

---

# Flugphysik der Tragschrauber

---

Holger Duda • Jörg Seewald

# Flugphysik der Tragschrauber

Verstehen und berechnen

Holger Duda  
Institut für Flugsystemtechnik  
DLR, Braunschweig  
Deutschland

Jörg Seewald  
Institut für Flugsystemtechnik  
DLR, Braunschweig  
Deutschland

ISBN 978-3-662-52833-4      ISBN 978-3-662-52834-1 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-52834-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Umschlagsabbildung und Graphiken Hajo König (König und König Kommunikation GbR, <http://www.koenig-koenig.de/>)

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

# Vorwort

Was schreibt man überhaupt in ein Vorwort?

So ganz genau wissen wir das auch nicht, aber da man ja ein Vorwort braucht, fangen wir einfach mal an. Auf die gleiche Weise ist schließlich auch dieses Buch entstanden. Wir haben einfach mal angefangen. „Die kleine Tragschrauberkunde“ wollten wir eigentlich schreiben und dachten, wir würden in drei Tagen damit fertig sein. Aus den drei Tagen wurden dann aber doch drei Monate, aus den drei Monaten drei Jahre. Drei kurzweilige Jahre, in denen wir unsere Begeisterung für den Tragschrauber voll ausleben konnten. Drei Jahre mit vielen theoretischen Überlegungen, praktischen Experimenten und Flugtests mit dem Tragschrauber. Immer neue Erkenntnisse und lange Diskussionen über die Art, wie wir das Ganze zu Papier bringen wollen, haben dann zu dieser „leichten“ zeitlichen Verzögerung geführt. An dieser Stelle bedanken wir uns beim Springer Verlag, der uns einen festen Abgabetermin vorgab. Ansonsten würden wir sicher heute noch diskutieren.

Aber wie kam es überhaupt dazu?

Wir waren schon immer von dem relativ einfachen Prinzip und den Flugeigenschaften des Tragschraubers fasziniert. Als Wissenschaftler nahmen wir uns vor, Praxiserfahrung und theoretisches Wissen in möglichst verständlicher Form zu Papier zu bringen. Wir haben angefangen, unsere Zettelwirtschaft zu sortieren und immer mehr Gefallen am Schreiben gefunden. Dieser Prozess mit vielen „Aha-Effekten“ hat bei uns beiden die Faszination am Tragschrauber weiter gesteigert. Ähnliches hoffen wir auch beim Leser zu erreichen.

Was erwartet den Leser?

Wir haben in diesem Fachbuch unsere Überlegungen zur „Flugphysik der Tragschrauber“ in leicht verdauliche Stücke zerlegt. Zahlreiche Beispiele und Zahlenwerte aus der Praxis sollen dem Leser den Zugang zu dem Thema vereinfachen und ein „Gefühl für die Sache“ vermitteln. Es ist klar, dass Zahlenwerte immer eine gewisse Unschärfe mit sich bringen, in dem Sinne „... Neigt sich der Rotor im Schnellflug nun um drei oder um vier Grad nach hinten...“. Wir haben uns jedoch dafür entschieden, nicht nur trockene Formeln niederzuschreiben, sondern greifbare Werte zu bringen, wo immer es geht. Damit wollen wir dem Leser den Weg von der Theorie in die Realität bereiten.

Nicht zuletzt soll das Buch Spaß beim Lesen machen und Neugierde an diesem faszinierenden Fluggerät wecken. Wir meinen, der Tragschrauber hat diese Aufmerksamkeit verdient.

*Die Autoren (in 2.000 Fuß irgendwo zwischen Braunschweig und Bremen)*

---

## Abkürzungen

Braucht eigentlich keiner ...

CG	Schwerpunkt des Tragschraubers (Center of Gravity)
CG <sub>Bl</sub>	Rotorblattschwerpunkt (Center of Gravity Blade)
CG <sub>R</sub>	Rotorschwerpunkt (Center of Gravity Rotor)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
PPB	Rotornickachse: Gelenk, um das der Rotorkopf gegenüber dem Rumpf geneigt werden kann (Pitch Pivot Bolt)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PIO	Pilot Induced Oscillations
TB	Schlaggelenk (Teeter Bolt)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	1
Literatur.....	4
<b>2 Der Rotor im senkrechten Sinkflug</b> .....	5
2.1 Strömungsverhältnisse an den Rotorblättern .....	7
2.1.1 Blattsegmente.....	9
2.1.2 Durchströmgeschwindigkeit .....	11
2.1.3 Durchströmwinkel und Blattstellwinkel .....	12
2.2 Luftkräfte an den Rotorblättern.....	14
2.2.1 Auftrieb und Widerstand.....	14
2.2.2 Profilpolare.....	16
2.3 Rotation ohne Antrieb .....	20
2.3.1 Luftkraftneigung am Rotorblatt .....	21
2.3.2 Rotordrehmoment .....	26
2.4 Induzierte Abwindgeschwindigkeit .....	28
2.4.1 Rotor als Windrad.....	29
2.4.2 Zurück zum Tragschrauber.....	32
2.5 Analytische Formeln .....	35
2.5.1 Zusammenhang zwischen Durchströmgeschwindigkeit und Rotordrehzahl.....	35
2.5.2 Zusammenhang zwischen Rotorkraft und Rotordrehzahl.....	37
2.5.3 Zusammenhang zwischen Rotorkraft und Sinkgeschwindigkeit.....	37
2.5.4 Antreibende und bremsende Bereiche .....	38
2.6 Zusammenfassung.....	39
Literatur.....	39
<b>3 Der Rotor im Vorwärtsflug</b> .....	41
3.1 Strömungsverhältnisse an den Rotorblättern .....	42
3.1.1 Überlagerung von Dreh- und Vorwärtsbewegung.....	42
3.1.2 Schlagbewegung .....	45

3.2	Luftkräfte an den Rotorblättern.....	53
3.2.1	Variable Rotorkraft .....	54
3.2.2	Auftriebsasymmetrie.....	57
3.2.3	Schlagmoment aufgrund der Luftkräfte.....	58
3.3	Rotation ohne Antrieb .....	60
3.3.1	Luftkraftneigung am Rotorblatt .....	60
3.3.2	Luftkraft parallel zur Rotordrehebene .....	62
3.4	Induzierte Abwindgeschwindigkeit .....	64
3.4.1	Rotor als Tragflügel .....	64
3.4.2	Einfluss der Fluggeschwindigkeit.....	66
3.5	Analytische Formeln .....	67
3.5.1	Fortschrittsgrad .....	67
3.5.2	Zusammenhang zwischen Rotordrehzahl und Fluggeschwindigkeit.....	68
3.5.3	Zusammenhang zwischen Schlagwinkel und Fluggeschwindigkeit.....	70
3.5.4	Zusammenhang zwischen Rotoranstellwinkel und Fluggeschwindigkeit.....	71
3.5.5	Zusammenhang zwischen Rotorkraftschwankung und Fluggeschwindigkeit.....	73
3.6	Rotorwiderstand.....	74
3.6.1	Rotorkraftneigung.....	74
3.6.2	Einfluss der Fluggeschwindigkeit.....	79
3.7	Zusammenfassung.....	80
	Literatur.....	81
<b>4</b>	<b>Der Rotor, etwas genauer betrachtet.....</b>	<b>83</b>
4.1	Weitere aerodynamische Effekte .....	84
4.1.1	Umströmung der Blattspitze .....	84
4.1.2	Zunahme der induzierten Abwindgeschwindigkeit nach außen .....	84
4.1.3	Reynoldszahleffekte.....	85
4.1.4	Machzahleffekte.....	86
4.2	Konuswinkel .....	89
4.2.1	Fliehkraft.....	89
4.2.2	Einfluss der Rotordrehzahl.....	91
4.3	Simulation der Autorotation.....	91
4.3.1	Senkrechter Sinkflug.....	93
4.3.2	Vorwärtsflug .....	95
4.3.3	Konuswinkel und Rotordrehzahl .....	102
4.4	Zusammenfassung.....	102
	Literatur.....	103



<b>5 Der Tragschrauber im Vorwärtsflug</b> .....	105
5.1 Widerstand .....	107
5.1.1 Kräfte am Tragschrauber .....	107
5.1.2 Badewannenkurve .....	112
5.2 Flugsteuerung .....	115
5.2.1 Kippkopfsteuerung .....	115
5.2.2 Neigung der Rotorkreisebene .....	119
5.3 Fluglage und Steuerwinkel .....	122
5.3.1 Sonderfall ohne Schuboffset und Höhenleitwerk .....	123
5.3.2 Einfluss des Schuboffsets .....	126
5.3.3 Einfluss des Höhenleitwerks .....	129
5.3.4 Einfluss der Beladung .....	134
5.4 Handkraft .....	135
5.4.1 Moment um die Rotornickachse .....	137
5.4.2 Einfluss der Fluggeschwindigkeit .....	142
5.4.3 Einfluss der Beladung .....	145
5.4.4 Steuereingaben .....	145
5.5 Flugstabilität .....	148
5.5.1 Statische und dynamische Stabilität .....	148
5.5.2 Einfluss des Höhenleitwerks .....	150
5.5.3 Einfluss des Schuboffsets .....	154
5.5.4 Einfluss des Rotorkopfes .....	156
5.5.5 Zusammenfassung der Einflussfaktoren .....	159
5.6 Zusammenfassung .....	160
Literatur .....	161
<b>6 Der Rotor, dynamisch betrachtet</b> .....	163
6.1 Am Anfang war die Kraft .....	164
6.1.1 Bewegungsgleichungen .....	164
6.1.2 Federmasseschwinger .....	166
6.2 Dynamik der Schlagbewegung .....	169
6.2.1 Rotor im Weltall .....	169
6.2.2 Zurück auf der Erde .....	175
6.3 Dynamik der Rotation .....	176
6.3.1 Übergangsvorgang .....	177
6.3.2 Simulation einer Drehzahländerung .....	179
6.4 Simulation eines Startvorgangs .....	184
6.4.1 Rotordrehzahl .....	188
6.4.2 Geschwindigkeit .....	189
6.4.3 Schlagwinkel .....	189
6.4.4 Konuswinkel .....	190
6.4.5 Startrollstrecke .....	191
6.4.6 Bladeflapping .....	192

6.5 Laufruhe .....	194
6.5.1 Coriolismoment.....	194
6.5.2 Rotorschwerpunkt und Rotordrehachse .....	198
6.6 Kreiseffekte .....	202
6.6.1 Präzession .....	202
6.6.2 Resistenz gegenüber Lageänderungen.....	203
6.7 Zusammenfassung.....	205
Literatur.....	206
<b>7 Das war's.....</b>	<b>207</b>
<b>8 Formelzeichen.....</b>	<b>209</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>215</b>
9.1 Referenzdaten.....	215
9.1.1 Referenzrotor .....	216
9.1.2 Referenztragschrauber .....	217
9.1.3 Aerodynamik.....	223
9.1.4 Messdaten MTOsport.....	225
9.1.5 Normatmosphäre.....	227
9.2 Herleitung der analytischen Formeln.....	228
9.2.1 Induzierte Abwindgeschwindigkeit .....	228
9.2.2 Senkrechter Sinkflug bei Autorotation im Gleichgewicht .....	230
9.2.3 Vorwärtsflug bei Autorotation im Gleichgewicht.....	233
9.2.4 Senkrechter Sinkflug für Übergangsvorgänge .....	237
Literatur.....	238
<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>239</b>