



Dass sich ein Flügel im Flug verbiegt, ist normal?

■ Auf jeden Fall! Ein großer Teil der Flugzeugmasse konzentriert sich im Rumpf, der durch die Schwerkraft nach unten gezogen wird. Ihr entgegen wirkt der Auftrieb, der die Flügel nach oben zieht und es möglich macht, dass das Flugzeug fliegt. Diese gegensätzlichen Kräfte bewirken, dass sich der Flügel biegt, ansonsten müsste er extrem steif gebaut und damit sehr schwer sein. Die Durchbiegung ist also vorgesehen und Teil des normalen Verhaltens eines Flugzeugflügels.

Ab wann spricht man denn von einer „großen“ Durchbiegung?

■ Das hängt von der Größe des Flugzeugs und seiner Spannweite, vom verwendeten Material und von der Bauweise der Flügel ab. Ob eine Auslenkung als „groß“ angesehen werden kann, ist dabei immer relativ zur Dimension des Flugzeugs. Lassen Sie uns beispielsweise die Durchbiegung an der Flügelspitze eines Airbus A340 betrachten: Die Auslenkung seines Flügels im Reiseflug beträgt gut zwei Meter, verglichen mit dem Zustand am Boden. Das scheint zunächst viel, ist aber tatsächlich ein durchschnittlicher Wert für ein Verkehrsflugzeug. Der A340 hat etwa 60 Meter Spannweite. Das Verhältnis der Auslenkung zur Flügellänge ist in diesem Fall sieben Prozent. Bei extremen Manövern kann die Durchbiegung mehr als doppelt so groß werden. Bei manchen Transportflugzeugen sind aber noch deutlich höhere Deformationen möglich. Die Boeing 787 mit ihren Flügeln aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) weist bei annähernd gleicher Spannweite eine Durchbiegung von drei Metern im Reiseflug auf. Diese kann unter maximaler Last durch Böen oder Manöver auf 8,5 Meter anwachsen. Das ist eine Durchbiegung von 28 Prozent. Dies bezeichnen wir bereits als eine „große“ Durchbiegung. Als Richtwert gilt: Wenn die Auslenkung an der Flügelspitze 10–15 Prozent der Flügellänge überschreitet, handelt es sich um eine „große Deformation“.

Während des statischen Tests ziehen Kräfte, die dem Auftrieb im Windkanal entsprechen, den Flügel nach oben

Treten solche Deformationen bei allen Flugzeugen auf und warum werden sie so groß?

■ Am besten sind die Effekte bei Segelflugzeugen zu sehen. Flügel mit einer großen Spannweite sowie geringer Flügeltiefe produzieren weniger Widerstand. Deshalb sind die Flügel aller Hochleistungssegelflugzeuge besonders schlank und biegen sich entsprechend durch. Aber auch bei neuen Verkehrsflugzeugen geht der Trend zu größeren Deformationen. Der Vorteil ist ein reduzierter Widerstand und damit

„Auch bei neuen Verkehrsflugzeugen geht der Trend zu größeren Deformationen“

einhergehend ein niedrigerer Treibstoffverbrauch. Während früher mit einer höheren Spannweite automatisch auch ein größeres und irgendwann nicht mehr akzeptables Gewicht einherging, ermöglichen heutzutage neue Bauweisen und innovative Materialien wie CFK solche langgestreckten Flügel. Mit dem richtigen Material und der optimalen Auslegung können wir die Deformation sogar nutzen, um die Kräfte zu verringern, die auf den Flügel wirken. Idealerweise mindert sich dadurch auch das Flügengewicht. Dieses Verfahren nennt sich „Aeroelastic Tailoring“. Auch der Passagierkomfort erhöht sich, da Schwingungen der Flugzeugstruktur gezielt reduziert werden können. Große Deformationen treten übrigens auch außerhalb der Luftfahrt an Flügeln auf, zum Beispiel bei Windkraftanlagen, denn auch hier sind schlanke Flügel vorteilhaft.

Was sind denn die Konsequenzen einer „kleinen“ oder „großen“ Deformation?

■ Ein entscheidender Unterschied tritt bereits bei den Berechnungsverfahren auf. Hier liegt auch der Fokus unserer Arbeiten im Institut für Aeroelastik. Bei einer Deformation des Flügels verschiebt sich sein Schwerpunkt und es kommt zu einer scheinbaren Verkürzung. Darüber hinaus drehen sich mit seiner Verformung die Richtungen der lokalen Auftriebskräfte, die auf den Flügel wirken. Bleibt die Durchbiegung des Flügels klein, so können die genannten Effekte vernachlässigt werden.

BIEGEN STATT BRECHEN

Am DLR-Institut für Aeroelastik wird untersucht, wie flexibel ein Flugzeugflügel sein darf

von Christine Unger

Flugzeugflügel verbiegen sich während des Fluges. Um sich selbst davon zu überzeugen, genügt während einer Flugreise ein Blick aus dem Fenster. Ab einer bestimmten Auslenkung sprechen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von großen Deformationen. Ob das gefährlich ist, in welchen Grenzen sich diese Deformationen üblicherweise bewegen und warum moderne Flügel zunehmend elastischer werden, erklärt Prof. Dr. Wolf Krüger vom DLR-Institut für Aeroelastik.



© DLR/Vetter

Prof. Dr. Wolf Krüger leitet am DLR-Institut für Aeroelastik die Abteilung Lastanalyse und Entwurf. Daneben leitet er an der Technischen Universität Berlin das Fachgebiet für Mehrkörperrdynamik in der Luft- und Raumfahrt. Privat engagiert er sich für internationalen Jugendaustausch, so liegen ihm auch die internationalen Kooperationen des DLR am Herzen. Was ihm an der Aeroelastik gefällt? „Die große fachliche Breite, die enge Zusammenarbeit zwischen Simulation und Experiment und die gute persönliche Atmosphäre machen den Reiz der Arbeit am Institut aus.“

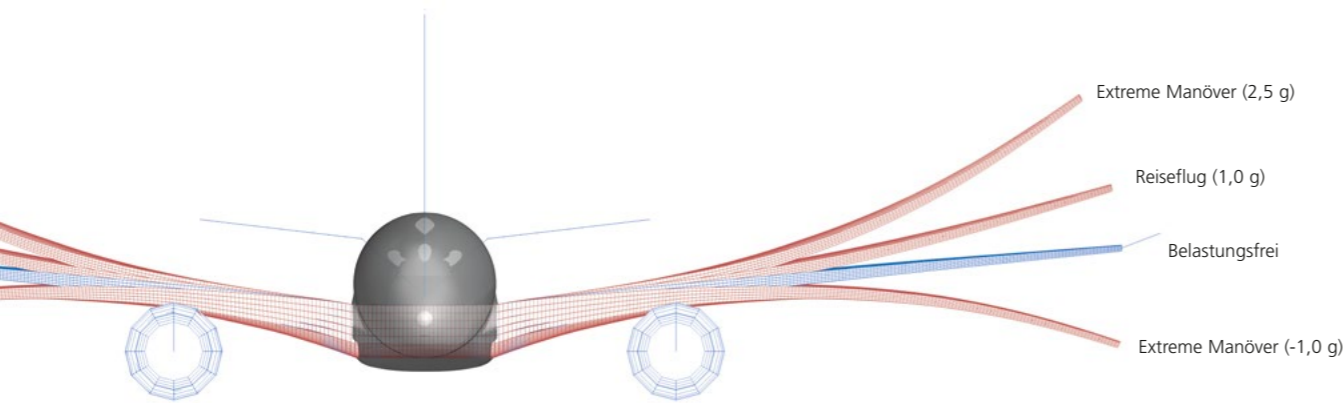
Um die Lasten zu berechnen, die auf ein Flugzeug wirken, und um daraufhin seine Struktur anzupassen, sind vereinfachende Annahmen heute üblich und hilfreich. Dadurch bleiben auch die Rechenzeiten für die Analysen relativ kurz.

Das Institut für Aeroelastik arbeitet an Verfahren, mit denen man Flügel mit großen Verformungen physikalisch genauer abbilden kann. Was genau entwickeln Sie?

Um große Verformungen zu berechnen, werden komplexe Verfahren benötigt, weil wir in diesem Fall nicht mehr vereinfachen können. Dabei handelt es sich in der Aerodynamik beispielsweise um „CFD-Verfahren“ oder um „geometrisch nichtlineare Wirbelleiterverfahren“. Um die Struktur zu modellieren, rechnen wir mit „Finite-Elemente-Programmen“ oder mit „Mehrkörper-Simulations-Programmen“. Wir nähern uns der Fragestellung von zwei Enden der Komplexität – auf der einen Seite wurde am Institut im Rahmen einer Promotion ein Verfahren entwickelt, das nichtlineare Strukturverformungen basierend auf schnellen Analyseverfahren darstellen kann. Auf der anderen Seite setzen wir komplexe Finite-Elemente-Modelle ein, welche die Flugzeugstruktur in einem hohen Detailgrad abbilden.

Das klingt alles nach viel Zeit am Computer ...

... stimmt, aber wir arbeiten auch an der experimentellen Überprüfung unserer Verfahren. Da ein Flugversuch mit einem Verkehrsflugzeug sehr teuer ist, fangen wir zunächst mit Tests im Labor und mit Windkanalversuchen an. Wir haben in Göttingen eine Serie von Windkanalversuchen mit speziell ausgelegten Flügeln durchgeführt, an denen wir Auslegungs- und Simulationsverfahren, aber auch neue Mess-



Diese Simulation zeigt, wie sich ein Flugzeugflügel während des Fluges verformen kann. „g“ steht dabei für die Erdbeschleunigung.

verfahren testen konnten. Beispielsweise testeten wir einen vorwärts gepfeilten Flügel, der mit seiner Spitze fast die Decke des Windkanals berührte, ohne dabei an seine strukturellen Grenzen zu geraten. Er bestand aus Lagen eines Faserverbundmaterials. Diese sind so angeordnet, dass sich der Anstellwinkel nicht erhöht, wenn sich der Flügel biegt, wie es sonst bei vorwärts gepfeilten Flügeln üblich ist. In diesem Entwurf haben wir sowohl die Bauweise als auch die Materialauswahl optimiert. Solche Strukturoptimierungen mit einer unkonventionellen Anordnung von Laminaten sind ein Beispiel für das oben schon angesprochene Aeroelastic Tailoring, für das wir am Institut ebenfalls seit vielen Jahren Ansätze entwickeln.

Ihre Projektpartner finden Sie im Inland und im Ausland?

Richtig. Das Thema hat sowohl eine hohe akademische wie auch industrielle Relevanz. Flugzeughersteller interessieren sich dafür, weil große Deformationen – als Ergebnis eines aggressiveren Leichtbaus der Flügel mit Faserverbundwerkstoffen – neue Strukturkonzepte erfordern werden. Auch die Nutzung neuer Materialien mit unkonventionellen Eigenschaften steht auf der Forschungsagenda. Wir entwickeln die Ansätze institutsübergreifend in DLR-internen Projekten, im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms zusammen mit Airbus sowie in nationalen und internationalen Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und Universitäten, wie der Technischen Universität Braunschweig, der ONERA (Frankreich), der Technischen Universität Delft (Niederlande) und der University of Michigan in den USA.

Das Interview führte **Christine Unger**, sie ist am DLR-Institut für Aeroelastik für die Öffentlichkeitsarbeit zuständig.



Das Leichtflugzeug X-HALE wurde an der University of Michigan entwickelt, getestet und in Kooperation mit dem DLR-Institut für Aeroelastik unter Einsatz neuer Simulationsverfahren analysiert

© Prof. Carlos Cesnik, University of Michigan

DAS DLR-INSTITUT FÜR AEROELASTIK:

Das Institut befasst sich mit physikalischen Phänomenen, die in Natur und Technik, aber insbesondere bei Flugzeugen auftreten. Die Aeroelastik untersucht das Zusammenspiel von aerodynamischen Kräften und elastischen Strukturen wie Flugzeugflügeln, die sich verformen und zu schwingen beginnen, wenn Kräfte auf sie einwirken. Das hat Auswirkungen auf die Auslegung und den Betrieb von Flugzeugen. Im Institut berechnen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das aeroelastische Verhalten mit numerischen Analyseverfahren und weisen es mit Windkanal- und Flugversuchen nach, sodass neue Fluggeräte betriebssicher und leistungsfähig gestaltet werden können.

DLR.de/AE



Bei dem Segelflugzeug Concordia sind die deformierten Flügel während des Fluges deutlich zu sehen

© Dick Butler

GLOSSAR:

Aeroelastic Tailoring: Auslegungsverfahren für Flügelstrukturen, bei dem Besonderheiten des Materials wie die richtungsabhängige Steifigkeit gezielt ausgenutzt werden, um Lasten, die bei Böen und Manövern auf das Flugzeug wirken, zu reduzieren. Das Verfahren wird besonders bei Faserverbundwerkstoffen eingesetzt.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK): Materialien aus einem Verbund von Kohlefasern in einem Trägerharz. Die Richtungen, in denen die Kohlefasern verlegt werden, bestimmen maßgeblich die Steifigkeit des Materials und können für verschiedene Belastungssituationen angepasst werden.

Finite-Elemente-Programm: Es dient der Analyse von Strukturen, aber auch für die Untersuchung aeroelastischer Eigenschaften von Flugzeugen. Die zu untersuchende Struktur wird für die Berechnung in viele einfache Teilgebiete aufgeteilt, beispielsweise in kleine Balken, Platten-elemente, Quader oder Tetraeder, dies sind die sogenannten finiten Elemente.

Mehrkörper-Simulations-Programm: Besonders in der Fahrzeugentwicklung, aber auch in der Auslegung von Windkraftanlagen eingesetztes Verfahren. Es stellt dynamische Systeme als Kombination einzelner Körper dar, die gelenkig, durch Federn oder andere Kraftgesetze miteinander verbunden sind. Das Verfahren ist besonders für die Analyse von großen Rotationen geeignet.

Nichtlineare Strukturverformungen: Bei linearen Verformungen ist die aufgebrauchte Kraft proportional zur Auslenkung – so führt die doppelte Kraft zu einer Verdopplung der Auslenkung. Das ist bei kleinen Kräften eine gute Näherung. Bei großen Kräften hingegen ist das Verhältnis von aufgebrauchter Kraft und Auslenkung nicht mehr proportional, außerdem kann sich auch die Richtung, in der sich die Struktur verformt, bei höheren Kräften verändern. Dann spricht man von einer nichtlinearen Strukturverformung.

Vorwärts gepfeilter Flügel: Um bei hohen Geschwindigkeiten fliegen zu können, sind Flugzeugflügel nicht in einem rechten Winkel zum Rumpf angebracht, sondern haben einen sogenannten Pfeilwinkel. Bei klassischen Transportflugzeugen ist der Flügel nach hinten „gedreht“, also gepfeilt. Eine Pfeilung nach vorne ist unüblich, hat aber auch viele Vorteile und wird deshalb in mehreren DLR-Projekten untersucht.