellwinkels wird als zyklische Blattverstellung bezeichnet.

Die Grenzen im Vorwärtsflug liegen bei heutigen Hubschrauber bei ca 400 km/h. Über dieser Geschwindigkeit würden sich grosse Teile des vorlaufende Blattes im Überschallbereich und ein grosser Bereich des rücklaufenden Blattes im Strömungsabriss befinden. Es gibt kein Flügelprofil, welches einen solch grossen Geschwindigkeitsbereich abdecken könnte.

## 5. Die Autorotation

Um die Anströmung am Rotorblatt sicherzustellen, muss der Rotor immer angetrieben werden. Was geschieht aber wenn der Antrieb - aus welchen Gründen auch immer - ausfällt? Da die Rotorblätter im Vorwärtsflug durch die kollektive Blattverstellung einen relativ grossen Anstellwinkel aufweisen und dadurch auch einen entsprechend grossen Luftwiderstand produzieren, fällt die Drehzahl des Rotors ohne Antrieb rapid ab. Dadurch geht selbstverständlich auch der notwendige Auftrieb verloren und der Hubschrauber stürzt innerhalb kurzer Zeit ab.

Das tönt zum Glück nur viel dramatischer als es in Wirklichkeit ist. Was bei einem Flächenflugzeug der Gleitflug ist, ist beim Hubschrauber die Autorotation. Fällt bei einem Hubschrauber während dem Flug der Antrieb aus, wird der Pilot sofort den kollektiven Blatteinstellwinkel verringern und der Hubschrauber beginnt zu sinken. Gleichzeitig wird, bedingt durch den kleineren Anstellwinkel der Luftwiderstand an den Rotorblättern wesentlich verringert.

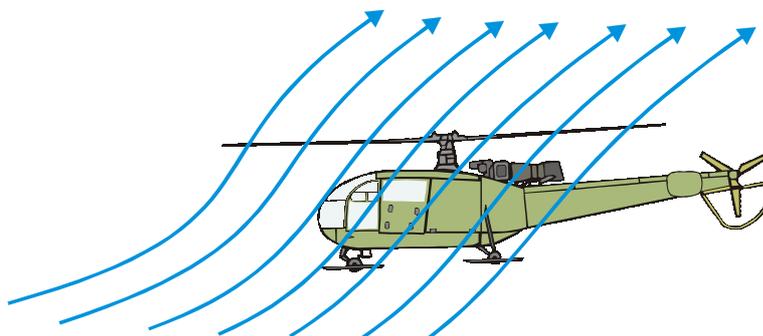


Abb 20

Wie wir in Abb 20 sehen können, wird der Rotor nun nicht mehr von oben nach unten, sondern von unten nach oben durchströmt. Durch die aerodynamischen Verhältnisse, welche wir noch etwas detaillierter betrachten werden, kann in diesem Zustand die Rotordrehzahl konstant gehalten werden. Um die Vorgänge in der Autorotation zu erklären, dürfen wir nicht wie bisher den Rotor als Scheibe betrachten, sondern müssen die Verhältnisse am einzelnen Rotorblatt untersuchen. Und dazu schauen wir zuerst den Zustand im angetriebenen Vorwärtsflug an (Abb 21).

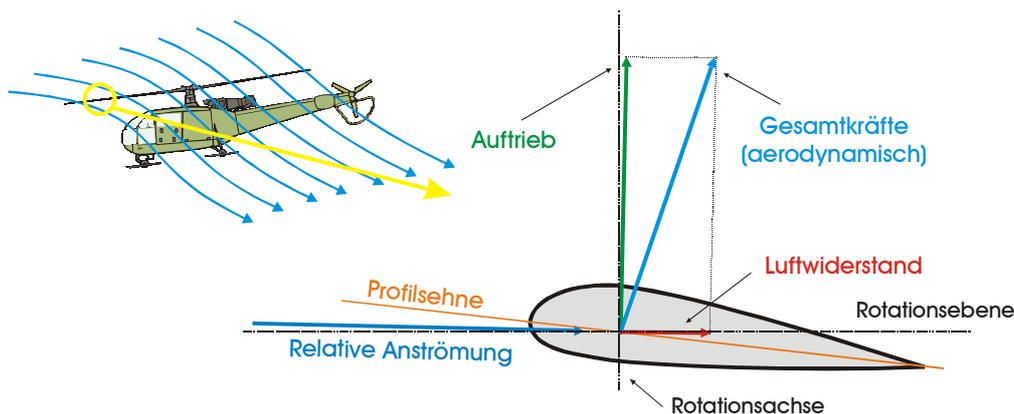


Abb 21

Bei einem Flugprofil wirkt der Auftrieb immer senkrecht zur Anströmung und der Luftwiderstand in der gleichen Ebene wie die Anströmung. Da bei einem Hubschrauber die Anströmung aus einer horizontalen (Drehung des Rotors) und einer vertikalen Komponente (Luftdurchsatz von oben oder unten) besteht, sprechen wir beim Rotorblatt von einer relativen Anströmung. Da sich das Rotorblatt nach aussen hin mit einer grösseren Geschwindigkeit bewegt, die vertikale Komponente aber mehr oder weniger konstant bleibt, ändert sich die relative Anströmung konstant über die ganze Länge des Rotorblattes. Aus diesem Grund gilt die Abb 21 nur für

einen kleinen Bereich am Rotorblatt. Auch der Anstellwinkel (Winkel zwischen der Profilhne und der relativen Anströmung) ändert sich über die Länge des Rotorblattes und zwar nimmt der Anstellwinkel nach aussen hin ab.

In der Autorotation kann der Rotor in drei Bereiche unterteilt werden. Der Einfachheit halber schauen wir zuerst die senkrechte Autorotation an, das heisst der Hubschrauber befindet sich im senkrechten Sinkflug (Abb 22).

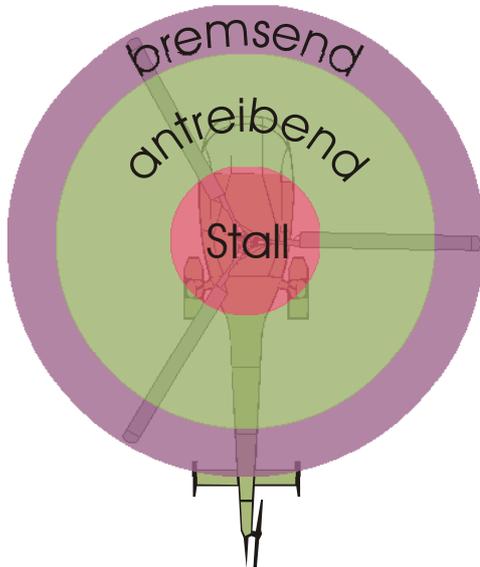


Abb 22

In der senkrechten Autorotation sind die Bereiche symmetrisch über die Rotorscheibe verteilt. Dabei ist nur der antreibende Bereich für die Drehung des Rotors verantwortlich. In der Nähe des Zentrums ist die Anströmgeschwindigkeit so klein, dass sich die Rotorblätter im Strömungsabriss befinden.

Um zu erklären wie diese Bereiche zustande kommen müssen wir die aerodynamischen Verhältnisse am einzelnen Rotorblatt etwas genauer untersuchen.

Im antreibenden Bereich liegen die aerodynamischen Gesamtkräfte vor der Rotationsachse des Rotors. Dadurch ergibt sich eine Kraft welche den Rotor antreibt.

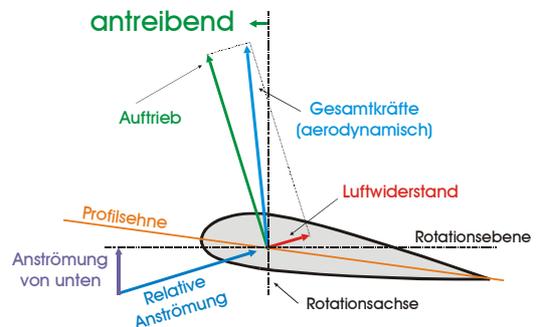


Abb 23

Liegen die aerodynamischen Kräfte genau auf der Rotationsachse bleibt die Drehgeschwindigkeit konstant.

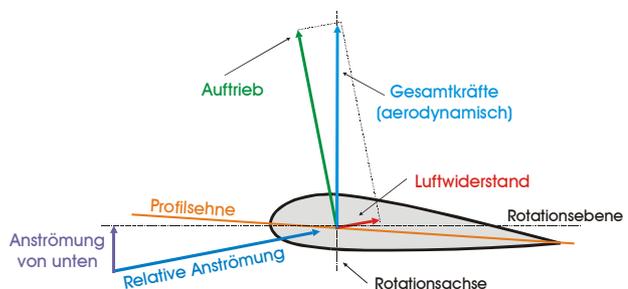
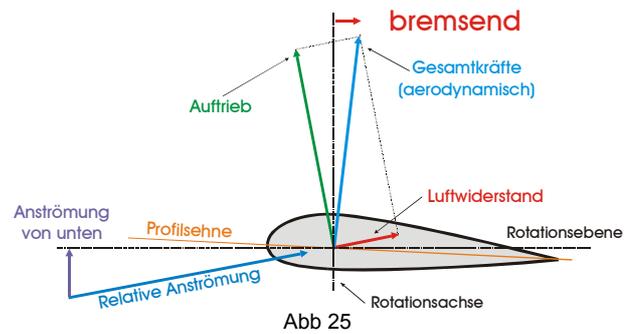


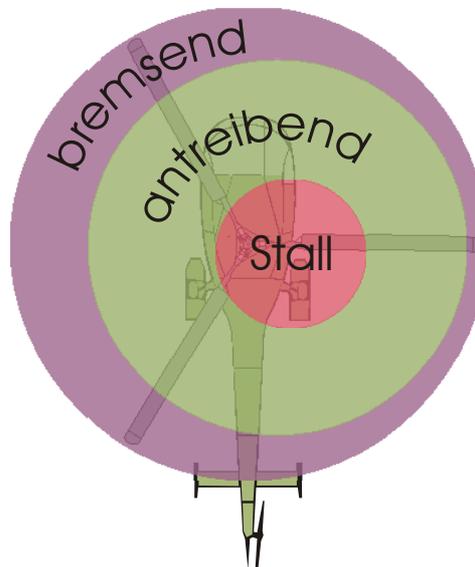
Abb 24

Im bremsenden Teil liegen die Gesamtkräfte hinter der Rotationsachse, was bedeutet das der Rotor abgebremst wird.



Alle Hubschrauber sind so konstruiert, dass sich ein Gleichgewicht zwischen dem antreibenden und dem bremsenden Teil ergibt. Dieses Gleichgewicht muss vom senkrechten Sinkflug bis zu einer bestimmten Vorwärtsgeschwindigkeit sichergestellt sein. Einige Hubschrauber sind während der Autorotation in der maximalen Vorwärtsgeschwindigkeit eingeschränkt. Das kommt daher, weil sich der antreibende Teil mit zunehmender Geschwindigkeit verschiebt (Abb 26). Diese Verschiebung erfolgt immer in Richtung des rücklaufenden Blattes.

Abb 26



Wird die Vorwärtsgeschwindigkeit in dieser Situation nochmals erhöht, verschiebt sich der antreibende Bereich weiter nach rechts, was schlussendlich dazu führt, dass der bremsende Teil grösser als der antreibende wird und dadurch die Rotordrehzahl nicht mehr konstant gehalten werden kann.

In der Regel wird eine Autorotation immer mit einer bestimmten Vorwärtsgeschwindigkeit geflogen. Um eine sichere Landung sicherzustellen muss diese Geschwindigkeit soweit möglich reduziert werden. Dies wird mit dem sogenannten Flare erreicht. Kurz über dem Boden nimmt der Pilot die Nase nach oben, wodurch das Sinken reduziert wird und die Geschwindigkeit abnimmt. Durch dieses Abbremsen kann vom Rotor noch mehr Energie aufgenommen werden (die Drehzahl wird erhöht) und der Hubschrauber kann eine fast normale Landung durchführen. Dies tönt sehr einfach, ist aber für den Piloten ein anspruchsvolles Manöver.

## 6. Der Vortex

Während dem stabilen Schwebeflug wird wie bereits beschrieben die Luft von oben nach unten durch den Rotor beschleunigt. Der Luftdurchsatz ist über die Länge des Rotorblattes nicht konstant (Abb 27).

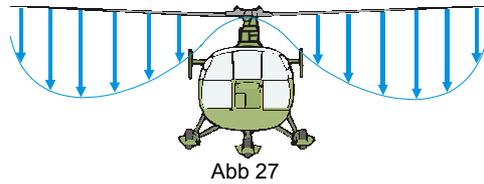


Abb 27

Der Vortex oder Wirbelringzustand entsteht bei einem Hubschrauber wenn sich dieser im Schwebeflug oder langsamen Vorwärtsflug, mit einer grossen Sinkgeschwindigkeit befindet. Die Sinkgeschwindigkeit muss sich in einem Bereich von mehr als 500 ft/min (2,5 m/sec) und die Vorwärtsgeschwindigkeit unterhalb der sogenannten Transitionszone befinden. Zusätzlich muss der Rotor durch den Antrieb angetrieben werden. Diese Verhältnisse sind vor allem während einem steilen Landeanflug mit Rückenwind gegeben.

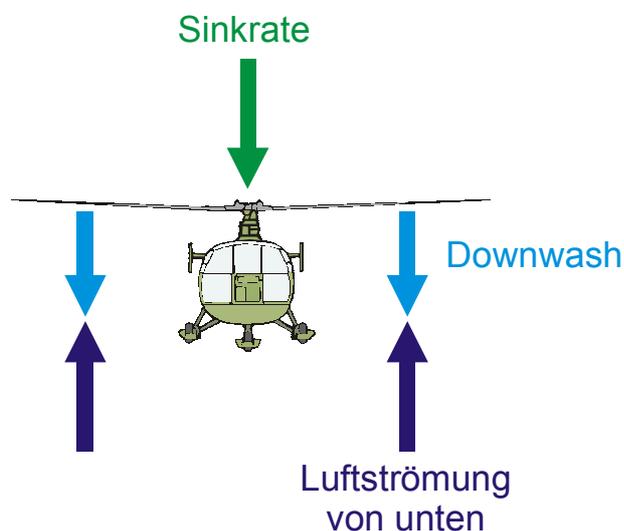


Abb 28

Durch die Sinkgeschwindigkeit entsteht ein Luftströmung welche dem Downwash entgegen wirkt (Abb 28).

Dadurch wird im inneren Bereich der Rotorebene die Luft zwar von oben nach unten beschleunigt, aber durch die Luftströmung von unten gleich wieder zurück nach oben befördert (Abb 29).

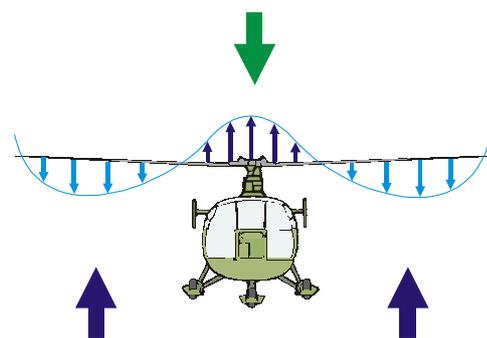


Abb 29

Die Luft wird erneut von oben angesogen und so entsteht ein in sich geschlossenes System, der Vortex oder Wirbelringzustand (Abb 30).

In diesem Zustand beginnt der Hubschrauber noch stärker zu sinken, auch wenn die Leistung erhöht wird. Zwar ist der Hubschrauber nach wie vor steuerbar, aber es treten zum Teil starke Vibrationen auf.

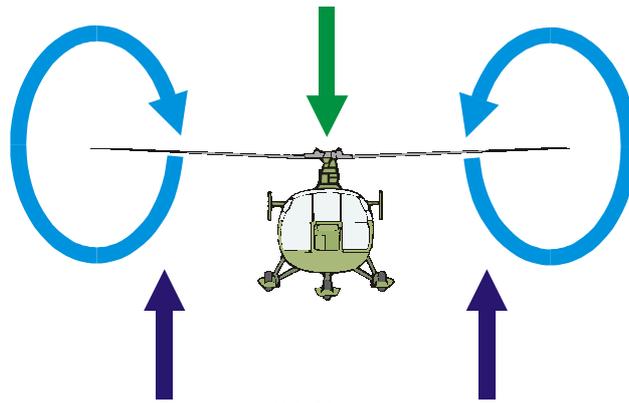


Abb 30

Der Vortex kann grundsätzlich auf zwei Arten beendet werden:

Bei der ersten Möglichkeit geht man in den Vorwärtsflug über, da der Downwash im Vorwärtsflug nach hinten abgelenkt wird, kann dadurch der Rotor mit "neuer Luft" von oben versorgt werden. Diese Variante muss angewendet werden, wenn der Vortex in Bodennähe, beispielsweise während einem Landeanflug auftritt.

Als zweite Möglichkeit kann man in die Autorotation übergehen, wodurch der Luftdurchsatz von oben nach unten fehlt und der Rotor nur noch von unten nach oben durchströmt wird (wie bei einer normalen Autorotation).

In jedem Fall muss der Pilot beim Auftreten des Vortex sehr schnell reagieren, da durch die enorme Sinkgeschwindigkeit die Flughöhe unter Umständen zu gering ist, um den Vortex zu beenden.