AOPA GERMANY

SAFETY LETTER

DER PROPELLER

Nr. 48, April 2020

An kleinen und mittleren Flugzeugen ist der Propeller so selbstverständlich wie das Rad am Auto. Dass es sich hierbei um ein technisch ausgeklügeltes Teil handelt, ist vielen Piloten vielleicht deshalb nicht bewusst. Erst, wenn die Windmaschine einmal – was glücklicherweise nur selten vorkommt – ihren Dienst versagt, kommen Piloten ins Schwitzen. Nicht deshalb, weil dadurch die kühlende Wirkung des Luftstroms ausbleibt, sondern weil dann sehr ernsthafte und oft existentielle Probleme entstehen können.

Dieser AOPA Safety Letter dient dazu, das Wissen und das Verständnis zur Funktion und Arbeitsweise des Schuberzeugers aufzufrischen.

DIE KRAFT ZUM FLIEGEN

Die treibende Kraft eines Flugzeugs ist der Motor. Diese Aussage bleibt auch in Fliegerkreisen meist unwidersprochen. Falsch ist diese Aussage natürlich nicht, aber die zum Fliegen notwendige Kraft ist der Schub und der wird erst durch den sich drehenden Propeller erzeugt.

Im Technikunterricht für Privatpiloten wird zur Erklärung der Funktionsweise oft der Begriff Luftschraube benutzt. Durch die begriffliche Analogie zur Befestigungsschraube wird das Verständnis der Funktionsweise stark erleichtert. Tatsächlich ist das Wirkungsprinzip erheblich komplizierter, was nicht bedeutet, dass man ein Physikstudium benötigt, um es zu verstehen. Trotzdem muss man einige Physikkenntnisse bemühen, um nachvollziehen zu können, was uns in den Genuss bringt, unserer naturgegebenen Bodengebundenheit zu entfliehen.

Grundsätzlich müssen zwei Kräfte erzeugt werden, um unsere geliebte Erdoberfläche zu verlassen. Die wichtigste ist zunächst der Auftrieb zur Überwindung der Erdanziehungskraft. Diese Aufgabe lässt sich recht einfach durch einen Tragflügel erledigen. Was die Erdanziehungskraft überwinden kann, sollte auch für den Vortrieb sorgen können, und so ist es nicht verwunderlich, dass man einst auf die Idee kam, hierfür das gleiche Prinzip zu nutzen. Tatsächlich hat ein Propeller viel Ähnlichkeit mit einem Tragflügel, obwohl er auf den ersten Blick ganz anders aussieht. Das liegt natürlich hauptsächlich daran, dass er sich dreht und sich nicht parallel zur Fortbewegungsrichtung bewegt.

DIE AUFGABE

Um in der Luft eine Kraft zu erzeugen, muss man diese Luft in der Gegenrichtung beschleunigen. Luft hat auch eine Masse und wird daher infolge einer Beschleunigung eine Gegenkraft bewirken. „Actio gleich Reactio" heißt die wohl älteste physikalische Regel, die auch hier wieder zur Anwendung kommt. Dass diese Kraft erheblich sein kann, weiß jeder, der einmal im Luftstrahl eines großen Propellers gestanden hat und befürchten musste, umgeblasen zu werden. Ein Propeller ist also im Grunde eine große Luftpumpe. Die Masse und die Geschwindigkeit der „gepumpten" Luft ist gleichermaßen ein Maß für die entstehende Schubkraft.

So erklärt sich auch der beeindruckende Propellerdurchmesser von großen Propellerflugzeugen. Hier wird eine enorme Luftmenge auf eine vergleichsweise geringe Geschwindigkeit beschleunigt. Die Propellerdrehzahl kann dabei ebenfalls verhältnismäßig gering gehalten werden, was dem Wirkungsgrad zugutekommt. Die Geschwindigkeit des erzeugten Luftstroms muss dabei immer größer sein als die Fluggeschwindigkeit. Wird sie kleiner, bremst der Propeller und das unter Umständen mehr als würde er stehen.

DIE ALLGEMEINE LÖSUNG

Die Erzeugung des Schubes soll natürlich möglichst verlustarm und gleichmäßig sein. Sinnvoll ist, dass im Propellerkreis ein möglichst gleich starker Luftstrom erzeugt wird. Dafür ist das „Design" der Propellerblätter verantwortlich. Der Propeller muss allerdings einen großen Geschwindigkeitsbereich abdecken, denn

© AOPA-Germany

Typischer zweiblättriger Propeller, wie er bei den meisten einmotorigen Flugzeugen verwendet wird.

im Bereich der Nabe ist die Umfangsgeschwindigkeit gering im Vergleich zu den Propellerspitzen. Folgerichtig hat er daher dort auch ein anderes Profil als an den Spitzen. Man kennt das schon von den Flächen eines Flugzeugs; langsame Flugzeuge haben dicke Flächen, schnelle Flugzeuge haben dünne Flächen.

Man nennt diese Veränderung über den Durchmesser „aerodynamische Schränkung". Neben dem Profil spielt der Einstellwinkel des Blattes eine wesentliche Rolle für die Erzeugung des vorwärtstreibenden Luftstroms. Auch hier sieht man eine starke Veränderung über den Durchmesser. An den Spitzen ist der Einstellwinkel klein und an der Wurzel groß. Man nennt das „geometrische Schränkung".

DIE INDIVIDUELLE LÖSUNG

Was diese beiden Eigenschaften angeht, sind alle Propeller gleich. Das war's auch schon, denn ansonsten muss jeder Propeller an seine individuelle Aufgabe angepasst werden. Die zwei wichtigen Parameter sind dabei die Drehzahl, für die die Motorleistung sorgen muss und die angestrebte Fluggeschwindigkeit. Gerade Fluggeschwindigkeit und Drehzahl arbeiten Hand in Hand was den Anstellwinkel des Propellerblattes zur anströmenden Luft betrifft.

Steigt die Fluggeschwindigkeit, sinkt der Anstellwinkel und umgekehrt. Welchen Einfluss unterschiedliche Anstellwinkel haben, kennt man auch von den Tragflügeln von Flugzeugen. Zu hohe Anstellwinkel bescheren den allerseits gefürchteten „Stall", zu geringe Anstellwinkel erzeugen nicht mehr genügend Auftrieb

und führen daher zum Sinkflug. Wie so oft, gibt es zwischen diesen zwei Extremen ein Optimum.

Der größtmögliche Auftrieb bei gleichzeitig möglichst geringem Widerstand wird durch das optimale Verhältnis zwischen Auftriebsbeiwert (c_a) und Widerstandsbeiwert (c_w) beschrieben, allgemein als Gleitzahl bekannt. Segelflieger achten besonders darauf, in dieser Konfiguration zu fliegen, weil sie das geringste Sinken bei gleichzeitig größtmöglicher Flugstrecke gewährleistet.

Beim Propeller müssen für diesen Zustand die Drehzahl und die Fluggeschwindigkeit optimal aufeinander abgestimmt sein. Ganz deutlich wird dieser Zusammenhang bei Schleppflugzeugen. Dort wird gerne ein sogenannter Steigpropeller installiert, der bei relativ geringer Fluggeschwindigkeit viel Zugkraft erzeugen kann. Man braucht sich daher nicht zu wundern, wenn sich bei einem so umgerüsteten Flugzeug auf einem Streckenflug nicht die gewohnte Geschwindigkeit einstellen will. Im Gegensatz dazu wird die Fluggeschwindigkeit mit einem Reisepropeller höher, die Steigleistung aber deutlich geringer. Optimale Anpassung heißt also das Zauberwort, was dazu führt, dass möglichst viel der Motorleistung in Schub verwandelt wird.

DER GENIESTREICH

Ein Festpropeller arbeitet nur in einem Zustand optimal, obwohl ein Flugzeug in mehreren Flugzuständen geflogen werden muss. Ein Verstellpropeller kann sich dagegen während des Fluges optimal an die gerade gestellte Aufgabe anpassen. Kleine Steigung im Steigflug und große Steigung während des Reisefluges, so kann die Motorleistung in jedem Zustand optimal genutzt werden.

Wird nun die Drehzahl konstant gehalten, wird das Propellerblatt so verstellt werden, dass ein Gleichgewicht zwischen Motorleistung und dem Luftwiderstand der Blätter entsteht. Eine hohe Motorleistung erzeugt also einen größeren Einstellwinkel des Propellerblattes als eine niedrige Motorleistung. Ein großer Einstellwinkel bringt natürlich auch einen größeren Schub und damit eine höhere Fluggeschwindigkeit als ein kleiner. Es wird sich also je nach eingestellter Motorleistung im Reiseflug immer eine optimale Fluggeschwindigkeit einstellen.

Einstellwinkel und Anstellwinkel

Der 'Einstellwinkel' ist der Winkel, mit dem das Propellerblatt gegenüber seiner Drehebene verdreht ist oder die Tragfläche gegenüber der Flugzeuglängsachse. Der 'Anstellwinkel' ist der Winkel des Propellerblattes oder der Tragfläche gegenüber der anströmenden Luft.

Ist bei einer vorgegebenen Drehzahl noch Motorleistung vorhanden, die bei einem festen Propeller die Drehzahl erhöhen würde, wandelt der Verstellmechanismus diese Leistung durch einen größeren Einstellwinkel in Schub um. Eine perfekte Lösung.

Leider verlangt diese bessere Lösung auch mehr technischen Aufwand und damit auch höhere Kosten. Nur aus diesem Grund haben nicht alle Kleinflugzeuge einen Verstellpropeller.

MODERNE VARIATIONEN

War früher der zweiblättrige Propeller die Regel, findet man heute mehr und mehr drei- oder sogar vierblättrige. Mehr Propellerblätter erhöhen den Aufwand und damit die Kosten. Wo liegt dann der Vorteil? Um es vorwegzunehmen: Aus technischer Sicht gibt es keinen. Der Grund liegt vielmehr in der Lärmemission. Ein großer Teil des Flugzeuglärms stammt vom Propeller. Daher werden bei den Nachrüstungen zwecks Lärmminderung meist auch zwei Maßnahmen durchgeführt. Der Motor bekommt einen lärmmindernden Auspuff und es wird ein anderer Propeller installiert.

Leise Propeller haben immer einen kleineren Durchmesser als „laute". Dummerweise müssen die Propellerblätter immer am äußeren Ende gekürzt werden (wo sonst?), ausgerechnet dort, wo der größte Teil des Schubes erzeugt wird. Das innere Drittel des Propellerhalbmessers trägt nämlich kaum zur Schuberzeugung bei. Es dient mehr dazu, dem Motor die notwendige Kühlluft zuzuführen. Erst in den äußeren zwei Dritteln des Radius wird der zum Fliegen notwendige Schub erzeugt. Kürzt man nun den Propeller in diesem Bereich, fehlt natürlich auch ein Teil des vorher vorhandenen Schubes.

© AOPA-Germany

Die meisten kleineren zweimotorigen Flugzeuge sind mit einem dreiblättrigen Propeller ausgerüstet.

Oft muss zur Lärmminderung auch noch die Motordrehzahl auf einen niedrigeren Wert reduziert werden, was einen weiteren Schubverlust mit sich bringt. Diese Schubverluste müssen durch einen oder zwei weitere Propellerblätter ausgeglichen werden. Ideal ist diese Methode nicht, denn jedes weitere Blatt erhöht den Widerstand des gesamten Propellers, die Gesamtverlustleistung erhöht sich ebenfalls, so dass der Wirkungsgrad sinkt.

Ein anderer Nachteil liegt auf der Hand. Je mehr Propellerblätter drehen, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass das einzelne Blatt in die durch seinen Vorläufer erzeugten Luftverwirbelungen gerät. Kaum vorhersehbare Strömungsverhältnisse sind die Folge, was den Wirkungsgrad ebenfalls negativ beeinflusst. Tatsächlich wäre unter diesen Aspekten der Propeller mit nur einem Blatt optimal. Die technische Umsetzung beim Flugzeug würde allerdings erhebliche Probleme bereiten, wie jeder sich leicht vorstellen kann.

Der lärmerzeugende Faktor beim Propeller ist die hohe Umfangsgeschwindigkeit an den Blattspitzen. Beträgt der Durchmesser 203 cm und die zulässige Drehzahl 2700 U/min (z. B. Cessna 210), flitzen die Propellerspitzen mit einer Geschwindigkeit von 1033 km/h durch die Luft. Unter Standardbedingungen entspricht das einer Machzahl von 0,84. Die Luftströmung um die Blattspitze herum kann dabei schon Schallgeschwindigkeit erreichen, was bekanntlich unsere Ohren stark beeindruckt.

Verringert man den Durchmesser um 4 cm, reduziert sich die Machzahl nur um 0,01 auf 0,83. Senkt man zusätzlich die Drehzahl um 100 Umdrehungen auf 2600 U/min, sinkt die Machzahl bereits auf 0,80, was Überschallströmungen an der Blattspitze unwahrscheinlich werden lassen.

KRÄFTE AN ALLEN ECKEN

In einem sich drehenden Karussell oder auch bei scharfen Kurvenfahrten mit dem Auto spürt man die Wirkung von Fliehkräften. Die Größe dieser Kräfte ist von der Masse, der Umfangsgeschwindigkeit und dem Radius der Drehebene abhängig. Die Kraft steigt proportional zu der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit und sinkt mit größer werdendem Radius. So ergeht es natürlich auch einem Propeller.

Die Umfangsgeschwindigkeit spielt wegen des quadratischen Anteils eine wesentliche Rolle. Die Propellerblattspitze einer Cessna 152 saust bei der zulässigen Drehzahl von 2750 U/min mit etwa 490 kt durch die Luft. Diese enorme Geschwindigkeit entspricht je nach Lufttemperatur einer Machzahl von etwa 0,72 – 0,76. Beachtliche Werte, die auch beachtliche Kräfte erzeugen.

Die Belastung des Propellerblattes setzt sich dabei aus zwei verschiedenen Komponenten zusammen. Die Hauptbelastungen entstehen durch die Fliehkraft infolge der Drehung und die dadurch entstehenden Luftkräfte. Die Fliehkräfte bewirken eine Zugbelastung in Längsrichtung und die Luftkräfte wollen das Blatt in axialer Richtung verbiegen. Die größte Materialbelastung entsteht im äußeren Drittel des Blattes.

GEFÄHRLICHE KERBEN

Zu jeder Vorflugkontrolle gehört die Überprüfung des Propellers auf Beschädigungen und Kerben.

© Hans-Peter Walluf

Die Zuggabel vergessen: Damit ist fliegen unmöglich!

Warum sind Kerben so gefährlich?

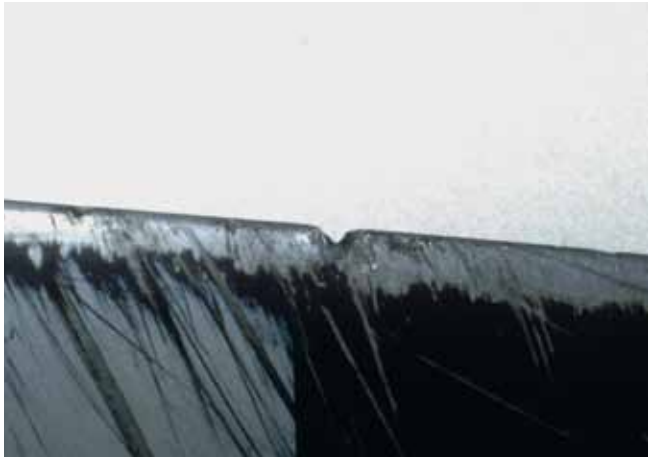
Kerben sind Beschädigungen und schwächen daher das Material. Insoweit ist die Sache verständlich. Das wäre bei entsprechender Auslegung gar nicht so

schlimm, wenn Kerben nicht eine ganz besonders unangenehme Eigenschaft hätten. Am Boden einer Kerbe steigt die Spannung auf einen mehrfach höheren Wert als in der Umgebung an. Wie stark dieser Anstieg ist, hängt unter anderem von der Form der Kerbe ab. Spitze Kerben lassen den Wert viel stärker ansteigen als stumpfe Kerben. Wie spitz oder stumpf eine Kerbe ist, lässt sich mit bloßem Auge meist nicht beurteilen.

Hat die erhöhte Spannung im Kerbgrund den für das Material maximal zulässigen Wert überschritten, beginnt eine gefährliche Kettenreaktion. Die Kerbe reißt weiter ein und wird dadurch spitzer als zuvor. Dadurch steigt die Spannung noch mehr an und der Riss setzt sich schneller fort. Gerade durch die besondere Beanspruchung bei Schwingungen wird dieser Effekt begünstigt.

Hat der Riss eine bestimmte Tiefe erreicht, kann durch die Verringerung des verbleibenden Querschnitts die zulässige Belastung für den eigentlich intakten Bereich überschritten werden und somit zum vollständigen Bruch führen. Hierdurch erklärt sich, dass Propeller meist schlagartig den Dienst quittieren.

STEINSCHLAG IST DER GRÖSSTE FEIND



© Hans-Peter Walluf

Ein durch Steinschlag beschädigter Propeller.

Dass Schotterpisten Propellermörder sind, weiß jeder; aber selbst Sand und winzige Steine haben schon enorme Wirkung. Sand und Steine findet man allerdings auch auf asphaltierten Pisten. Schäden durch Steine werden am häufigsten während der Startphase verursacht, immer dann, wenn der Motor mit Höchstleistung läuft und das Flugzeug eine vergleichsweise geringe Geschwindigkeit hat. Dann nämlich besteht die größte Gefahr, dass lose Steine angesaugt werden und mit den Propellerblättern kollidieren.

Besonders wilde Strömungsverhältnisse treten auf, wenn bei Turbopropflugzeugen der Umkehrschub benutzt wird. Der Propeller erzeugt dann Schub entgegen der Bewegungsrichtung und bewirkt starke Verwirbelungen, die zwar wegen des hohen Widerstands und der damit verbundenen Bremswirkung gewünscht werden aber bei entsprechendem Untergrund geradezu mörderisch für die Propellerblätter sind. Daher haben diese Propeller auch die geringste Lebenserwartung und müssen ganz besonders sorgfältig überprüft werden.

Um Steinschlag zu vermeiden, müssen also Situationen vermieden werden, bei denen der Motor mit hoher Leistung läuft und die Geschwindigkeit des Flugzeugs gleichzeitig klein ist. Eine typische Situation dafür entsteht auf den ersten Metern der Startrollstrecke. Die Rollgeschwindigkeit ist fast Null und der Motor läuft auf Hochtouren. Ist der Untergrund lose und besteht dadurch eine erhöhte Steinschlaggefahr, müssen diese ersten Meter mit besonderer Vorsicht angegangen werden. Am besten lässt man das Flugzeug bei wenig Motorleistung Fahrt aufnehmen und steigert dann die Leistung allmählich auf das Maximum. Man benötigt dadurch zwar eine längere Rollstrecke, aber der Propeller wird dankbar sein.

WAS IST, WENN?

Trotz aller Vorsicht und einer regelmäßigen Überprüfung, es ist passiert. Der Propeller hat eine Kerbe von einem Steinschlag. Der nächste Fachmann ist weit und guter Rat teuer. Kann der geplante Flug nun angetreten werden oder muss der Schaden erst durch einen Fachmann beseitigt werden? Natürlich kann hier kein Ratschlag für alle Fälle gegeben werden, aber es gibt dennoch Kriterien, die eine Entscheidung in diesem Fall erleichtern können.

Große Vorsicht ist angebracht, liegt die Kerbe im äußeren Drittel des Propellerblattes. Hier ist die Materialbelastung am größten und ein Schaden daher kritischer als in der Nähe der Nabe. Wie schon vorher erwähnt, spielt die Form und auch die Tiefe der Kerbe eine Rolle für ihre Gefährlichkeit. Hat der eingeschlagene Stein deutlich einen kraterartigen Abdruck hinterlassen, ist ebenfalls große Vorsicht angesagt.

Klar sollte sein, dass Kerben, die mehrere Millimeter tief sind, auch bei einem Piloten besonderen Eindruck machen müssen und keinesfalls ignoriert werden dürfen. Im Zweifelsfalle sollte das Flugzeug, wie auch bei anderen Schäden in jedem Fall stehen bleiben, denn ein abgebrochenes Propellerblatt im Flug bedeutet mit großer Sicherheit den Absturz.

WAS DER PROPELLER MIT DEM FLUGZEUG MACHT

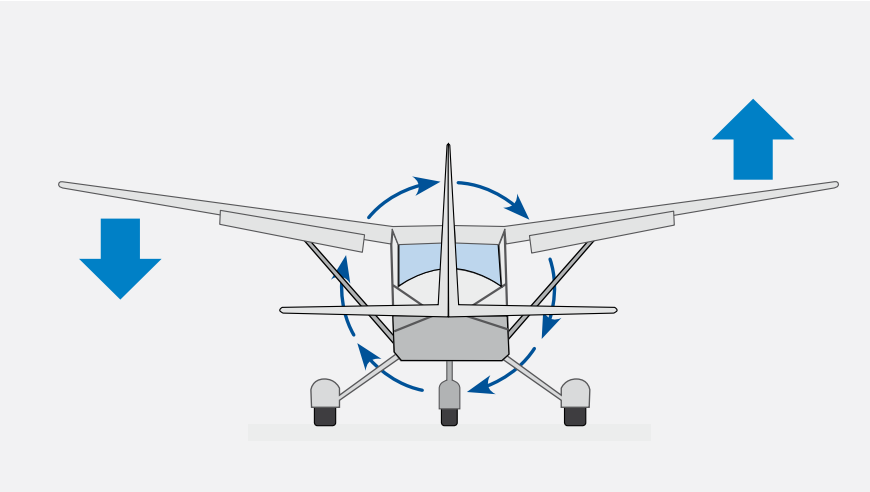
Die wichtigste Kraft, die der Propeller auf das Flugzeug übertragen soll, ist natürlich der Vortrieb. Die Vortriebskraft wird vom Propeller erzeugt und über die Kurbelwelle auf das Motorgehäuse übertragen. Das Motorgehäuse ist über den Motorträger mit dem Rumpf oder (bei zweimotorigen Flugzeugen) einem Tragflächensegment verbunden und leitet dadurch die Kraft in die gesamte Struktur ein. Man könnte sich also vorstellen, dass das Flugzeug wie am Schnürchen, das an der Kurbelwelle befestigt ist, durch die Luft gezogen wird. Wäre die Vortriebskraft tatsächlich wie eine Schnur zu verstehen, gäbe es keine negativen Nebeneffekte dieser Antriebsart, und manchem Piloten wäre der eine oder andere Schweißtropfen erspart geblieben.

Wie so oft müssen auch die Vorteile des Propellerantriebs durch Nachteile erkauft werden. Nachteilig sind in diesem Fall Kräfte, die sich ungünstig auf die Flugeigenschaften auswirken gerade dann, wenn sie nur teilweise kompensiert werden können. Generell kann man sagen, dass alle Kräfte, ob gewollte oder ungewollte, durch den Flugzeugmotor erzeugt werden. Die dazu notwendige Leistung lässt sich sehr genau ermitteln. Sie ist gleich der Drehzahl mal dem Drehmoment der Kurbelwelle. In diesen beiden Faktoren sind natürlich auch die für die ungewollten Kräfte und Effekte verantwortlichen Ursachen zu finden. Durch das Drehmoment des Motors müssen Massenkräfte und Luftkräfte überwunden werden. Als Massenkräfte treten beim Propeller Trägheitskräfte und Kreiselkräfte auf. Die Luftkräfte, hervorgerufen durch die Drehzahl, erzeugen neben dem gewollten Vortrieb auch ungewollte Effekte wie Widerstand und Verwirbelungen.

DAS DREHMOMENT BEWIRKT EIN GEGENMOMENT

Das vom Motor erzeugte Drehmoment bewirkt nicht nur, dass sich der Propeller dreht, sondern es versucht auch den Motor und damit das Flugzeug in die Gegenrichtung zu drehen. Ganz deutlich ist dieser Effekt bei einem Hubschrauber zu erkennen. Hätte ein Hubschrauber keinen Heckrotor, der die Gegenkraft zu dem Motordrehmoment erzeugt, würde die Zelle des Hubschraubers in Drehung versetzt – die Horrorvision für jeden Hubschrauberpiloten und bei Ausfall des Heckrotors nur schwierig zu beherrschen.

Ganz so schlimm ist die Situation bei einem Flächenflugzeug zwar nicht, aber trotzdem hat das Drehmoment eine Auswirkung. Wird beim Start die Höchstleistung gesetzt, stützt sich das Drehmoment am linken Hauptfahrwerk ab (bei rechtsdrehenden Motoren) und bewirkt dort einen höheren Rollwiderstand als auf der anderen Seite. Folgerichtig wird das Flugzeug im Startlauf die Tendenz haben, nach links zu drehen. Eine gut bekannte und vielgehasste Eigenschaft für jeden Flugschüler.



© AOPA-Germany

Auswirkung des Drehmoments bei rechtsdrehendem Propeller.

Was passiert nun im Flug mit dem Motordrehmoment und wodurch wird es ausgeglichen? Auch in der Luft bewirkt das Motordrehmoment eine Bewegung um die Längsachse. Dreht der Motor rechtsherum, möchte das Flugzeug um die Längsachse nach links drehen. Im Flug kann man diese Bewegung allerdings recht einfach durch Luftkräfte ausgleichen. An den Tragflächen steht immer ein großer Hebelarm zur Verfügung, so dass die Ausgleichskraft nicht groß zu sein braucht. Wir erinnern uns: Drehmoment ist gleich Kraft mal Hebelarm. Zum Ausgleich des Motordrehmoments

im Flug ist bei vielen Flugzeugen die linke Tragfläche mit einem leicht größeren Einstellwinkel eingebaut; sie produziert daher ein bisschen mehr Auftrieb als die andere Seite. Viel Kraft wird, wie gesagt, nicht benötigt und daher beträgt die Winkeldifferenz maximal zwei Grad, mit bloßem Auge also nicht sichtbar.

DIE MASSE IST TRÄGE

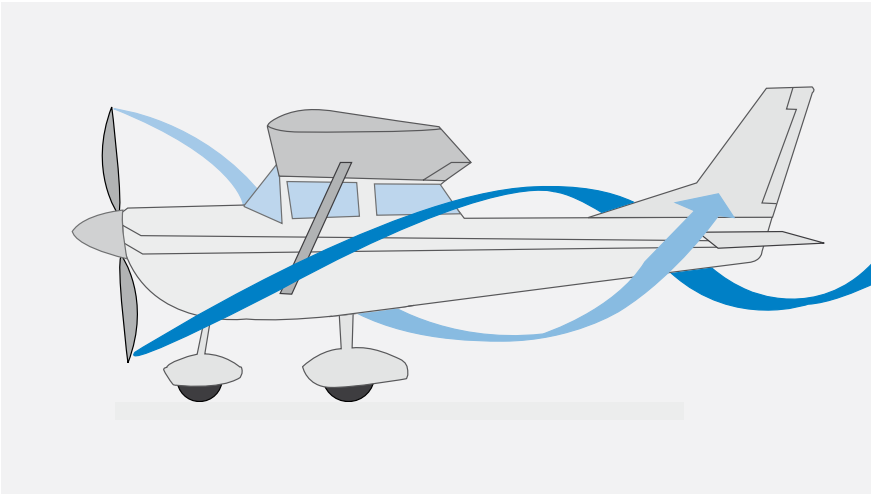
Die Massenträgheit des Propellers spielt in Bezug auf spürbare Effekte nur eine kleine Rolle, denn Kräfte treten nur auf, wenn eine Drehzahländerung herbeigeführt werden soll. Dabei wird nur das ohnehin vorhandene Drehmoment verstärkt, verursacht also keinen zusätzlichen Effekt.

Wenden wir uns einer weiteren Kraft zu, die ohne Berücksichtigung der Luftkräfte durch die Drehung des Propellers entsteht. Eine sich drehende Masse unterliegt den physikalischen Kreiselgesetzen. Der sich drehende Propeller wird sich also ebenfalls wie ein Kreisel verhalten. Kreisel haben eine faszinierende Eigenschaft, die gerade in der Fliegerei oft genutzt wird und ohne die ein IFR-Flug gar nicht vorstellbar wäre. Kreiselachsen bleiben in ihrer Lage raumstabil. Einmal in Drehung versetzt, bleibt ohne Krafteinwirkung die Richtung der Drehachse erhalten und zwar in Bezug auf den unsere Erde umgebenden Weltraum (nicht in Bezug zur Erdoberfläche!). Würde man also morgens einen sich drehenden Kreisel in einer kardanischen Aufhängung auf seinem Schreibtisch platzieren und ihn am Laufen halten, würde sich die Achsrichtung im Laufe des Tages in Bezug auf die Schreibtischoberfläche mit 15 Grad pro Stunde verändern, als Folge der Erddrehung. Man nennt diesen Effekt das scheinbare Wandern eines Kreisels, was ohne einen äußeren Einfluss passiert. Versucht man allerdings, die Achsrichtung eines Kreisels 'gewaltsam' zu ändern, wehrt er sich, er präzediert.

Dass die Präzession ebenfalls einer Regel unterliegt, dürfte klar sein. Für unser Flugzeug mit einem rechtsdrehenden Propeller heißt das, dass in einer Linkskurve ein Moment um die Querachse in Richtung 'Nase hoch' entsteht. In gleicher Weise gibt es in einer Rechtskurve das 'Nase runter' Moment. Ist das vielleicht der Grund, warum steile Linkskurven oft besser gelingen als Rechtskurven?

DIE PROPELLERLUFT DREHT SICH

Kommen wir nun zu einem anderen ungewollten Effekt, dessen Ursache in den entstehenden Luftkräften zu finden ist. Es handelt sich dabei um den Luftstrom, dem wir den Vortrieb verdanken. Ideal wäre es, würde dieser Luftstrom gradlinig und parallel zur Flugzeuglängsachse nach hinten strömen. Keine Verwirbelungen, keine Änderungen von Anstellwinkeln, keine ungewollten Kräfte – das wäre schön! Wir wissen alle, dass es nicht so ist. In Wirklichkeit dreht sich der gesamte Luftstrom in der Propellerdrehrichtung, wickelt also das Flugzeug förmlich ein und sorgt an den getroffenen Flugzeugflächen für spürbare Luftkräfte. Man nennt das den Propeller-slip-stream.



© AOPA-Germany

Verdrehung des durch den Propeller erzeugten Luftstroms entlang des Flugzeugrumpfs.

Besonders deutlich ist das während des Starts. Der sich drehende Luftstrom wickelt sich um das Flugzeug und trifft von unten rechts kommend auf die linke Seite des Seitenleitwerks. Somit wird die Nase des Flugzeugs nach links gedrückt und der durch das Drehmoment des Motors bereits vorhandene Effekt unterstützt. Das Flugzeug dreht nach links und lässt den Flugschüler schwitzen.

Bei kleinen Rollgeschwindigkeiten ist der Effekt besonders ausgeprägt, da noch keine stabilisierenden Luftkräfte wirksam sein können. Bei ausreichend großer Geschwindigkeit wird es durch die stabilisierende Wirkung des angeströmten Seitenleitwerks viel

schwieriger, das Flugzeugheck zu drehen. Zudem können hier konstruktive Maßnahmen wirksam werden.

Genauso, wie man den Einstellwinkel der linken Fläche leicht erhöht, um das Motordrehmoment auszugleichen, ist bei einigen einmotorigen Flugzeugen das Seitenleitwerk leicht nach links verdreht eingebaut, um eine Gegenkraft zu dem sich drehenden Propellerluftstrom zu erzeugen und somit im Reiseflug eine möglichst große Stabilität zu erreichen. Die Drehung des Leitwerks ist ebenfalls so klein, dass sie mit bloßem Auge nicht erkennbar ist.

DER SCHUB IST UNGLEICHMÄSSIG

Wer meint, damit wären alle Unarten des Propellers aufgezählt, irrt sich, es gibt noch eine. Auch das, was seine Hauptaufgabe ist, erledigt er nicht perfekt in allen Fluglagen. Der Schub des Propellers ist nicht immer symmetrisch und gleich stark innerhalb des Propellerkreises.

Steigt das Flugzeug, hat also einen positiven Anstellwinkel, ändert sich auch der Anstellwinkel der Propellerblätter. Dabei entsteht an dem Propellerblatt, das nach unten läuft, ein größerer und am gegenüberliegenden Blatt ein kleinerer Anstellwinkel. Was dadurch passiert, ist klar: Das nach unten laufende Blatt erzeugt einen größeren Schub als das Blatt, das sich nach oben bewegt. Der Schub ist also asymmetrisch und bewirkt wieder eine Kraft, die versucht, das Flugzeug nach links zu drehen.

Aus diesem Grund wird bei zweimotorigen Flugzeugen, wenn beide Motoren rechtsherum drehen, der linke Motor als der kritische bezeichnet. Fällt er aus, entsteht aufgrund des Hebelarms des rechten Motors ein starkes Drehmoment um die Hochachse. Wegen des größeren Hebelarms der Schubasymmetrie wird dieses Moment mehr verstärkt als beim Ausfall des rechten Triebwerks. Befindet sich ein Flugzeug im Sinkflug, passiert logischerweise das Umgekehrte. Das nach unten laufende Blatt erzeugt einen kleineren Schub als das nach oben laufende. Die erzeugte Kraft versucht dann das Flugzeug nach rechts zu drehen.

TROTZDEM FUNKTIONIERT'S

Drehmomente, Kreiseleffekte, Slip-Stream und asymmetrischer Schub, kaum zu glauben, dass man trotz alle dieser ungewünschten Effekte und Kräfte mit einem Propellerflugzeug noch einigermaßen geradeaus fliegen kann. Das liegt daran, dass viele dieser Auswirkungen kompensiert werden können. Eine Maßnahme, wie die Änderung des Einstellwinkels einer Fläche wurde schon genannt. Bei jeder Flugzeugkonstruktion werden sich allerdings die geschilderten Effekte anders auswirken und daher muss sich jeder Konstrukteur bei der Entwicklung eines Flugzeugs eigene Gedanken machen, wie er die Auswirkungen der Propellercharakteristik am besten ausgleichen kann. Das wird sicher in den Einzelfällen unterschiedlich gut gelingen, sodass man davon ausgehen kann, dass nicht alle Flugzeuge in der gleichen Weise reagieren. Ist man aber wegen der Kenntnis der Zusammenhänge auf mögliche Reaktionen vorbereitet, fällt es sicher leichter auch spontan richtig zu reagieren und ein Ausspruch wie: „Das Flugzeug macht ja, was es will." kommt niemandem mehr in den Sinn.

Autor:
Hans-Peter Walluf

Bilder:
AOPA-Germany, Hans-Peter Walluf
Die beiden Zeichnungen auf den Seiten 6 und 7 wurden den entsprechenden Zeichnungen in der Flugsicherheitsmitteilung „Auswirkung der Drehung des Propellers auf die Bewegung eines Flugzeugs" (Luftfahrt-Bundesamt, Braunschweig, 1974) nachempfunden.

Haftungsausschluss:
Die Informationen und Daten in diesem AOPA Safety Letter sind vom Autor und der AOPA-Germany sorgfältig erwogen und geprüft. Dennoch kann eine Garantie für Richtigkeit und Vollständigkeit nicht übernommen werden. Eine Haftung des Autors bzw. von AOPA-Germany und seiner Beauftragten für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

HERAUSGEBER
AOPA-Germany e.V.
Flugplatz, Haus 10
63329 Egelsbach

www.aopa.de