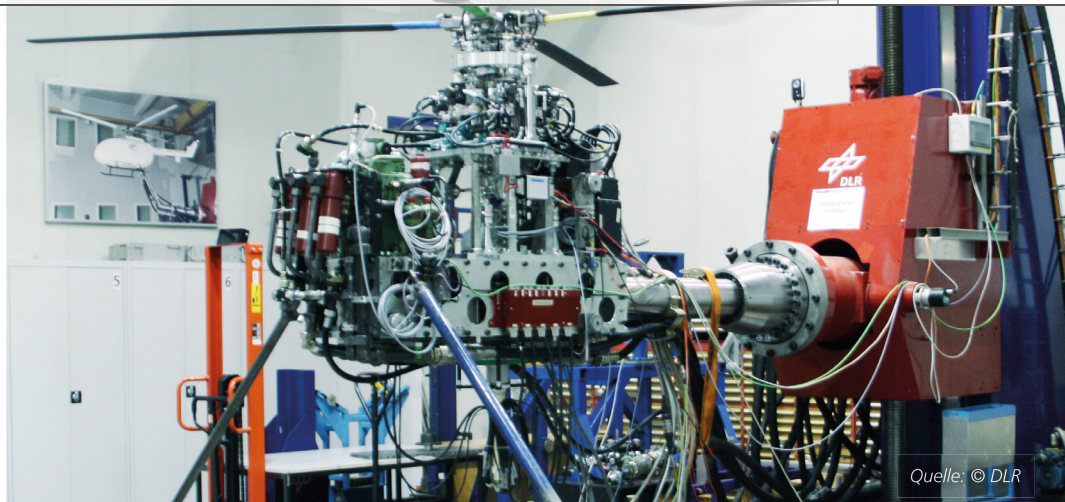


Ein schnell drehender Rotor sorgt – unüberhörbar – für den gewünschten Vor- und Auftrieb eines Hubschraubers. Mit einer neuartigen Rotoransteuerung zeigt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dass ein Hubschrauber auch deutlich leiser und vibrationsärmer fliegen kann.



# Leiseflieger

Die Mehrfachtaumelscheibe für Hubschrauberrotoren –  
aktiv gegen Lärm und Vibrationen



Quelle: © DLR

Mit diesem Versuchsaufbau entwickelt das DLR aktive Steuerungen für Hubschrauberrotoren.

Bei vorwärts fliegenden Hubschraubern überlagern sich die verschiedenen Anströmungen aus der Vorwärtsbewegung und aus der Drehung des Rotors. Dadurch entstehen über die gesamte Rotorkreisfläche stark unsymmetrische Strömungsverhältnisse. Diese verursachen verschiedene aerodynamische, aeroelastische und aeroakustische Effekte (dynamische Strömungsabrisse, Lärm, Vibrationen etc.), die gewöhnlich periodisch mit der Rotordrehfrequenz und ganzzahligen Vielfachen davon (Rotorharmonische) auftreten. Diese Effekte versucht man zu vermeiden und setzt dazu an der zentralen Steuereinrichtung des Hubschraubers an.

### Steuerung des Hubschraubers

Das wesentliche mechanische Steuerungselement eines Hubschraubers ist die sogenannte Taumelscheibe. Sie überträgt die Steuereingaben des Piloten auf die sich drehenden Rotorblätter. Dies geschieht einerseits durch kollektive Blattverstellung, also die Änderung des Einstellwinkels aller Hauptrotorblätter und damit des Auftriebs, und andererseits durch zyklische Blattverstellung zur Steuerung des Vor- und Seitwärtsflugs. Letztere variiert den Blatteinstellwinkel über den Rotorumfang, also mit 1/rev.

### Aktive Gegenmaßnahmen

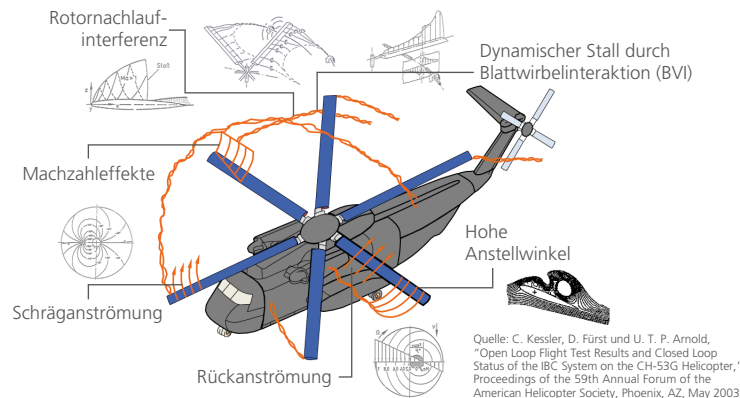
Der Ansatz zur Unterdrückung unerwünschter Strömungseffekte besteht darin, die Rotorblätter mit bestimmten Vielfachen der Rotordrehfrequenz und geringen Amplituden anzuregen. Um

Vibrationen zu reduzieren, werden dabei Frequenz, Amplitude und Phasenlage so gewählt, dass es zur Auslöschung durch Interferenz kommt; doch auch Lärmabstrahlung und Leistungsbedarf des Rotors lassen sich mit diesem Verfahren positiv beeinflussen. Durch eine konventionelle (kollektive und zyklische) Hubschraubersteuerung können die höherharmonischen Anteile der unerwünschten Strömungseffekte nicht effektiv beeinflusst werden, sie dient ausschließlich zur Flugsteuerung. Aus diesem Grund wurden bereits Mitte des vergangenen Jahrhunderts erste Überlegungen angestellt, entsprechenden Phänomenen bzw. deren Auswirkungen durch eine aktive Rotorsteuerung entgegenzuwirken. Dabei werden zusätzlich zu den durch die normale Hubschraubersteuerung erzeugten Einstellwinkelveränderungen an allen Blättern hochfrequente Einstellwinkelveränderungen mit bestimmten Vielfachen der Rotordrehfrequenz (Rotorharmonische) aufgebracht. Dadurch lassen sich Vibrationen im Hubschrauber sowie die Lärmabstrahlung nach außen signifikant reduzieren und darüber hinaus Leistungssteigerungen erzielen.

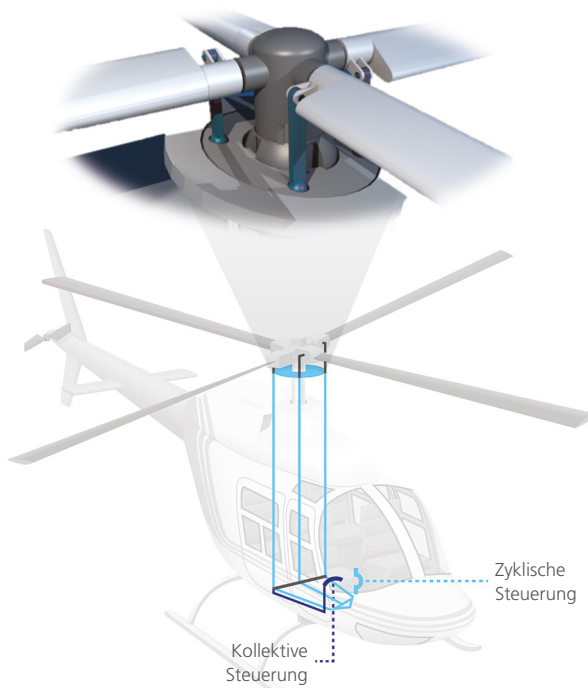
### Aktive Rotoransteuerung

Bisherige Ansätze zur aktiven Rotorsteuerung haben meist gravierende Nachteile. Systeme, die die dynamischen Einstellwinkelveränderungen durch entsprechende Bewegungen der Taumelscheibe (durch Aktuatoren) erzeugen, können beispielsweise nur bei Rotoren mit bis zu drei Blättern an jedem

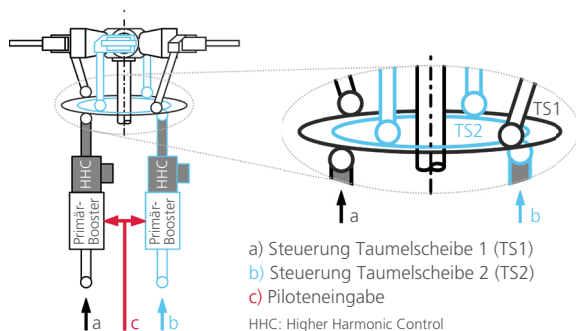
&gt;&gt;



Aerodynamische Phänomene von Helikopterrotoren beim Vorwärtsflug.



Durch kollektive und zyklische Verstellung der Rotorblätter über eine Taumelscheibe ist ein Hubschrauber vertikal und horizontal steuerbar.



Quelle: © DLR

Wirkprinzip der Mehrfachtaumelscheibe: Je eine Taumelscheibe wirkt auf zwei gegenüberliegende Rotorblätter.

individuellen Rotorblatt den jeweils optimalen Einstellwinkel einsteuern – also IBC (Individual Blade Control)-Betrieb gewährleisten. Für Rotoren mit vier und mehr Blättern, wie sie heute üblich sind, ist dieser Ansatz aus Gründen der Taumelscheibenkinematik nur eingeschränkt anwendbar. Andere Systeme sind zwar uneingeschränkt IBC-fähig, nutzen aber Aktuatoren im drehenden System, die über Schleifringe aufwendig mit Energie und Steuersignalen versorgt werden müssen und zudem hohen Lasten ausgesetzt sind.

**Neuer Ansatz:  
Mehrere Taumelscheiben**

Die vom DLR patentierte und am Rotorversuchsstand in Braunschweig an einem Vierblattrotor erprobte Mehrfachtaumelscheibe (META) ist ein neuartiger Ansatz für die aktive Rotorsteuerung. Durch elektrohydraulische Aktuatoren werden mehreren konzentrischen Taumelscheiben hochfrequente Bewegungen aufgeprägt, die am Rotor dann die gewünschten Blatteinstellwinkeländerungen hervorrufen. Dabei sind die Aktuatoren unterhalb der Taumelscheiben montiert, die jeweils mit zwei Blättern verbunden sind. Durch die Verwendung mehrerer Taumelscheiben ist das System für IBC geeignet, das heißt, es können beliebige Frequenzen und Anstellwinkelverläufe auf die Rotorblätter übertragen werden. Somit kombiniert die META die Vorteile der bisherigen Ansätze, ohne jedoch deren Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

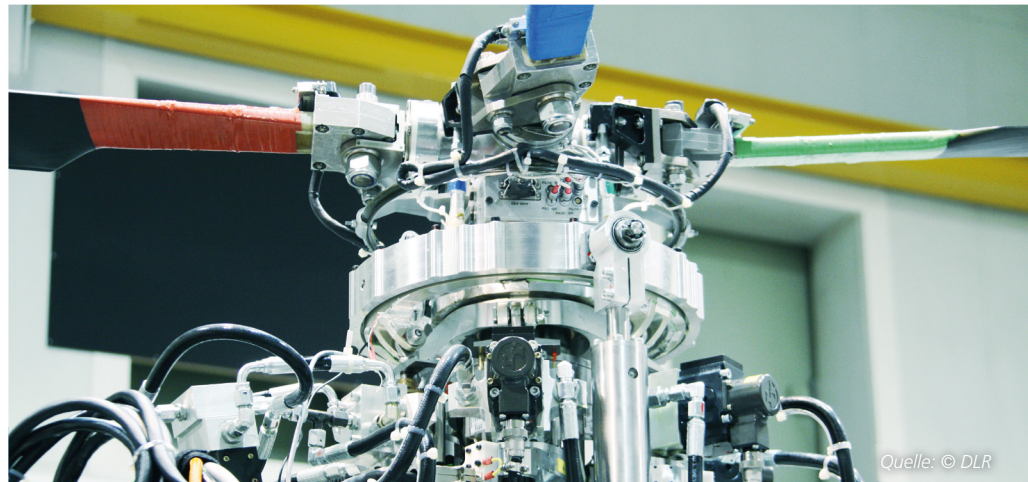
**Erster Versuchsaufbau**

Im Rahmen des Projektes VAR-META (Voll-Aktive-Rotorsteuerung mittels Mehrfachtaumelscheibe) innerhalb des nationalen Luftfahrtforschungsprogrammes wurde die Mehrfachtaumelscheibe beim DLR in Braunschweig am Rotorversuchsstand aufgebaut und erstmals erprobt. Für die Versuche kam ein verkleinertes Windkanalmodell eines gelenklosen Bo105-Rotors mit einem Durchmesser von ca. 4 Metern

zum Einsatz, das erstmals mit der Mehrfachtaumelscheibe ausgerüstet wurde. Durch die Machzahl-Skalierung des Modells werden Strömungsverhältnisse erreicht, die denen am tatsächlichen Hubschrauberrotor weitestgehend entsprechen – allerdings erhöht sich damit auch die Rotordrehzahl. Eine besondere Herausforderung während des Projektes war die Ansteuerung der elektrohydraulischen Aktuatoren, die die beiden Taumelscheiben positionieren und bewegen. Zum einen müssen die gewünschten Anstellwinkeländerungen aller vier Rotorblätter in entsprechende Kolbenbewegungen der Aktuatoren umgerechnet werden, zum anderen müssen diese Aktuatorbewegungen aktiv geregelt werden.

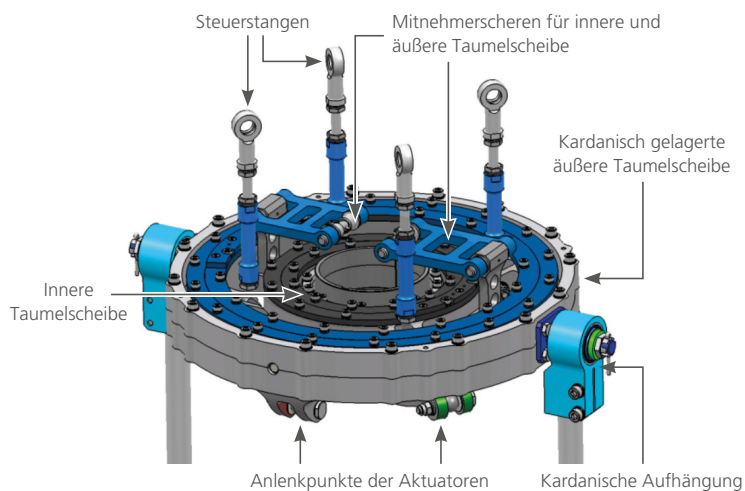
### Anforderungen an die Steuerungsgenauigkeit

Die Anforderungen an das Steuer- und Regelsystem sind hoch. Der Modellrotor dreht während der Versuche mit  $1050 \text{ min}^{-1}$ . Bei geplanten Blattsteuerfrequenzen von der ersten bis zur sechsten Rotorharmonischen ergibt sich für die Aktuatoren daher ein Frequenzbereich von 0 Hz (statisches Positionieren) bis zu 105 Hz, in dem eine hohe Regelgenauigkeit (ca. 0,05 mm) erreicht werden muss. Der Maximalhub der Aktuatoren beträgt dabei  $\pm 4 \text{ mm}$ , was ca.  $\pm 3,7^\circ$  Einstellwinkel am Rotorblatt entspricht. Der eingesteuerte Einstellwinkel eines Rotorblattes ist zu jedem Zeitpunkt von dessen aktuellem Azimutwinkel am Rotor abhängig. Mit einem Winkel-Encoder am Rotormast werden daher Triggersignale erzeugt, die Informationen über den aktuellen Rotordrehwinkel liefern und von allen Steuer-, Regel- und Messsystemen am Rotorversuchsstand genutzt werden. Um die gewünschte Steuergenauigkeit zu erreichen, werden die Aktuatoren



Quelle: © DLR

Prototypischer Aufbau der Mehrfachtaumelscheibe.



Mechanische Konstruktion der Mehrfachtaumelscheibe.

Quelle: © DLR

der Mehrfachtaumelscheibe pro Umlauf 256 Mal angesteuert – bei einer Rotordrehfrequenz von 17,5 Hz ergibt sich eine Taktfrequenz von knapp 4,5 kHz für das Steuer- und Regelsystem. In diesem Takt müssen also alle Berechnungen für die Steuerung von sechs Aktuatoren sowie deren Regelung, inklusive Signalverarbeitung und

Analyse, Filter und Vorsteuerung, berechnet werden können.

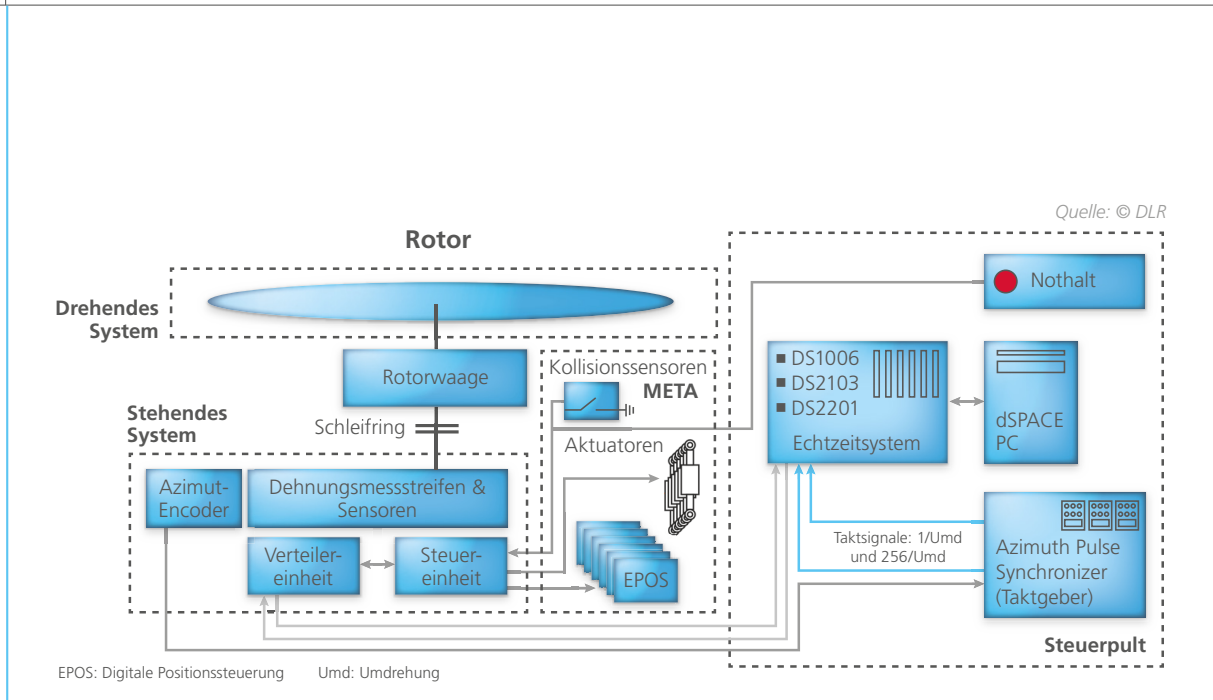
### Entwicklung des Reglermodells

Zunächst wurde die gesamte Systemkinematik in MATLAB®/Simulink® modelliert, um daraus echtzeitfähige Steuerungsgesetze abzuleiten. Die Berechnung der für einen gewünschten Steuerfall

&gt;&gt;

„Mit dem leistungsfähigen dSPACE Echtzeitsystem konnten wir die Algorithmen unserer aktiven Rotorsteuerung ausgiebig testen und die Funktion unseres Mehrfachtaumelscheiben-Konzepts erfolgreich nachweisen.“

Philip Küfmann, DLR



Signalflussplan des Versuchsaufbaus.

nötigen Aktuatorbewegungen erfolgt dabei mittels sogenannter Steuermatrizen (mit zum Teil mehr als 50 Spalten) die für jede der beiden Taumelscheiben einzelne Blattanstellwinkel sowie Verkopplungsterme in entsprechende Steuersignale für die Aktuator umrechnet. Die anschließende Regelung der Aktuatoren besteht aus einem PID-Regler mit einer Feed-Forward-Schleife, einer sogenannten Vorsteuerung. Da diese Vorsteuerung eine komplette harmonische Signalanalyse sowie einen digitalen Tiefpassfilter achter Ordnung enthält, ist die gleichzeitige Berechnung eines Regelungssignals für sechs Aktuatoren ebenfalls sehr aufwendig. Nach-

dem sowohl ein Aktuatormodell als auch die Steuerung und Regelung in Simulink modelliert und validiert waren, galt es, dieses System für die Steuerung der Versuchshardware echtzeitfähig umzusetzen.

#### Aufbau einer echtzeitfähigen Steuerung

Um die Steuerung und Regelung der Mehrfachtaumelscheibe umzusetzen, kam ein dSPACE System aus einem DS1006 Processor Board mit Quad-Core, einem DS2103 D/A Board und einem DS2201 Multi-I/O Board zum Einsatz. Zusätzlich wurde ein Ethernet-Modul verbaut, um während der Ver-

suche mit Messrechnern und Daten-servern kommunizieren und Werte abfragen zu können. Die in Simulink modellierte Steuerung und Regelung wurde auf mehrere Prozessorkerne verteilt: jeweils einer für Steuerung und Regelung sowie für sonstige Aufgaben wie die Netzwerkkommunikation etc. Anschließend wurde die Steuerung und Regelung mit Real-Time Workshop™ kompiliert und auf dem dSPACE System zum Laufen gebracht. Das Programm wird dabei über die Signale des Winkel-Encoder von einem Hardware-Interrupt getriggert und damit synchron zur restlichen Steuer- und Messhardware ausgeführt. Die hohen

Der Versuchsaufbau im Windkanal.



„Alle für den Betrieb der Mehrfachtaumelscheibe notwendigen Steuerungs- und Regelungsaufgaben führen wir effizient und komfortabel mit dSPACE ControlDesk durch.“

*Philip Küfmann, DLR*



Quelle: © DLR

*Bedien- und Überwachungssysteme für den Windkanalversuch, mit zwei ControlDesk-Oberflächen rechts im Bild.*

Anforderungen an den Taktzyklus von unter 250  $\mu$ s pro Steuerungs- bzw. Regelungsschritt sowie an die gewünschte Regelungsgenauigkeit konnten erfüllt werden. Mithilfe von ControlDesk® Next Generation und einer darin erstellten Benutzeroberfläche ist während des Betriebes der Zugriff auf alle wichtigen Parameter wie Reglerverstärkungen, Vorsteuerparameter, Steuerfrequenzen, Amplituden etc. möglich und alle gewünschten Einstellungen am Modell können vorgenommen werden.

#### **Fazit und weiteres Vorgehen**

Das Projekt VAR-META konnte mit der Erprobung und dem Nachweis der IBC-Fähigkeit des Systems am DLR-Standort Braunschweig erfolgreich abgeschlossen werden. Nach einer Überholung und Weiterentwicklung der Hard- und Software absolvierte die Mehrfachtaumelscheibe im September 2015 im Niedriggeschwindigkeitswindkanal der Deutsch-Niederländischen Windkanäle (DNW) ihren ersten Windkanaltest. Ziel des insgesamt 9-tägigen Windkanalversuchs im Rahmen des Luftfahrt-Forschungsprojektes FTK-META (Fortschrittliche Taumelscheibenkonzepte) war der Nachweis des Einflusses aktiver Rotorsteuerung auf Lärm, Vibrationen

und Leistung sowie der erste Funktionsnachweis der Mehrfachtaumelscheibe unter verschiedenen simulierten Flugbedingungen. Durch die aktive Rotorsteuerung mittels META ließen sich dabei Lärmreduktionen von bis zu 5 dB und Vibrationsreduktionen von bis zu 90 % in einzelnen Komponenten nachweisen. Darüber hinaus wurden im schnellen Vorwärtsflug Leistungseinsparungen von bis zu 4 % gemessen. Das System aus Aktuatorik und dSPACE Echtzeitsystem funktionierte während des gesamten Versuches einwandfrei. Im Folgeprojekt SKAT (Skalierbarkeit und Risikominimierung bei innovativer Technologie) wird die Mehrfachtaumelscheibe zur Erforschung aktiver Rotorsteuerungskonzepte an einem neu gefertigten Fünfblatt-Rotorsystem zum Einsatz kommen. Dabei soll auch ein für ein dSPACE System entwickelter Regler erprobt werden, der unerwünschte Vibrationen am Modell erkennt und automatisch durch entsprechende Einstellungen an den Taumelscheiben ausgleicht. ■

Das Video zeigt META im Windkanal:

*Philip Küfmann, DLR*

*Das Video zeigt META im Windkanal:  
[www.dspace.com/go/dMag\\_20161\\_META\\_D](http://www.dspace.com/go/dMag_20161_META_D)*



*Die Mehrfachtaumelscheibe ist eine Erfindung von Prof. Dr. Berend van der Wall und Hr. Rainer Bartels vom DLR-Institut für Flugsystemtechnik und wurde 2008 patentiert (Pat.-Nr.: DE-10-2006-030-089-D)*

*Philip Küfmann*

*Philip Küfmann ist zuständig für Modelle und Software zur Ansteuerung der Mehrfachtaumelscheibe beim DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), Institut für Flugsystemtechnik in Braunschweig, Deutschland.*