

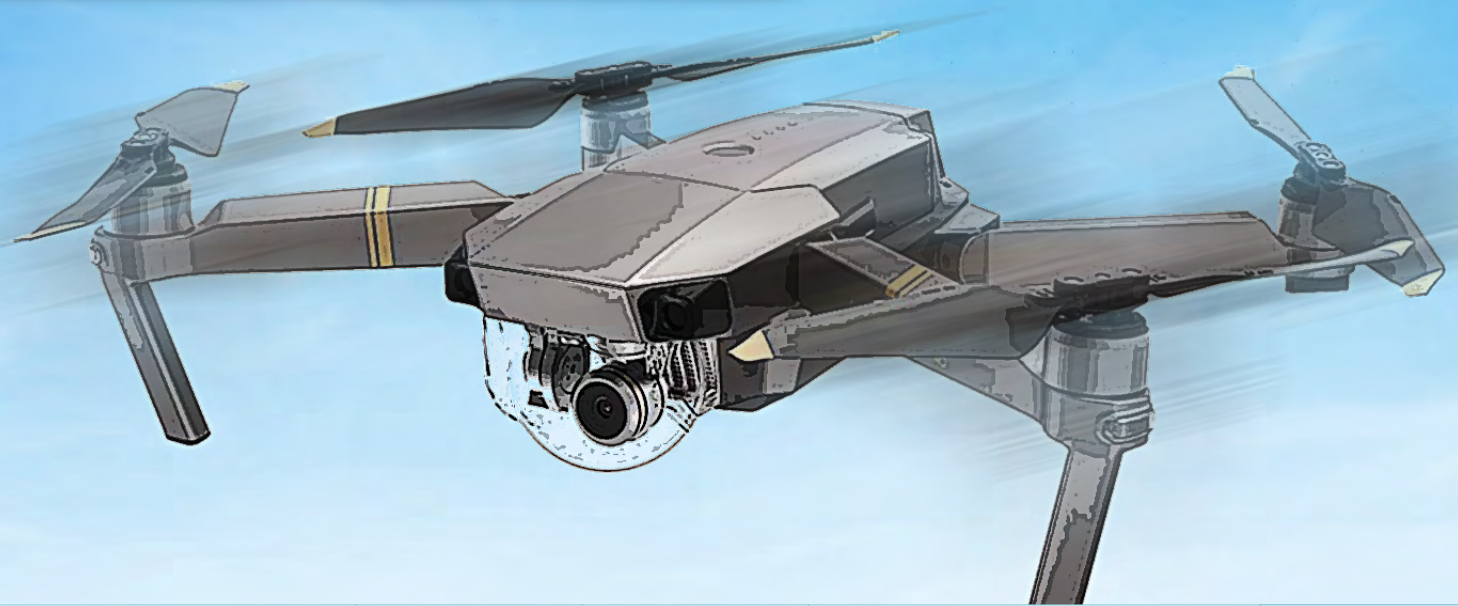
JUNGE

wissenschaft

JungforscherInnen publizieren
online | *peer reviewed* | original



Verlag:
Physikalisch-
Technische
Bundesanstalt



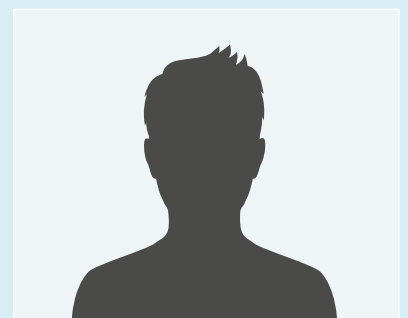
Technik

Mit Schwung nach oben

Entwicklung und Fertigung eines Rotorblattes
mit optimierter Aerodynamik zum Antrieb eines
Quadrocopters

Quadrocopter spielen hinsichtlich neuer Mobilitätskonzepte eine zunehmend bedeutsame Rolle. Basierend auf der Propellertheorie nach Betz und Schmitz wurde ein neuartiger Quadrocopter-Rotor entwickelt und mittels 3D-Druckverfahren gefertigt. Dieser wird im Hinblick auf das aerodynamische Leistungsvermögen mit den industriell hergestellten Rotoren des Quadrocopter-Herstellers DJI verglichen.

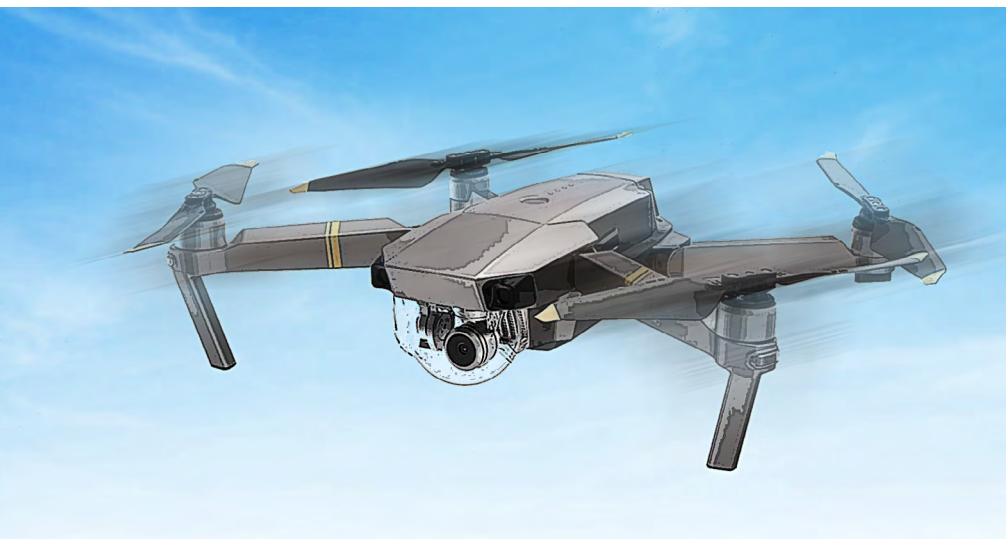
DER JUNGFORSCHER



Max Schaldach (2002)
Freies Gymnasium Zürich

Eingang der Arbeit:
9.9.2020

Arbeit angenommen:
15.10.2020



Mit Schwung nach oben

Entwicklung und Fertigung eines Rotorblattes mit optimierter Aerodynamik zum Antrieb eines Quadrocopters

1. Einleitung

Nachhaltige Mobilitätskonzepte spielen in der aktuellen gesellschaftlichen Entwicklung eine zunehmend bedeutsame Rolle. Als Transportmittel kommt den Quadrocoptern, deren Weiterentwicklung und Optimierung entlang vieler Dimensionen vorangetrieben wird, dabei eine besondere Rolle zu.

Auch an meiner Heimatstadt Zürich geht diese Entwicklung nicht spurlos vorbei. Seit 2019 testet die Schweizer Post zusammen mit dem Zürcher Universitäts-Spital im Rahmen eines Pilotprojektes autonome Transportmöglichkeiten. Quadrocopter werden jedoch nicht ausschließlich im Transportwesen verwendet. Geologen nutzen sie zur Landschaftsmodellierung, und die Versicherungsbranche setzt sie zur Scha-

densüberprüfung ein. Auch aus der Fotografie und der Landwirtschaft sind Quadrocopter nicht mehr wegzudenken, wo sie beispielsweise zur Schädlingsbekämpfung herangezogen werden [2].

Zum ersten Mal beschäftigte ich mich 2017 intensiv mit Quadrocoptern, als ich mit der Mavic Pro vom chinesischen Unternehmen Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd (kurz DJI) einen Hobby-Quadrocopter erhielt. Im Oktober desselben Jahres absolvierte ich ein Praktikum in der Biofluidmechanik-Abteilung des Instituts für ImplantatTechnologie und Biomaterialien e.V., in dem ich mich unter anderem mit der Aerodynamik von Tragflächen befasst habe. Mit meiner Mavic

Pro im Gepäck entstand so die Idee, einen eigenen flugfähigen Rotor für meinen Quadrocopter zu entwickeln und ihn als Prototypen umzusetzen. Dieser gilt als flugfähig, wenn er genug Auftrieb erzeugt, um den Quadrocopter im Schwebeflug halten zu können. Im Fokus des Projektes stand die Untersuchung von aerodynamischen Eigenschaften. Der Einfluss weiterer Eigenschaften, wie bspw. des Werkstoffs, war nicht Schwerpunkt der Arbeit.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Aufbau eines Rotors

Ein Rotor ist ein rotierender Tragflügel. Im Anwendungsgebiet der Quadrocopter besteht er meist aus zwei Rotorblättern. Diese sind über die sog. Blattwurzel – dem äußeren Rand des Rotorblattes – an einer Nabe befestigt, um die sie sich drehen. Als Länge eines Rotorblattes wird die Strecke von der Nabe zur Blattspitze, also der halbe Rotordurchmesser definiert. Als Profiltiefe wird die „Breite“ des Rotorblattes bezeichnet (siehe Abb. 1).

Das Grundgerüst eines Rotorblattes bilden sogenannte Profile: Darunter werden Querschnitte durch einen Rotor verstanden (siehe Abb. 2). Geometrisch beschreiben lassen sie sich anhand von Koordinaten in der xy -Ebene; diese werden zur späteren Berechnung und Auslegung des Rotors genutzt. Je nachdem, wofür Rotoren eingesetzt werden, besitzen ihre Profile unterschiedliche Formen. Die Berechnung der genauen relativen Profildicke wird mit Verfahren wie der Kutta-Schukowski-Transformation [1] vorgenommen.

2.2 Dynamischer Auftrieb

Bei der Umströmung eines Rotors wirken im Wesentlichen zwei Kräfte auf ihn ein. Einerseits ist dies der dynamische Auftrieb, dessen Auftreten durch die Bernoulli-Gleichung [3] beschrieben wird. Formt man diese um, erfolgt aus einer Geschwindigkeitsänderung Δu

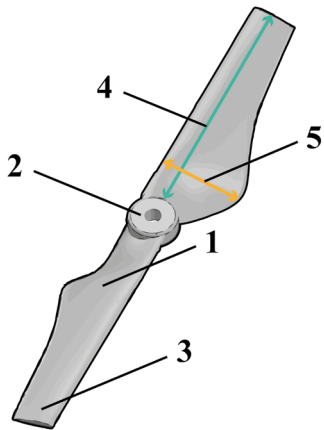


Abb. 1: Aufbau eines Rotors
1. Blattwurzel 2. Nabe 3. Blattspitze
4. Blattlänge 5. Blatttiefe

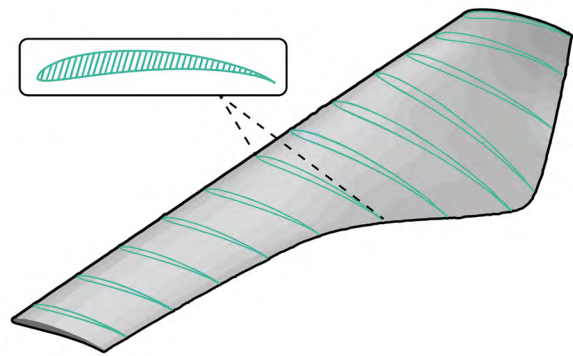


Abb. 2: Visualisierung des Profilskeletts eines Rotorblattes

eine Druckänderung Δp . Bereiche mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten besitzen einen geringeren Luftdruck als Bereiche mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Durch die ungleichen Geschwindigkeiten auf der Rotorober- und -unterseite, kommt es zur Ausbildung eines Unterdruckgebietes auf der Oberseite und eines Überdruckgebietes auf der Unterseite des Rotors (siehe Abb. 3). Aus diesem Druckunterschied resultiert der dynamische, respektive der aerodynamische Auftrieb.

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c_A \cdot A \quad (1)$$

Neben der Luftdichte ρ und der effektiven Anströmgeschwindigkeit w , fließen der Auftriebsbeiwert c_A und die auftriebswirksame Fläche A in die Auftriebsgleichung mit ein. Ein idealer Rotor weist eine homogene Verteilung der Auftriebskraft auf [4]. Aufgrund der effektiven Anströmgeschwindigkeit w , die von der Blattwurzel zur Blattspitze hin größer wird, ist die Verteilung allerdings ungleichmäßig. Durch den quadratischen Einfluss der effektiven Anströmgeschwindigkeit auf die Auftriebskraft (siehe Gleichung 1) können an der Blattspitze enorme Auftriebskräfte induziert werden. In Richtung der Blattwurzel nimmt die Auftriebskraft exponentiell ab, bis sie an der Nabe einen Wert von $F_A = 0 \text{ N}$ erreicht. Diese inhomogene Verteilung der Auftriebs-

kraft führt zu aerodynamischen Nachteilen [4]. Durch eine Variation der Profile und damit des Auftriebsbeiwertes c_A sowie der Anpassung der auftriebswirksamen Fläche A , kann eine Annä-

herung an eine gleichmäßige Verteilung der Auftriebskraft erreicht werden. Auf diesem Grundgedanken basiert die Modifikation des Rotors in dieser Arbeit.

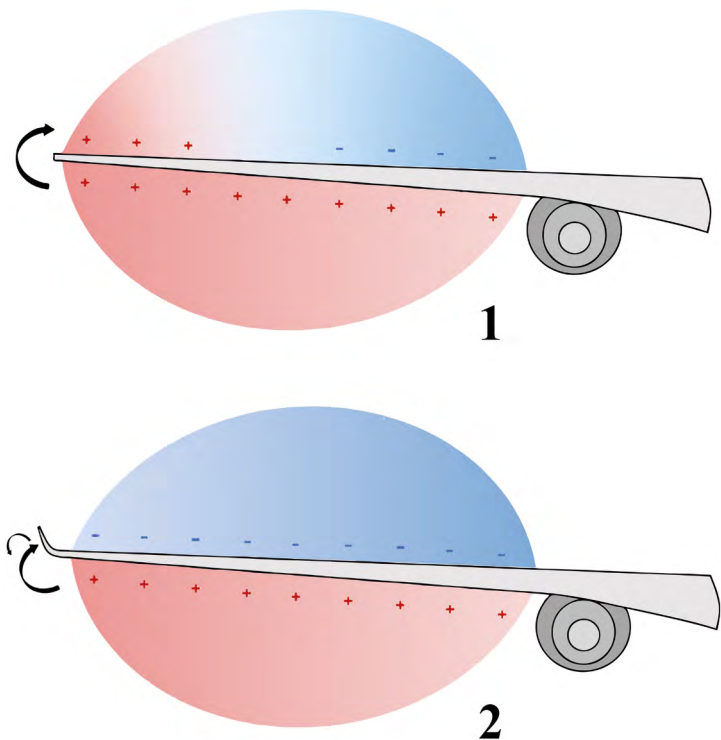


Abb. 3: 1. Auswirkungen der Querströmungen auf die zwei unterschiedlichen Druckgebiete 2. Verhinderung der Querströmungen durch die Verwendung von Winglets. Für beide Teilbilder gilt: des Unterdruckgebiet ist blau und das Überdruckgebiet ist rot.

2.3 Strömungswiderstand

Bewegt sich ein Rotor durch ein Fluid, prallen kontinuierlich Gasmoleküle auf ihn. Diese Krafteinwirkung wird als aktiver Luftwiderstand bezeichnet [5]. Je grösser die Stirnfläche des Rotors ist, desto stärker ist er.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c_w \cdot A \quad (2)$$

Wie auch die Auftriebskraft ist die Luftwiderstandskraft abhängig von der Luftdichte ρ und der effektiven Anströmgeschwindigkeit w . Sie steht zudem in Abhängigkeit zur Querschnittsfläche A und zum Widerstandsbeiwert c_w .

Zusätzlich zum aktiven Luftwiderstand ruft die Bewegung des Rotors den induzierten Luftwiderstand hervor [6]. Durch die unterschiedlichen Strömungsgebiete auf der Ober- und Unterseite des Rotors versucht die Luft die Blattspitze zu umströmen. Diese Luftströme werden als Querströmungen bezeichnet. Da sich der Rotor bei der seitlichen Umströmung gleichzeitig nach

vorne bewegt, wird ein Teil nach oben strömender Luft mitgerissen, und es bilden sich Randwirbel aus, die den Rotor ausbremsen. Durch den Anbau von Winglets bleibt das Druckgefälle stärker erhalten, was in eine höhere Auftriebskraft resultiert ($\Delta p \propto F_A$) und es kommt nur noch abgeschwächt zur Ausbildung der Randwirbel, wodurch weniger induzierter Widerstand hervorgerufen wird (siehe Abb. 3).

3. Auslegung des Rotors

Die Propellertheorie nach Betz und Schmitz [4] diente als theoretische Grundlage für die Auslegung der Rotoren. Sie beinhaltet Gleichungen und Berechnungsvorschriften, die es ermöglichen, Propeller anhand von aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten auszulegen. Heutzutage kommt sie hauptsächlich bei der Auslegung von Windrädern zur Anwendung.

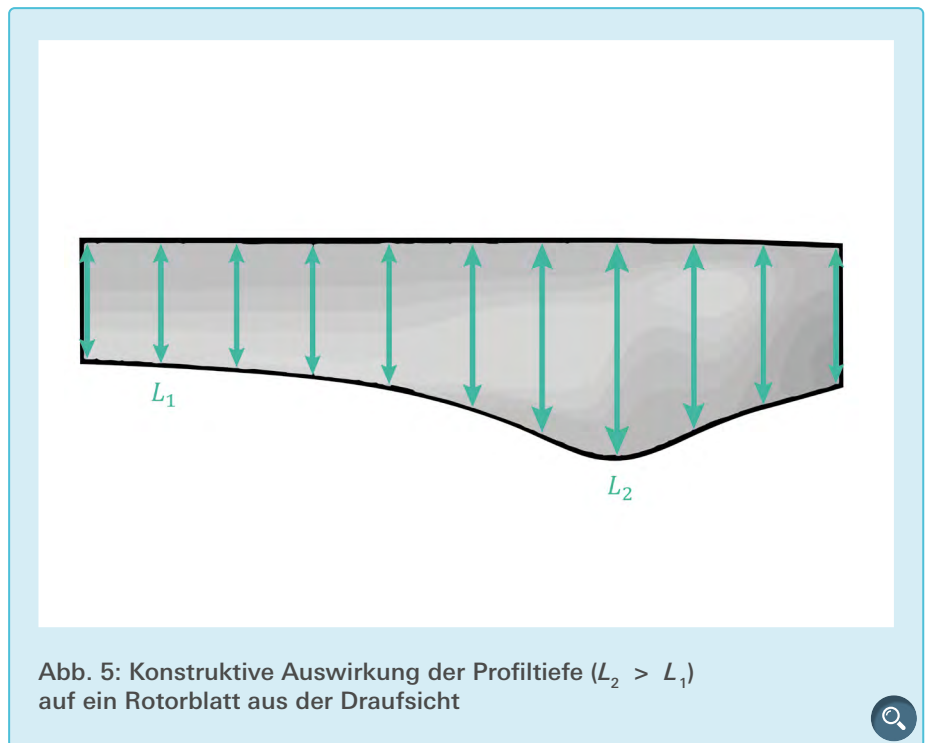
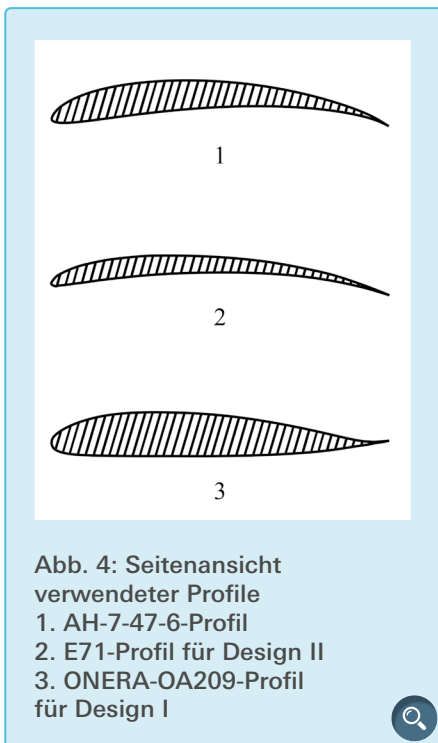
3.1 Profilwahl

Der erste Schritt der Auslegung bestand in der Wahl der Profile. Die öffentlich zugängliche Datenbank *Airfoil Tools* [8] verfügt über eine Datenbasis von insgesamt 1.636 Profilen mitsamt ihren aerodynamischen Kennwerten. Von besonderem Interesse sind der Auftriebsbeiwert c_A und der Widerstandsbeiwert c_w . Sie sind charakteristische Kenngrößen zur Beschreibung des Auftriebs- und Widerstandsverhaltens eines Profils. Je größer der Auftriebsbeiwert eines Profils ist, desto mehr Auftrieb erzeugt der Rotor. Im Umkehrschluss gilt: Je kleiner der Widerstandsbeiwert, desto weniger aktiver Widerstand wird am Rotor hervorgerufen. Es ist daher von Interesse, Profile mit hohen Auftriebsbeiwerten und niedrigen Widerstandsbeiwerten zu verbauen (siehe Tab. 1).

Im Zuge der Auslegung des ersten Prototyps (Design I) wurde das ONE-RA-OA209-Profil (siehe Abb. 4) ausgewählt. Es kommt typischerweise bei

Tab. 1: Gegenüberstellung der Auftriebswerte verschiedener auf Airfoils.de enthaltenen Profile [8]

Auftriebsbeiwert c_A	$c_A > 1,5$	$1,2 < c_A < 1,5$	$c_A < 1,2$
Profilname: c_A	AH-7-47-6: 1,6	AH-6-40-7:1,5	BL145:1,1
	E61: 1,6	E385 :1,5	SD7090:1,1
	SG6043: 1,6	GOE 124 :1,5	AG13:1,0
	cp-160-050-gn: 1,6	AH 79-100 A :1,4	HQ 1.0/10:0,9
	AH 79-100 B : 1,6	BE50:1,3	NACA 5-H-10:1,0
	FX 63-120:1,6	E71:1,3	NACA 63-210:1,0



mantragenden Helikoptern zur Anwendung, deren Rotoren eine ähnliche Anströmung aufweisen wie die Rotoren eines Quadropters. Aufgrund fehlender Versuchsergebnisse wurde vereinfacht angenommen, dass sich das Profil ebenfalls für den Einsatz bei der Mavic Pro eignen würde. Mit einem Auftriebsbeiwert von $c_A = 0,7$ fällt dieser beim ONERA-OA209-Profil in den mittleren Bereich [8]. Der Widerstandsbeiwert fällt mit $c_w = 0,03$ verhältnismäßig gering aus [8].

Um eine gleichmäßigere Verteilung der Auftriebskraft zu erreichen als bei Design I, wurden bei Design II zwei Profile verbaut (siehe Abb. 4). Grundsätzlich werden an der Blattwurzel auftriebsstarke Profile eingesetzt. Die Profile in Richtung der Blattspitze besitzen abnehmende Auftriebsbeiwerte. Für den Bereich der Blattwurzel wurde das AH-7-47-6-Profil ausgewählt, das einen c_A -Wert von 1,6 und einen c_w -Wert von 0,06 besitzt [8]. Vorangegangene Berechnungen ergaben, dass die Auftriebsbeiwerte der zwei Profile mindestens eine Differenz von 0,3 aufweisen müssen, um sich einer gleichmäßigen Verteilung der Auftriebskraft anzunähern. Das Verwenden von Profilen mit

geringeren Auftriebsbeiwerten führt zwar zu einer homogeneren Auftriebsverteilung, der Rotor erzeugt jedoch weniger Auftrieb. Für den Bereich der Blattspitze erschien daher das E71-Profil mit einem c_A -Wert von 1,3 und einem c_w -Wert von 0,07 besonders geeignet (siehe Tab. 1). [8].

Bei einer Gesamtlänge des Rotors von 10,5 cm setzt sich dessen Grundgerüst aus elf Stützstellen zusammen, für die jeweils ein entsprechendes Profil skaliert wurde. Mit Ausnahme des letzten Profils folgen diese einander in regelmäßigen Abständen von einem Zentimeter.

Die Reynoldszahl R_e ist eine dimensionslose Kennzahl, die beschreibt, ob eine Strömung laminar oder turbulent verläuft und wird anhand von Gleichung (3) bestimmt.

$$R_e = \frac{L \cdot w}{\nu} \quad (3)$$

Sie ist abhängig von der Profiltiefe L , der effektiven Anströmgeschwindigkeit w und der kinematischen Viskosität ν . Letztere ist eine temperaturabhängige Konstante, die die Zähigkeit eines Fluids beschreibt. Unter Normalbedin-

gungen beträgt ihr Wert $15,2 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$. Für die Blattspitze ergab sich eine Reynoldszahl $R_e = 38.600$ und für die Blattwurzel $R_e = 6.400$. Der Turbulenzgrad der Strömung an der Blattspitze ist somit vermutlich größer als an der Blattwurzel. Je nach Reynoldszahl variieren die aerodynamischen Beiwerte eines Profils. Da auf *Airfoil Tools* lediglich Profilbeiwerte für Reynoldszahlen von $R_e > 50.000$ zur Verfügung standen, musste für die Auslegung des Rotors auf diese Beiwerte zurückgegriffen werden.

3.2 Modifikation der Profile

Auf die Profilwahl folgte die Modifikation der Profilkoordinaten mit zwei Parametern. Die Profiltiefe wurde eingesetzt, um die Auftriebskraft des Rotorblattes homogener zu verteilen. Dazu werden Profile an der Nabe stärker gestreckt als an der Blattspitze. Der Konstruktionswinkel wird dazu verwendet, um die Profile – je nach ihrer Entfernung zur Nabe – parallel zur Anströmung auszurichten [4]. Profile an der Blattwurzel werden stärker angewinkelt als an der Blattspitze.

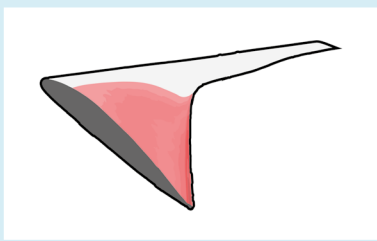


Abb. 6: Darstellung eines idealen Rotors. Hingewiesen wird auf die technisch nicht zu realisierenden hohen Profiltiefen im Bereich der Blattwurzel (rot eingefärbt)

3.2.1 Profiltiefe

Die Profiltiefe L ist ein Teilwert der auftriebswirksamen Fläche A und beschreibt die Breite eines Profils (siehe Abb. 5). Sie fließt in die Gleichung der Auftriebskraft mit ein.

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c_A \cdot L \cdot B \quad (4)$$

Die Dichte der Luft ρ , der Auftriebsbeiwert c_A und die Konstante B sind bekannt. Die effektive Anströmgeschwindigkeit w setzt sich aus zwei Teilgeschwindigkeiten zusammen: Der vertikalen Ansauggeschwindigkeit v_D und der horizontalen Umfangsgeschwindigkeit u_r . Mit Hilfe von Anemometern und Gleichungen der Propellertheorie nach Betz und Schmitz können diese bestimmt werden. Anders als v_D , welche

die Geschwindigkeit der Luft beschreibt und mit Hilfe eines Anemometers bestimmt wurde, handelt es sich bei u_r um die Geschwindigkeit des Rotors durch die Luft, welche entsprechend der Drehbewegung des Rotors an jedem Punkt des Rotorblattes unterschiedlich groß ist. Da die Umfangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zum Radius steht, wird sie mit zunehmender Entfernung zur Blattwurzel größer. Für jedes Profil ergibt sich dadurch eine unterschiedliche effektive Anströmgeschwindigkeit.

$$u_r = r \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (5)$$

Um den Richtwert der Auftriebskraft zu berechnen, wurde für die Blattspitze eine Profiltiefe von 1,5 cm festgelegt. Vermessungen hatten ergeben, dass ein Rotor bis zu einer Blattspitzentiefe von 1,5 cm auf die Vorrichtungen der Mavic Pro passt. Für den äußersten Bereich des Rotors ergab sich damit eine Auftriebskraft von 0,133 N. Zur Berechnung der Profiltiefen für die einzelnen Profile wird die Gleichung der Auftriebskraft umgestellt.

$$L = \frac{2 \cdot F_A}{\rho \cdot w^2 \cdot c_A \cdot B} \quad (6)$$

Für jeden Bereich auf dem Rotor ergab die Gleichung unterschiedliche Profiltiefen. Aufgrund des quadratischen Einflusses der effektiven Anströmgeschwindigkeit fielen die Profiltiefen an

der Blattwurzel so groß aus, dass sie technisch nicht zu realisieren wären. Bei einem idealen Rotor ist ein Profil an der Blattwurzel 250-mal so tief, wie an der Blattspitze. Auf Abb. 6 ist dieser extreme Tiefenunterschied von Blattspitze zu Blattwurzel gut sichtbar.

Es mussten daher konstruktive Abweichungen vom idealen Rotorblatt vorgenommen werden, wodurch lediglich eine Annäherung an eine gleichmäßige Verteilung der Auftriebskraft möglich war. Um diese Abweichungen nicht willkürlich vorzunehmen, dienten bestehende Quadrocopter-Rotoren als Vorlagen. Wie auch bei der Profilwahl, konnte für Design II in Bezug auf die Profiltiefe abermals aus den Erkenntnissen von Design I gelernt werden. Die Profile an der Blattwurzel wurden im Verhältnis zur Blattspitze stärker gestreckt als bei Design I (siehe Tab. 2 und Tab. 3).

Nach Abschluss der Berechnungen wurden die Profilkordinaten mit den erhaltenen Werten multipliziert.

$$x' = x \cdot L \quad (7)$$

$$y' = y \cdot L \quad (8)$$

Tab. 2: Erhaltene Profiltiefen für Design I

Profil	r in m	L in m	Profil	r in m	L in m
Blattwurzel (ONERA OA209)	0	0,02	Blattspitze (ONERA OA209)	0,06	0,02
	0,01	0,0165		0,07	0,0185
	0,02	0,025		0,08	0,0175
	0,03	0,03		0,09	0,0165
	0,04	0,027		0,1	0,0155
	0,05	0,0225		0,105	0,015

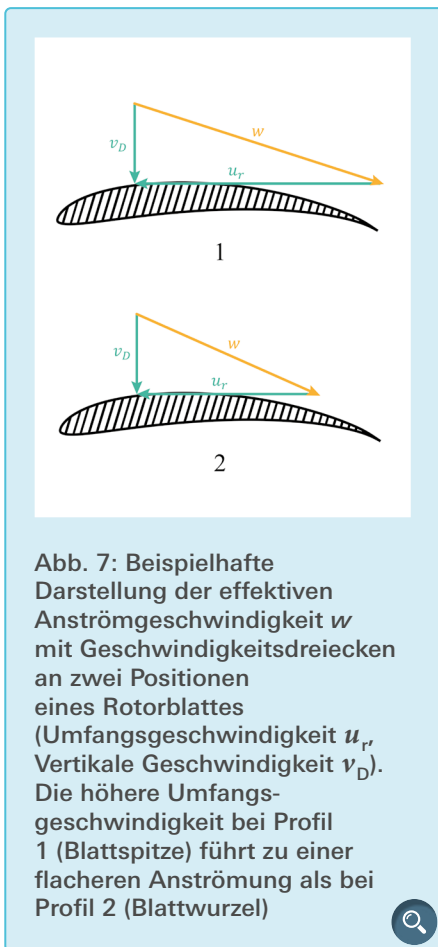


Abb. 7: Beispielhafte Darstellung der effektiven Anströmgeschwindigkeit w mit Geschwindigkeitsdreiecken an zwei Positionen eines Rotorblattes (Umfangsgeschwindigkeit u_r , Vertikale Geschwindigkeit v_D). Die höhere Umfangsgeschwindigkeit bei Profil 1 (Blattspitze) führt zu einer flacheren Anströmung als bei Profil 2 (Blattwurzel)

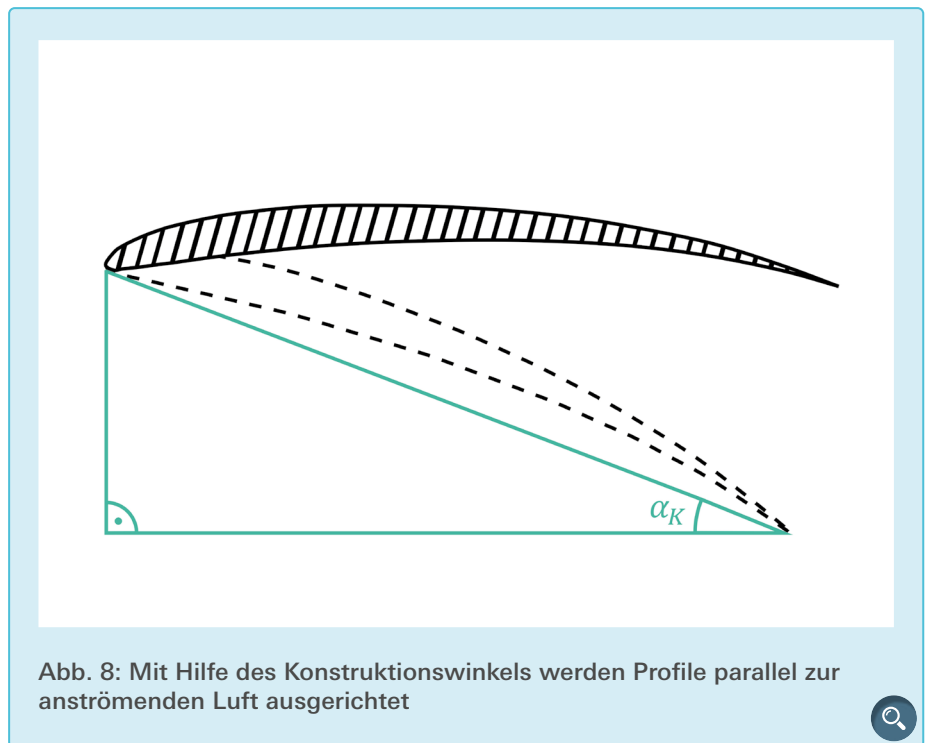


Abb. 8: Mit Hilfe des Konstruktionswinkels werden Profile parallel zur anströmenden Luft ausgerichtet

3.2.2 Konstruktionswinkel

Aus den ungleichen Umfangsgeschwindigkeiten resultieren unterschiedliche Anströmrichtungen für die einzelnen Stützstellen der Rotorblattes. An der Blattspitze werden die Profile aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkei-

ten beinahe horizontal angeströmt. Bei Profilen an der Blattwurzel trifft die Luft dagegen aus vertikaler Richtung auf den Rotor auf (siehe Abb. 7).

Ziel des Konstruktionswinkels α_K ist es, die Profile lokal, also in Abhängigkeit vom Vektor der effektiven Anströmgeschwindigkeit, parallel zur Anströmung auszurichten (siehe Abb. 8).

$$\alpha_K = \alpha_A + \alpha_E \quad (9)$$

Der Konstruktionswinkel setzt sich aus

dem Anstellwinkel α_A und dem Einstellwinkel α_E zusammen [4]. Die Auswahl des Anstellwinkels hängt über den Auftriebsbeiwert c_A direkt mit der Profilwahl zusammen. Das Verhältnis vom Auftriebsbeiwert zum Anstellwinkel ist für alle ähnlichen Profile auf dem Rotor gleich und kann aus Profil-Diagrammen (siehe Abb. 9) abgeleitet werden. Je größer der Wert des Anstellwinkels gewählt wird, desto höher fällt der Auftriebsbeiwert aus. Wird der Wert des Anstellwinkels allerdings zu hoch angesetzt, kann es zu einem Strömungsab-

Tab. 3: Erhaltene Profiltiefen für Design II

Profil	r in m	L in m	Profil	r in m	L in m
Blattwurzel (AH-7-47-6)	0	0,02	Blattspitze (E71)	0,06	0,019
	0,01	0,0215		0,07	0,0175
	0,02	0,026		0,08	0,0165
	0,03	0,028		0,09	0,0158
	0,04	0,0245		0,1	0,01525
	0,05	0,021		0,105	0,015

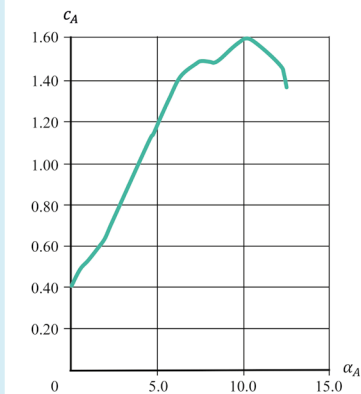


Abb. 9: Zusammenhang des Anstellwinkels α_A (x-Achse) und des Auftriebsbeiwertes c_A (y-Achse) beim AH-7-47-6-Profil

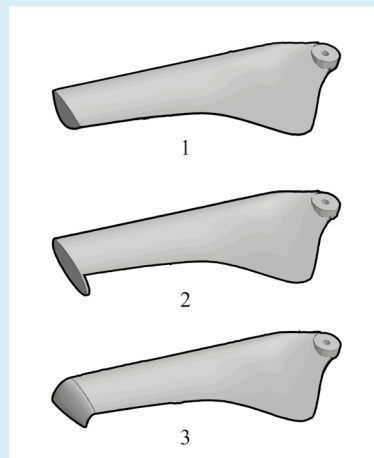


Abb. 10: Wingletvarianten an Design II 1. Kreisförmige Winglets 2. Ovale Winglets 3. Abfallende Winglets

riss kommen [9] und der Rotor erzeugt keinen Auftrieb mehr. Dieser Punkt ist durch einen Knick im Profil-Diagramm gekennzeichnet (siehe Abb. 9).

Um diesem Risiko entgegenzuwirken, wurden Anstellwinkel ausgewählt, die unterhalb des kritischen Abrisspunktes liegen. Für das ONERA OA209-Profil von Design I belief sich der Wert auf 5° . Bei Design II betrug der Wert für das E71 Profil 5° und für das AH-7-47-6 Profil 8° .

$$\alpha_E = \arctan\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{R}{r \cdot \lambda_i}\right) \quad (10)$$

Der Einstellwinkel α_E musste für jedes Profil der elf Stützstellen über Gleichung 10 einzeln bestimmt werden. Die Entfernung eines Profils von der Nabe wird durch die Variable r beschrieben. Die Gesamtlänge des Rotors R ist konstant. Eine weitere Konstante ist der sogenannte induzierte Durchflussgrad λ_i , der sich aus dem Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit an der Spitze des Rotors zur Ansauggeschwindigkeit berechnet. Er steht unter anderem in Abhängigkeit zur Drehzahl n .

Nachdem der Konstruktionswinkel basierend auf der Propellertheorie nach

Betz und Schmitz für die elf Stützprofile errechnet wurde, erfolgte die Modifikation der Profilkordinaten (vgl. Gleichung 7 und 8 und Tab. 4 und Tab. 5):

$$x'' = x' \cdot \cos(\alpha_K) - y' \cdot \sin(\alpha_K) \quad (11)$$

$$y'' = x' \cdot \sin(\alpha_K) + y' \cdot \cos(\alpha_K) \quad (12)$$

3.3 Konstruktion in SolidWorks und Anbau von Winglets

Auf die Modifikation der Profilkordinaten folgte ihre Ausformung in der Konstruktionssoftware SolidWorks zu einem 3D-Objekt. Dazu wurden die modifizierten Profilkordinaten (vgl. Gleichung 11 und 12) in Textdateien umgewandelt, die anschließend nach SolidWorks exportiert werden konnten. Da das Programm die Koordinatenpunkte eigenständig zu Profilen zusammensetzt, mussten die Profile der elf Stützstellen nur noch manuell miteinander über eine Freiform verbunden werden.

Der letzte Schritt der Konstruktion von Design I bestand darin, eine Nabe zu konstruieren, mit der der Rotor am Quadrocopter befestigt werden konnte. Dazu wurde auf die diversen Skizzenfunktionen zurückgegriffen.

Bei Design II kam es zusätzlich zum Anbau von Winglets. Ihre Anwen-

Tab. 4: Erhaltene Konstruktionswinkel für Design I

Profil	r in m	α_K in $^\circ$	Profil	r in m	α_K in $^\circ$
Blattwurzel (ONERA OA209)	0	0	Blattspitze (ONERA OA209)	0,06	-20,5
	0,01	-59,2		0,07	-19,2
	0,02	-47,8		0,08	-18,0
	0,03	-39,8		0,09	-17,1
	0,04	-34,1		0,1	-16,2
	0,05	-29,8		0,105	-15,5

dingsgebiete sind vielfältig und reichen von Flugzeugtragflächen bis hin zu Rotoren von Windrädern. Da die Winglets von Windrädern größere Ähnlichkeiten zum Strömungsverhalten der Rotoren eines Quadrocopters aufweisen als beispielsweise Flugzeugtragflächen, dienten sie primär als Vorlage [10]. Für Winglets gibt es keine gängigen Berechnungsmethoden, weswegen sie mit Hilfe der bereits erwähnten Skizzenfunktionen manuell dreidimensional ausgeformt werden mussten. Die Formen der Winglets wurden mit der Skizzenfunktion Spline hergestellt. Insgesamt wurden drei verschiedene Winglet-Varianten ausgearbeitet (siehe Abb. 10).

Die Überlegung hinter den kreisförmigen und ovalen Winglets war die Unterbindung bzw. Abschwächung der seitlichen Querströmungen. Die konzeptionelle Entwicklung der abfallenden Winglets war weitaus komplizierter. Gegenüber den beiden ersten Winglet-Varianten besitzen sie einen entscheidenden Vorteil: Durch die nach unten gebogene Form wird die Luft nicht nur am Überströmen der Blattsitze gehindert, sondern gezielt zum Boden hin abgelenkt. Eine nach unten gerichtete Luftbewegung stellt einen Impuls dar. Basierend auf dem Impulserhaltungssatz muss ein Gegenimpuls existieren [11]. Durch diesen Gegenimpuls wird zusätzliche Auftriebskraft ge-



Abb. 11: Design I nach Vollendung des 3D-Druckvorgangs

neriert. Mit den abfallenden Winglets ruft der Rotor in der Theorie einerseits weniger Widerstand hervor, andererseits erzeugt er mehr Auftrieb. Bei den anderen Winglet-Varianten ist dies nicht der Fall: Aufgrund ihres rechtwinkligen Anbauwinkels dienen sie lediglich als Barriere für die unerwünschte Blattspitzenumströmung, wodurch sich zwar der induzierte Widerstand reduziert, aber kein zusätzlicher Auftrieb erzeugt wird.

3.4 Mechanische Fertigung

Nach Abschluss der Konstruktion in SolidWorks war der Rotor bereit für

den 3D-Druck. Dazu wurde die fertige SolidWorks-Datei in die Software des 3D-Druckers exportiert. Beim Druckvorgang wurden die Strukturen des Rotors Schicht für Schicht aufgebaut. Das flüssige Material wurde dazu durch UV-Licht ausgehärtet. Das genutzte 3D-Druck-Verfahren wird als Polyjet bezeichnet (siehe Abb. 11).

In Abb. 11 ist zu sehen, dass der Rotor zunächst auffällig dick war. Dies liegt daran, dass der 3D-Drucker das Material des Rotors auf sogenannte Stützstrukturen aufträgt. Diese waren beim verwendeten Polyjetverfahren weich

Tab. 5: Erhaltene Konstruktionswinkel für Design II

Profil	r in m	α_K in $^\circ$	Profil	r in m	α_K in $^\circ$
Blattwurzel (AH-7-47-6)	0	0	Blattspitze (E71)	0,06	-12,1
	0,01	-45,0		0,07	-11,1
	0,02	-28,6		0,08	-10,4
	0,03	-22,1		0,09	-9,78
	0,04	-18,7		0,1	-9,30
	0,05	-16,6		0,105	-9,10



a)



b)



c)

Abb. 12: a) Standardrotoren der Mavic Pro (DJI) b) Präpariertes Design I mit Nabe für Prüfstand c) Präpariertes Design II mit abfallenden Winglets



und konnten mit einem Skalpell und einem Wasserstrahler entfernt werden. Abschließend wurden die gedruckten Prototypen präpariert und mit ihrer Nabe am Quadrocopter befestigt. Die Endprodukte dieses Vorgangs sind in [Abb. 12b und 12c](#) dargestellt.

Für die Testflüge wurde eine zweite Serie des Rotors Design II mit abfallenden Winglets gedruckt. Dabei musste aus logistischen Gründen auf einen anderen 3D-Drucker zurückgegriffen werden, der nach dem Stereolithografie-Verfahren arbeitet. Hierzu wird ebenfalls flüssiges Material mittels UV-Licht ausgehärtet. Jedoch muss bei diesem Druckverfahren eine feste Stützstruktur aufgebaut werden, die anschließend mechanisch entfernt wurde. Dies führte dazu, dass die Unterseite

des Rotors schlussendlich eine glattere Oberfläche besaß als die Oberseite. Die Auswirkungen dieses Umstandes und der unterschiedlichen Materialien lassen einige Rückschlüsse zu, die in Kapitel 5.2. beschrieben werden.

4. Versuchsdurchführungen

4.1 Messungen auf dem Prüfstand

Alle fünf Prototypen wurden auf einem stationären Prüfstand ([siehe Abb. 13](#)) mit den Standardrotoren der Mavic Pro verglichen. Des Weiteren erfolgte eine Gegenüberstellung der verschiedenen Winglet-Prototypen.

Zur Bestimmung ihrer aerodynamischen Kennwerte, wurden die Roto-

ren mit einem Antrieb auf einem Querträger befestigt, der seitlich auf einer Waage stand. Fing der Rotor an sich zu drehen, zeigte die Waage durch das Auftreten der Auftriebskraft ein geringeres Gewicht an. Ihr Betrag ließ sich aus dem Gewichtsunterschied herleiten, denn gemäß dem Prinzip des dritten Newtonschen Gesetzes («Actio gleich Reactio») kann die Auftriebskraft mit der Gewichtskraft gleichgesetzt werden.

$$F_A = 2 \cdot \Delta F_G = 2 \cdot \Delta m \cdot g \quad (13)$$

4.2 Durchführung der Testflüge

Nach dem Durchlauf auf dem Prüfstand, wurden die Standardrotoren und das Design II mit abfallenden Winglets im Freien getestet und miteinander verglichen. Insgesamt wurden drei Testflüge durchgeführt. Der erste sollte Aufschluss darüber geben, ob die Rotoren den Bedingungen im Freien standhalten würden. Mit dem zweiten und dritten Testflug wurden die Ergebnisse des Prüfstandes überprüft, Materialfragestellungen beantwortet und Rückschlüsse auf die Flugdauer ermöglicht.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1 Messungen auf dem Prüfstand

5.1.1 Vergleich der Standardrotoren mit Design I und Design II

In der Theorie hebt die Mavic Pro ab, sobald der zu testende Rotor eine Auftriebskraft von 1,78 Newton erzeugt. Mit Hilfe eines Windmessgeräts wurde die Drehzahl bestimmt, bei der der Rotor diesen kritischen Kraftbetrag erzeugt. Diese Drehzahl, welche theoretisch für einen Schwebeflug notwendig ist, wird in dieser Arbeit als kritische Drehzahl definiert. Von Design I zu Design II ließ sich ein deutlicher Unterschied feststellen. Design II benötigte 6.100 Umdrehungen pro Minute, um die Mavic Pro zum Abheben zu bringen, während bei Design I 6.800 Umdrehungen pro Minute erforderlich waren. Die-

se Verbesserung der kritischen Drehzahl unterliegt mehreren Faktoren: Angefangen bei der Profilwahl, über die Berechnung der Profiltiefe bis hin zur Konstruktion in SolidWorks wurden bei Design II starke Abweichungen zu Design I vorgenommen. Bei Design I wurde der Einfluss der Profil-Kennwerte auf eine gleichmäßige Verteilung der Auftriebskraft deutlich unterschätzt. Anhand eines eigens erstellten Kriterienkatalogs, der an die Messwerte von Design I anknüpfte, wurden für Design II geeignete Profile für den Bereich der Blattwurzel und der Blattspitze herausgefiltert. Die anschließende Modifikation ihrer Profilkordinaten mit der Profiltiefe war ebenfalls ein ausschlaggebender Faktor für die Verbesserung. Um den Rotor technisch realisieren zu können, mussten starke Abweichungen von den berechneten Werten unternommen werden. Bei Design II wurden diese Abweichungen an der Blattwurzel bewusst geringgehalten; so ließen sich die resultierenden aerodynamischen Nachteile minimieren. Des Weiteren haben kleinere Änderungen bei der Bestimmung des Anstellwinkels und der Konstruktion in SolidWorks zur Leistungssteigerung von Design I zu Design II beigetragen. Design II weist aufgrund dieser Veränderungen eine gleichmäßigere Verteilung der Auftriebskraft auf

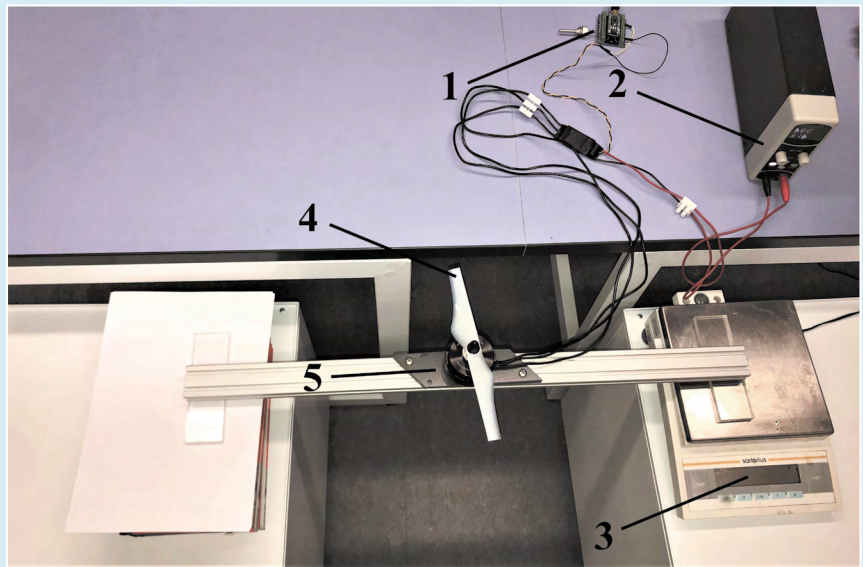


Abb. 13: Aufbau des Prüfstandes zur Ermittlung der aerodynamischen Eigenschaften der Rotoren
1. Steuerung 2. Netzteil 3. Waage 4. Rotor 5. Antrieb

und erzeugt insgesamt mehr Auftrieb als sein Vorgängermodell.

Beide Rotordesigns schnitten allerdings schlechter ab als die Standardrotoren der Mavic Pro. Diese erzeugen die benötigte Auftriebskraft bei einer Drehzahl von 5.600 Umdrehungen pro Minute (siehe Abb. 14).

5.1.2 Vergleich der verschiedenen Winglet-Designs

Mit dem Anbau der Winglets sollte erneut eine Annäherung an die Standardrotoren der Mavic Pro erreicht werden. Weder das kreisförmige- noch das ovale Winglet machten jedoch einen entscheidenden Unterschied aus. Von 6.100 Umdrehungen pro Minute, die das Design II ohne Winglets zum Abheben brauchte, konnte für beide Varianten eine geringfügige Verbesserung der kritischen Drehzahl auf 5.900 Umdrehungen pro Minute erreicht werden.

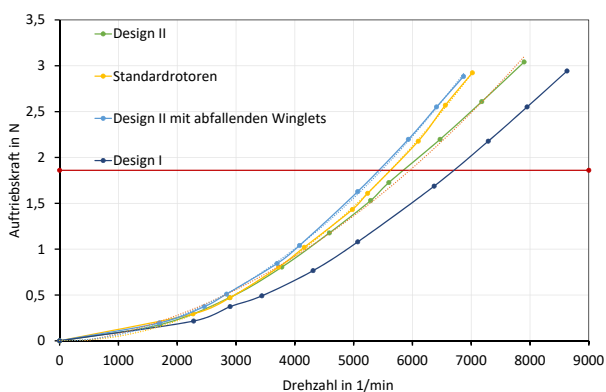


Abb. 14: Vergleich von Design I, Design II (mit und ohne abfallende Winglets) sowie den DJI-Standardrotoren in Bezug auf ihr Auftriebsverhalten. Die rote Linie kennzeichnet die zum Abheben benötigte Auftriebskraft.

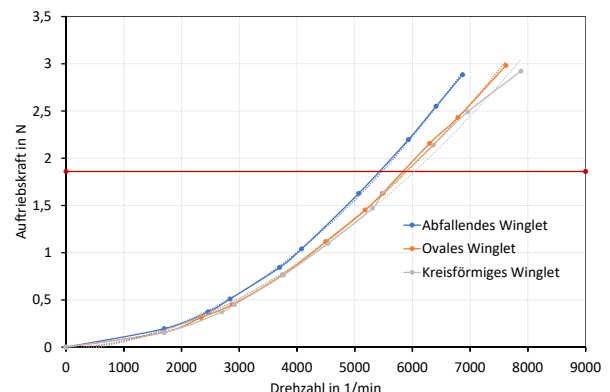


Abb. 15: Vergleich der kreisförmigen, ovalen und abfallenden Winglets in Bezug auf ihr Auftriebsverhalten

Somit kam dem abfallenden Winglet besondere Aufmerksamkeit zu. Die benötigte Drehzahl zum Abheben lag bei 5.400 Umdrehungen pro Minute. Damit ist es nicht nur das effizienteste der drei Winglet-Varianten, sondern übertrifft die Rotoren der Mavic Pro um 200 Umdrehungen pro Minute (siehe Abb. 15). Grund für diese Steigerung von 700 Umdrehungen pro Minute ist der spezielle Formfaktor der Winglets. Die in der Theorie angestellten Überlegungen erwiesen sich als haltbar.

5.2 Auswertung der Testflüge

5.2.1 Aerodynamische Erkenntnisse aus den Testflügen

Der erste Testflug sollte Aufschluss darüber geben, ob Design II mit abfallenden Winglets den Bedingungen im Freien standhalten würde. Die Testbedingungen waren zwar dieselben wie auf dem Prüfstand, allerdings war ein Materialbruch aufgrund der hohen Beschleunigungsraten wahrscheinlicher. Die Mavic Pro konnte zum Abheben gebracht und im Schwebeflug gehalten werden; somit wurde die anfängliche Zielstellung erreicht.

Der zweite Testflug baute auf diesen Erkenntnissen auf und ermöglichte einen direkten Vergleich von Design II mit abfallenden Winglets mit den Standardrotoren der Mavic Pro unter Realbedingungen. Zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften der Rotoren konnten ihre Drehzahl auf dem Display der Fernbedienung abgelesen werden. Die kritische Drehzahl wurde als Vergleichskriterium verwendet. Die zwei Rotoren schnitten unter Realbedingungen besser ab als auf dem Prüfstand. Mit annähernd 4.800 Umdrehungen pro Minute, übertraf Design II mit abfallenden Winglets die Standardrotoren der Mavic Pro (5.500 Umdrehungen pro Minute). Dieser Unterschied zum Prüfstand kam durch einen konzeptionellen Fehler zu Stande. Der Querträger, auf dem der Motor des Prüfstands befestigt war, behinder-

te die vertikale Beschleunigung der Luft durch den Rotor, wodurch eine höhere Drehzahl notwendig war, um den gleichen Auftrieb zu erzielen.

Vor dem dritten Testflug wurden die Rotoren ein weiteres Mal gedruckt. Durch die Entfernung der Stützstrukturen kam es zu einer erhöhten Oberflächenrauheit der Oberseite des Rotors. Dies führte dazu, dass Design II mit abfallenden Winglets höhere Drehzahlen aufwies als beim zweiten Testflug: Der Wert stieg von 4.800 auf 5.400 Umdrehungen pro Minute an. Dadurch, dass die Oberseite rauer war als die Unterseite, wurde das Druckgefälle zwischen der Ober- und Unterseite des Rotors verringert. Das kleinere Druckgefälle führte schlussendlich dazu, dass weniger Auftrieb erzeugt wurde.

5.2.2 Elektrodynamische Erkenntnisse aus den Testflügen

Der dritte Testflug lieferte wichtige Erkenntnisse über das elektrodynamische Leistungsvermögen der Rotoren. Bis zur vollständigen Entladung des Akkumulators konnten die Standardrotoren die Mavic Pro 23 Minuten und 46 Sekunden im Schwebeflug halten. Bei Design II mit abfallenden Winglets belief sich die Flugzeit auf 22 Minuten und 15 Sekunden. Zusammen mit der Nennleistung der Akkumulatoren, die sich auf 43,6 Wh (=156.960 Ws) beläuft, konnte auf die elektrische Leistung zurückgeschlossen werden. Diese betrug bei den Standardrotoren 110 Watt und bei Design II mit abfallenden Winglets 118 Watt. Den eigens konstruierten Rotoren muss über einen bestimmten Zeitraum dementsprechend mehr Energie zugeführt werden als den Standardrotoren. Ihr Wirkungsgrad fällt somit geringer aus.

Setzt man diese Ergebnisse in Relation mit denen vom Prüfstand, lässt sich eine interessante Beobachtung anstellen. Obwohl Design II mit abfallenden Winglets auf dem Prüfstand mehr Auftriebskraft erzeugt hatte als die Stan-

dardrotoren, musste letzteren weniger Energie zugeführt werden.

5.2.3 Abweichungen zwischen aerodynamischen und elektrodynamischen Ergebnissen

Während der Testflüge konnte beobachtet werden, dass die Mavic Pro kleinste Böen und ungleiche Bewegungen ihrer vier Rotoren mit Hilfe ihrer Sensorik ausgeglichen hat. Bei Design II mit abfallenden Winglets musste die Mavic Pro mit ihrer Sensorik besonders stark aussteuern. Darauf basierend wurde angenommen, dass diese Ausgleichsbewegungen zu einer schnelleren Entladung der Akkumulatoren führten.

Es kann durchaus sein, dass durch stärkere Eingriffe der Sensorik mehr Energie benötigt wurde, allerdings kann die kürzere Flugzeit auch von einem aerodynamisch ineffizienteren Rotor hervorgerufen werden. Die Tatsache, dass ein Rotor bei der gleichen Drehzahl mehr Schub liefert, ist nicht allein ausschlaggebend für eine höhere aerodynamische Effizienz. Rotoren, deren Profile kleinere Gleitzahlen (Verhältnis zwischen c_w und c_A) besitzen, weisen einen höheren Energieverbrauch auf. Sie erzeugen bei der gleichen Drehzahl denselben Schub, benötigen aber mehr Drehmoment und daher mehr Leistung. Um die Effizienz der zu testenden Rotoren beurteilen zu können, hätte auf dem Prüfstand das Drehmoment oder die elektrische Eingangsleistung des Motors gemessen werden müssen. Aufgrund fehlender experimenteller Möglichkeiten konnte die Bestimmung dieser ausschlaggebenden Kennwerte allerdings nicht vorgenommen werden.

5.2.4 Erkenntnisse über Materialfragestellungen

Der Fertigungsvorgang kann die Leistung des Rotors maßgeblich beeinflussen. Bei Design II haben kleine Druckfehler, so zum Beispiel die erhöhte Oberflächenrauheit der Oberseite, zu einer Verringerung des Druckgefäl-

les und damit zur Abschwächung der Auftriebskraft geführt. Die beim dritten Testflug beobachtete Instabilität der Rotoren ermöglicht zudem Rückschlüsse auf die Eignung des verwendeten Fertigungsverfahrens für die Herstellung von Rotorblättern. Anders als die kommerziellen Standardrotoren wurden die Rotorprototypen mittels additivem 3D-Druckverfahren gefertigt. Das Material wird Schicht für Schicht in horizontaler Richtung aufgetragen und anschließend mit UV-Licht ausgehärtet. Dieses Verfahren eignet sich vor allem zur Herstellung von Prototypen in Kleinserie. Es wird vermutet, dass sich der Rotor im Flug durch den schichtweisen Aufbau des verwendeten 3D-Druckverfahrens stärker durchbiegt als ein Standardrotor, was zu aerodynamischen Nachteilen führt. Dies gilt es weiter zu prüfen.

6. Zusammenfassung

Die Zielstellung der Arbeit bestand darin, einen Rotor zu entwerfen und zu fertigen, mit dem der Quadrocopter Mavic Pro den Schwebeflug erreichen kann. Die Auslegung des Rotors basierte auf den Gesetzmäßigkeiten und Gleichungen der Propellertheorie nach Betz und Schmitz. Insgesamt entstanden fünf verschiedene Rotordesigns.

Der erste Schritt der Auslegung bestand in der Wahl geeigneter Profile. Darauf folgte die Modifikation der Profile mit der Profiltiefe und dem Konstruktionswinkel. Die modifizierten Koordinaten wurden in SolidWorks anschließend zu einem 3D-Modell ausgeformt. Bei Design II erfolgte zusätzlich der Anbau von eigens konzipierten Winglets. Mit Hilfe additiver Fertigungsverfahren wurden die Rotoren abschließend gedruckt und auf einem stationären Rotoren-Prüfstand getestet. Als Kriterium für das aerodynamische Leistungsvermögen diente die Drehzahl der Rotoren, bei der sich theoretisch der Schwebeflug des Quadrocopters einstellt. Diese Drehzahl wurde als kritische Drehzahl definiert. Der kritische Betrag der Auf-

triebskraft wurde mit Hilfe einer Laborwaage bestimmt.

Um die Mavic Pro zum Abheben zu bringen, muss Design I mit 6.800 Umdrehungen pro Minute rotieren, Design II lediglich mit 6.100 Umdrehungen pro Minute. Beide Rotordesigns benötigen eine höhere Drehzahl als die Standardrotoren der Mavic Pro mit 5.600 Umdrehungen pro Minute. Durch den Anbau der abfallenden Winglets konnten die Standardrotoren der Mavic Pro in Bezug auf die kritische Drehzahl übertroffen werden. Design II mit abfallenden Winglets bringt den Quadrocopter bereits bei einer Umdrehungsrate von 5.400 Umdrehungen pro Minute zum Abheben.

Die durchgeführten Testflüge lassen zudem Rückschlüsse auf die elektrodynamischen Eigenschaften der Rotoren zu. Um die Mavic Pro im Schwebeflug zu halten, müssen die Motoren bei Design II mit abfallenden Winglets eine elektrische Leistung von 118 Watt erbringen. Bei den Standardrotoren sind es lediglich 110 Watt. Die eigens konstruierten Rotoren sind somit energetisch ineffizienter als die Standardrotoren der Mavic Pro. Dazu tragen neben Fertigungs- und Materialfaktoren womöglich auch aerodynamische Faktoren wie die Gleitzahl bei, die sie ineffizienter gestalten als ihre industriellen Pendanten.

Bei allfälligen Folgeprojekten wird es daher von besonderem Interesse sein, den Fokus auf materialtechnische Aspekte zu legen. Die Testflüge haben den großen Einfluss des verwendeten Materials, der angewandten Fertigungsverfahren sowie der Oberflächengüte auf die aerodynamische Performance des Rotors aufgezeigt.

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt Jean-Charles Demierre für seinen Einsatz als schulischer Betreuer. Er hat mich wohlwollend und mit großem Interesse unterstützt.

Weiterhin danke ich Dr.-Ing. Michael Stiehm, dem Leiter der Biofluidmechanik-Abteilung des Instituts für ImplantatTechnologie und Biomaterialien e.V. Er stand mir mit viel Hilfsbereitschaft und Fachkompetenz zur Seite und ohne ihn wäre die Durchführung der Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Prof. Dr.-Ing. Klaus-Peter Schmitz, dem Direktor des Instituts für ImplantatTechnologie und Biomaterialien e.V., danke für seine großzügige und zeitaufwendige Förderung sowie für die zahlreichen Hinweise und Anregungen.

Literatur

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kutta-Schukowski-Transformation> (letzter Aufruf am 23.08.2020)
- [2] <https://www.badische-zeitung.de/biologische-schaedlingsbekaempfung-mit-drohnen-hat-sich-etabliert--187412685.html> (letzter Aufruf am 02.09.2020)
- [3] <https://www.thphys.uni-heidelberg.de/~hufener/PhysikUeberall/V07S.pdf> (letzter Aufruf am 22.02.2019)
- [4] Gasch R. Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz. *Windkraftanlagen* 2005: S. 179-216, Springer Verlag
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstand> (letzter Aufruf am 23.08.2020)
- [6] <https://www.spektrum.de/lexikon/mathematik/induzierter-widerstand-der-aerodynamik/4363> (letzter Aufruf am 24.02.2019)
- [7] <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-winglets-work-to-reduce-drag-and-how-wingtip-vortices-form/> (letzter Aufruf am 23.08.2020)
- [8] <http://airfoiltools.com/search/list?page=a&no=0> (letzter Aufruf am 22.08.2020)
- [9] Herwig H. Strömungsphänomene. *Strömungsmechanik* 2008: S. 20-26 Springer Vieweg
- [10] Daude M. *Winglets for Aircraft Wing Tips*. U.S. Patent 4'457'479
- [11] RWTH Aachen. Drehimpuls, Drehimpulssatz und Drehimpulserhaltungssatz. Vorlesungsbegleitende Unterlagen 2018: *Mechanik II Dynamik*:79–85

Publiziere auch Du hier!

Forschungsarbeiten von
Schüler/Inne/n und Student/Inn/en

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft
Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg
Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de

Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschickt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d. h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d. h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



Richtlinien für Beiträge

Für die meisten Autor/Inn/en ist dies die erste wissenschaftliche Veröffentlichung. Die Einhaltung der folgenden Richtlinien hilft allen – den Autor/innen/en und dem Redaktionsteam

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d. h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.
- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.
- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF

ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)

- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage www.junge-wissenschaft.ptb.de herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.

Impressum

[JUNGE]
wissenschaft



Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion
Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508

Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

Design & Satz

Sebastian Baumeister
STILSICHER - Grafik & Werbung
E-Mail: baumeister@stilsicher.design
Tel.: 05142 / 98 77 89

