

FAKTENCHECK MULTIKOPTER: ÄHNLICHKEITEN UND UNTERSCHIEDE ZU ETABLIERTEN VTOL-KONFIGURATIONEN

G. Strickert, DLR, Institut für Flugsystemtechnik,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Multikopter bieten eine Vielzahl interessanter Eigenschaften, werden im Vergleich zu bewährten Luftfahrzeugen der bemannten Luftfahrt aber häufig als überschätzt wahrgenommen. Durch ihre starke Verbreitung, ständig wachsende Leistungsfähigkeit und damit einhergehend zunehmende Nutzung für die unterschiedlichsten Zwecke lohnt eine systematische Betrachtung derartiger Fluggeräte. Die häufig dem Start-Up-, Hobby- und Freizeitbereich entstammenden enthusiastischen Bewertungen bedürfen einer Einordnung in den Kontext vergleichbarer Luftfahrzeuge sowie grundsätzlicher Erkenntnisse aus Aerodynamik, Flugmechanik und Regelungstechnik. Dieser Aufgabe nimmt sich der vorliegende Faktencheck an: Es wird, basierend auf Literatur, Herstellerangaben und dem Flugbetrieb mit Haupt-Heckrotor- sowie Flettnerkonfigurationen als auch Multikoptern ein umfassender Vergleich angestellt. Schwerpunkte der Untersuchung sind hierbei natürlich die häufig genannten Vorteile der Multikopter Sicherheit sowie leichte Steuerbarkeit. Doch auch die angenommenen Nachteile der geringeren Leistungsfähigkeit und schlechten Skalierbarkeit werden hinterfragt. Zu vielen wesentlichen Kriterien, welche in die Wahl der Luftfahrzeugkonfiguration einfließen, werden Fakten, theoretische Hintergründe und Erfahrungswerte genannt.

1. EINLEITUNG

Unter Multikoptern versteht man meistens unbemannte Luftfahrzeuge, die mit einer geraden Anzahl von starren, senkrecht nach unten wirkenden Rotoren und Drehzahlsteuerung Auftrieb und durch Schrägstellung auch Vortrieb erzeugen. Durch die Kombination leichter, leistungsfähiger Elektromotoren, Antriebsakkus mit hoher Energiedichte und preisgünstiger Flugsteuerungssysteme entstand eine Konfiguration, welche sich in kürzester Zeit im Freizeitbereich, zur Aufnahme von Luftbildern und -videos sowie für Messungs- und Erkundungsaufgaben durchgesetzt hat. Dabei kann man durchaus von einem Massenmarkt sprechen, der führende Hersteller DJI verkaufte 2015 schätzungsweise mehr als eine halbe Millionen Fluggeräte [1].

Mittlerweile erwecken in Elektronikfachmärkten für jedermann käufliche Multikopter mit 4K-Kamera und Verfolgerfunktion den Eindruck, hier habe sich eine echte Revolution in der Luftfahrt bezüglich Nutzerfreundlichkeit, Alltagstauglichkeit und Leistungsfähigkeit ereignet. Aus der Luftfahrtbranche und Regulierungsbehörden selbst sind dagegen eher kritische Stimmen zu vernehmen, die auf bestehende, überlegene Luftfahrzeugkonzepte verweisen sowie mangelnde Sicherheit und Missbrauchsmöglichkeiten der neuen Technologie thematisieren.

Das DLR Institut für Flugsystemtechnik betreibt in einer eigenen Abteilung bereits seit 13 Jahren unbemannte Luftfahrzeuge für Forschungszwecke und als Flugversuchsträger. Die verwendeten Fluggeräte sind Hubschrauber (Haupt-Heckrotorkonfigurationen, Flettner-Konfiguration, Elektro-, Kolben- und Turbinenantrieb), Starrflügler und seit 6 Jahren auch Quadro- und Hexakopter. Die dabei gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse bilden die Basis für den vorliegenden Faktencheck, der mit theoretischen Grundlagen, Daten von weiteren Beispielkonfigurationen und qualitativen Abschätzungen ergänzt wurde.

Betrachtet und verglichen werden sollen daher hier echte Multikopter mit starren Rotoren (drehzahlgesteuert) ab 4 Motoren mit Elektroantrieb auf der einen Seite und elektrisch betriebene Hubschrauber mit Taumelscheibensteuerung von einem oder zwei Rotoren auf der anderen Seite. Derartige Systeme sind zurzeit nur unbemannt und mit Abflugmassen überwiegend unterhalb von 25 kg verfügbar (RC-Bereich). Zur Einordnung und Überprüfung der Plausibilität finden sich aber auch Vergleiche mit manntragenden Fluggeräten. Drehzahlgesteuerte Hubschrauber, Tragschrauberkonzepte, Schwenkrotoren und Konfigurationen mit zusätzlicher Auf- und Vortriebserzeugung werden hier nicht behandelt. Streng genommen sind zwar Multikopter auch Hubschrauber, im Folgenden wird der Begriff Hubschrauber aber zur Charakterisierung der typischen Haupt-Heckrotor-Konfiguration verwendet.

Ausgehend vom mechanischen Aufbau werden typische Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Konfigurationen beleuchtet. Bei der Betrachtung der Aerodynamik und Flugmechanik fallen dann zunächst die Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen Fluggeräte auf, viele der hubschraubertypischen Phänomene lassen sich auch bei Multikoptern finden. Ähnliches gilt auch für die Flugregelung zur Lagestabilisierung: Die Konzepte und Architekturen sind so ähnlich, dass teilweise sogar die gleichen Komponenten sowohl für Hubschrauber als auch Multikopter verwendet werden können. Unterschiede finden sich hingegen dann bei der Effizienz sowie den Querschnittsthemen Missionen, Handling, Kosten und Sicherheit. Themenbezogen gibt es jeweils als Thesen formulierte Aussagen, die dann im Weiteren den verfügbaren Fakten gegenübergestellt werden. Zum Schluss findet sich eine kurze Zusammenfassung, verbunden mit dem Fazit, dass Multikopter bereits heute in vielen Anwendungen sinnvoll einzusetzen sind und durch aktuelle Entwicklungen eine zunehmende Ausweitung ihrer Einsetzbarkeit zu erwarten steht.

2. AUFBAU UND KOMPONENTEN

These 1: Multikopter sind einfacher aufgebaut als Hubschrauber

Der einfache Aufbau von Multikoptern wird häufig als Vorteil dargestellt, wenn es um nötige Einstell- und Wartungsarbeiten, Reparaturen, aber auch Ersatzteilhaltung geht. Bezieht man allerdings die Systemkomplexität auf die Anzahl der benötigten Komponenten für vergleichbare Fluggeräte, so wird diese These nicht eindeutig gestützt. In der folgenden Tabelle [TAB 1] wurden die wesentlichen Komponenten eines Haupt-Heckrotor Hubschraubers und eines Hexakopters, beide geeignet zum Mitführen von ca. 1kg Nutzlast, anzahlmäßig gegenübergestellt:

Baugruppe	Hexakopter	RC-Hubschrauber
Rahmen, Landewerk	104	45
Antrieb, ggf. mit Getriebe	27	36
Rotorkopf / Taumelscheibe	0	31
Elektronikkomponenten ggf. mit Servos	8	12
Gesamt	139	124

TAB 1: Anzahl der Einzelteile Multikopter / RC Hubschrauber, Abflugmasse ca. 5kg

Nicht mitgezählt wurden hier Schrauben und Verbinder. Auf den ersten Blick sieht der Multikopter wie das komplexere Fluggerät aus. Allerdings wird dieser Eindruck relativiert, wenn man berücksichtigt, dass die Leichtbau-Landebeine des betrachteten Multikopters alleine mit 45 Einzelteilen in die Zählweise beim Rahmen eingehen und die Arme und Beine einen sehr hohen Symmetriegrad aufweisen. Darüber hinaus ergeben sich zwischen den einzelnen Komponenten bei der Montage des Multikopters wesentlich weniger Abhängigkeiten, es müssen keine Getriebeispiele eingestellt werden, das Justieren von Wellen und Einstellen von Zahnriemen entfällt. Mechanische Mischer und Gestänge zu Servos sind ebenfalls nicht vorhanden. Die aufwändigen (elektro-) mechanischen Komponenten des Hubschraubers finden in rein elektronischen, wartungsfreien Komponenten beim Multikopter für die Drehzahlsteuerung ihre Entsprechung. Die starren Luftschrauben am Direktantrieb sind tatsächlich erheblich einfacher vom Aufbau her als Getriebe, Taumelscheibe und Rotorkopf des konventionellen Hubschraubers. Dies findet bei der oben genannten Tabelle ihren Ausdruck darin, wenn man die Anzahlen der beweglichen Komponenten vergleicht. Dann stehen auf der Multikopterseite 27 Komponenten, auf der Hubschrauberseite aber mindestens 67. Trotz vergleichbarer Gesamtkomponentenzahl sind Multikopter daher tatsächlich deutlich einfacher aufgebaut, als konventionelle Hubschrauber

These 2: Multikopter zeigen, dass der elektrische Flugantrieb bereits heute machbar und sinnvoll ist.

Elektrische Flugantriebe stellen bei kleinen und kleinsten, meist unbemannten Luftfahrzeugen mittlerweile keine Besonderheit mehr da. Bis zu einer Leistung von ca. 2KW sind Motoren und Regler problemlos verfügbar, die benötigten Ströme und Spannungen lassen sich selbst im Hobbybereich noch sicher beherrschen. Stand der Technik sind Lithium-basierte wiederaufladbare Akkuzellen mit hoher Energiedichte (bis 180Wh/kg) und dreiphasigen,

bürstenlosen Elektromotoren mit hohen Wirkungsgraden, häufig verwendet ohne Zwischengetriebe als Direktantrieb. Mit derartigen Elektroantrieben lassen sich, relativ unabhängig von der Abflugmasse oder Größe, unter alltagstauglichen Bedingungen erfahrungsgemäß ca. 20 Minuten Flugzeit realisieren. Für viele, insbesondere multikoptertypische Anwendungen (Luftbildaufnahme, Inspektion) reicht das völlig aus. In diesen Fällen spielt der Elektroantrieb seine weiteren Vorteile voll aus:

- Geringer Wartungsaufwand
- Einfache Benutzung & Verwendung
- Geringe Vibrationen
- Reduktion von Bauteilen
- Geringe Lärmemissionen
- Einfache Regelbarkeit

Momentan muss sich der Elektroantrieb aber noch dort geschlagen geben, wo es um die Maximierung der Transportleistung, größtmögliche Reichweite oder Flugdauer geht. Dies liegt hauptsächlich in der möglichen Energiedichte von elektrischen Speicherzellen gegenüber chemischen Speichern wie Kerosin oder Dieselkraftstoff [2].

Energiespeicher	Energiedichte [Wh/kg]	Wirkungsgrad Antrieb
Diesel, Kerosin	11000	0,42
Methanol	5600	0,3
Lithium Polymer & Lithium Ionen Akku	130 -180	0,8

TAB 2: Energiedichte unterschiedlicher Energiespeicher

Möchte man beispielsweise eine Leistung von 10 kW rein elektrisch eine Stunde lang bereitstellen, so muss man gemäß der Werte in TAB 2 bei heutiger Technik ca.

$$\frac{10000 \text{ W}}{180 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} * 1 \text{ h} = 69,4 \text{ kg}$$

Akku mitführen. Bei Antrieb durch Kerosin kommt man dagegen bereits mit ca.

$$\frac{10000 \text{ W}}{11000 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} * 1 \text{ h} = 2,2 \text{ kg}$$

Treibstoff aus.

Energieträger	Typ	P [W]	m [kg]	P/m [W/kg]
Elektro	A20-6	300	0,078	3846
	A40-8	1100	0,246	4471
	A50-12	3000	0,465	6451
	Q80-4	7000	1,295	5405
Verbrenner	15LA	294	0,138	2131
	35AX	941	0,363	2593
	65AX	1272	0,497	2560
	120AX	2280	0,647	3524
	AREA	9193	2,62	3509
	120			

TAB 3: spezifische Leistungen typischer Elektro- und Verbrennungsmotoren (Hacker bzw. OS & BayTec)

Bezieht man in die Auswertung auch die Massen der benötigten Elektro- und Verbrennungsmotoren mit ein, so benötigt man zunächst Werte für die spezifische Leistung der entsprechenden Antriebe. Diese wurden aus den technischen Daten typischer Modellfluggantriebe abgeleitet [3].

TAB 3 und BILD 1 zeigen die Ergebnisse. Die Elektromotoren liefern, bezogen auf ihre Masse eine höhere Leistung als die Verbrennungsmotoren. Bei beiden Motorarten zeigt sich darüber hinaus eine höhere spezifische Leistung bei den höheren Leistungswerten (nichtlineare Abhängigkeit).

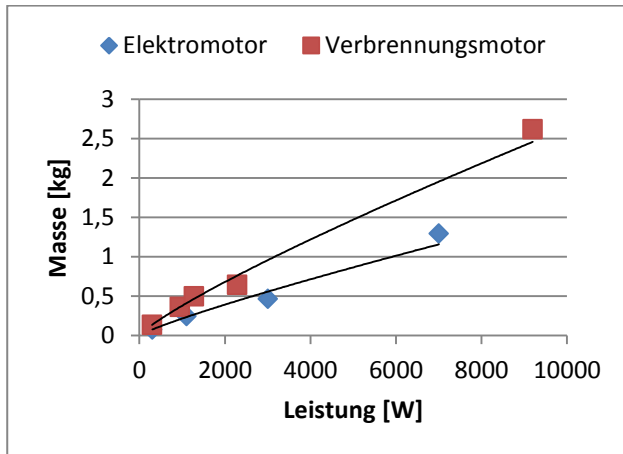


BILD 1: Antriebsmasse bei unterschiedlicher Motorleistung

Im Mittel ergibt sich für die betrachteten Elektromotoren eine spezifische Leistung von ca. 5043 W/kg, die Verbrennungsmotoren weisen ca. 2864 W/kg auf. So beträgt die benötigte Masse des Elektromotors für 10 kW

$$m_e = \frac{10000 \text{ W}}{5043 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} = 1,98 \text{ kg}$$

und die des Verbrennungsmotors

$$m_v = \frac{10000 \text{ W}}{2864 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} = 3,49 \text{ kg}$$

Dieser Effekt kann aber die erhöhte Energiespeichermasse nicht kompensieren.

Anstelle nun an dieser Stelle theoretisch herzuleiten, wieviel Leistung für unterschiedliche VTOL-Konfigurationen erforderlich ist wurde der Ansatz gewählt, empirische Daten heranzuziehen. Dadurch werden bereits alle Effekte und Gewichtungen berücksichtigt und die Daten sind in der Praxis auch tatsächlich überprüfbar.

In TAB 4 finden sich entsprechende erflogene bzw. gemessene Daten der vom Institut für Flugsystemtechnik betriebenen unbemannten VTOL-Luftfahrzeuge inklusive des daraus abgeleiteten spezifischen Leistungsbedarfs und der entsprechenden Daten eines manntragenden Hubschraubers für Vergleichszwecke.

Dementsprechend hat sich gezeigt, dass als grober Orientierungswert für die benötigte Schwebefugleistung gilt:

$$P_{\text{Schwebe}} = m * 145 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

Bezeichnung	Konfiguration	Abflugmasse [kg]	Leistungsbedarf Schwebeflug [W]	Spezifischer Leistungsbedarf [W/kg]
Trikopter 1	Trikopter	0,8	140	175
Trikopter 2	Trikopter	1,2	201,6	168
Asctec Peli-can	Quadrokopter	1,3	247,8	191
Benda eGenesis	Hubschrauber	6,6	900	136
Benda eGenesis 1400 U/min	Hubschrauber	12,7	1560	123
Benda eGenesis 1650 U/min	Hubschrauber	12,7	1835	144
superARTIS	Flettner	65	7000	108
superARTIS	Flettner	97,5	10700	110
WS Kopter	Hexakopter	5,19	759	146
BO 105	Hubschrauber	2500	400000	160
Mittelwert				145

TAB 4: Leistungsbedarf VTOL-Konfigurationen

Mit diesen Anhaltswerten kann man beispielsweise das zurzeit viel diskutierte, multikopterbasierte Ultraleicht-Luftfahrzeug e-volo nachrechnen:

Dessen Abflugmasse beträgt lt. technischer Daten [4] 450kg. Das entspricht einem Schwebefugleistungsbedarf von

$$450 \text{ kg} * 145 \frac{\text{W}}{\text{kg}} = 65250 \text{ W}$$

Legt man eine Flugzeit von 20 Minuten zugrunde, so ergibt sich eine benötigte Akkumasse von

$$m_{\text{Akk}} = \frac{65250 \text{ W}}{180 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} * \frac{1}{3} \text{ h} = 120,8 \text{ kg}$$

Zusammen mit der überschlägig bestimmten Motormasse

$$m_{\text{Mot}} = \frac{65250 \text{ W}}{5043 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} = 12,9 \text{ kg}$$

und der Nutzlastmasse in Form von 2 Personen

$$m_{\text{PL}} = 2 * 90 \text{ kg}$$

ergibt sich eine Gesamtmasse des Antriebs und der Nutzlast m_{ges} von:

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{PL}} + m_{\text{Mot}} + m_{\text{Akk}} = 313,7 \text{ kg}$$

Damit verbleiben bei einer Höchstmasse von 450kg für die Luftfahrzeugstruktur 136,3 kg. Dies erscheint realisierbar. Möchte man aber bei gleichen Annahmen eine Stunde Flugzeit realisieren, so benötigt man alleine dafür schon

$$m_{\text{akk}} = \frac{65250 \text{ W}}{180 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} * 1 \text{ h} = 362,5 \text{ kg}$$

und hätte damit bereits rund 80% der möglichen Luftfahrzeugmasse eines Ultraleichtflugzeuges durch die Akkumasse belegt.

Man könnte jetzt auf den Gedanken kommen, dass sich durch die Mitnahme von mehr Akkus, also der Verbesserung des Verhältnisses von Akkumasse zu Luftfahrzeugmasse prinzipiell jede beliebige Flugzeit erzielen lassen müsste. Dies ist aber nicht der Fall, wie folgende, grundlegende Einschätzung zeigt:

$$t_{\max} = \frac{\text{Energiedichte}}{\text{Spezifischer Leistungsbedarf}} = \frac{180 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}}{145 \frac{\text{W}}{\text{kg}}} = 1,24\text{h}$$

Mit den oben eingeführten Werten ergibt sich daraus also eine maximale Flugzeit von ca. 74min für den Fall, dass der Akku nur sich selber heben muss und das restliche Fluggerät keine Masse aufweist. Dabei ist der tatsächliche Wert für die benötigte Schwebefugleistung und Energiedichte unerheblich, es gibt immer eine theoretische Maximalflugzeit, die sich nicht durch das Hinzufügen weiterer Akkukapazität erhöhen lässt. Hält man die Abflugmasse konstant und variiert nur das Verhältnis von Akkumasse und Luftfahrzeugleermasse,

$$m_{\text{Hubschr.}} = m_{\text{leer}} + m_{\text{Akku}} = \text{const.}$$

so ergibt sich der in BILD 2 angegebene Zusammenhang.

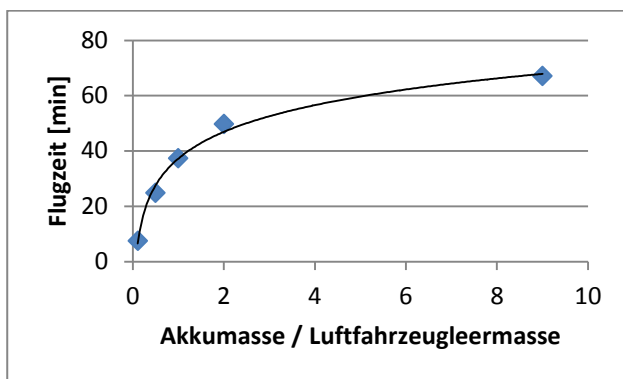


BILD 2: Flugzeitsteigerung durch Steigerung des Akkumasseanteils

Relevante Auslegungen für den Dauerflug werden dementsprechend einen Akku verwenden, dessen Masse 1- bis 2-mal die Luftfahrzeugleermasse beträgt. Damit erreicht man dann bereits 1/2 bis 2/3 der theoretisch möglichen Flugzeit. Bei einem sehr hohen Verhältnis von Akkumasse zu Luftfahrzeugmasse wird dann wieder der oben angegebene theoretische Grenzwert von 74 Minuten erreicht.

Allerdings soll nicht der Eindruck erweckt werden dass damit das Potential von elektrisch betriebenen VTOL-Konfigurationen ausgereizt sei. In Einzelfällen wurden durch die Reduzierung des spezifischen Leistungsbedarfs (Optimierung des Schwebeflugs) sogar schon Flugzeiten von über 2 Stunden mit VTOL-Systemen erzielt (verl. [5]). Durch zu erwartende Verbesserungen der Akkutechnologie oder auch hybride Antriebssysteme können elektrische Flugantriebe in Zukunft ihr bisheriges Nischendasein durchaus verlassen.

Für Multikopter stellt die Verfügbarkeit geeigneter Elektroantriebe aber eine nahezu notwendige Bedingung dar.

Zwar wurden vereinzelt auch schon Multikopter mit Verbrennungsmotoren realisiert, z.B. die mannttragende Curtiss-Wright VZ-7, diese sind aber deutlich aufwändiger im Betrieb, unzuverlässiger und schlechter zu regeln. Dieses Verhalten ist umso ausgeprägter, je kleiner die Verbrennungsmotoren werden. Auch die Systemkomplexität steigt dann wieder deutlich gegenüber dem Elektroantrieb an.

Insofern haben Multikopter zur Verbreitung der elektrischen Antriebstechnologie einerseits beigetragen und profitieren andererseits in hohem Maße von dieser. Unter den Einschränkungen bezüglich der möglichen Flugzeiten bzw. Reichweiten sind für Multikopter elektrische Antriebe schon jetzt sinnvoll.

3. AERODYNAMIK UND FLUGMECHANIK

3.1. Grundsätzliche Effekte

Bei näherer Betrachtung der Mechanismen zur Auftriebs-erzeugung bei Multikopter und Hubschrauber fallen zunächst die Ähnlichkeiten ins Auge. In beiden Fällen sind sog. Drehflügel für die Auftriebserzeugung verantwortlich. Im Falle der Multikopter kommen dafür Rotoren bzw. Propeller mit festen Anstellwinkeln zum Einsatz, beim Hubschrauber typischer Weise Rotorblätter mit über eine Taumelscheibe verstellbaren Einstellwinkeln. Für diese Drehflügel gelten, mehr oder weniger ausgeprägt, die folgenden Effekte:

3.1.1. Bodeneffekt

In der Nähe des Bodens, in Flughöhen bis ca. 2 Rotor-durchmesser, staut sich die durch die Rotoren nach unten beförderte Luft auf und kann nur verlangsamt seitlich abfließen. Einerseits vermindert sich dadurch die benötigte Schwebefugleistung, andererseits wird das Luftfahrzeug auf dem verwirbelten Luftkissen auch unruhiger. Sowohl beim Steuern von Hubschraubern als auch von Multikoptern wird allgemein angeraten, den Bereich des Bodeneffekts schnellstmöglich zu durchfliegen. Qualitativ betrachtet scheint es so zu sein, dass bei einem Multikopter die Abwinde der einzelnen Rotoren zu einem gemeinsamen Abwind verschmelzen. Die dadurch vergrößerte „äquivalente Rotorscheibe“ ist dann maßgeblich für die Ausprägung des Bodeneffektes, nicht die Größe der Einzelrotoren. Zusätzlich sind die Abwindgeschwindigkeiten bei Multikoptern generell größer, da mehrere Einzelrotoren weniger Luft stärker beschleunigen müssen als bei Haupt-Heckrotor-Konfigurationen (vergl.3.2).

3.1.2. Leistungspolare

Bei Drehflüglern zeigt die benötigte Leistung eine starke Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit. Unanschaulicher Weise sinkt die benötigte Leistung gegenüber dem Schwebeflug bei wachsender Fluggeschwindigkeit zunächst stark ab, um erst im Schnellflugbereich wieder über die Schwebefugleistung anzusteigen. So benötigt eine BO105 lt. [5] im Schwebeflug 400kW, bei 120km/h aber nur noch 220kW Triebwerksleistung, also 55%. Die Erklärung hierfür sind mit wachsender Fluggeschwindigkeit sinkende induzierte Anstellwinkel an den Rotorblättern, die sich aus der Überlagerung von Rotorstrahl und ungestörter umgebender Luftmasse ergeben. Dementsprechend ist die Ausprägung dieses Effektes abhängig von der Blattspitzengeschwindigkeit und Fluggeschwindigkeit. Das Verhältnis dieser beiden Werte wird Fortschrittsgrad genannt [6]:

Die benötigte Schwebefugleistung ergibt sich laut der Strahltheorie (Bernoulli) nach dem Zusammenhang:

$$P_{\text{schwebe}} = G \sqrt{\frac{G}{2\rho A}}$$

G : Gewichtskraft

ρ : Luftdichte

A : durchströmte Fläche

Bildet man das Verhältnis der benötigten Schwebefugleistungen eines Hubschraubers und eines gleich schweren, gleich großen Quadropters, so erhält man:

$$\frac{P_{\text{quad}}}{P_{\text{heli}}} = \frac{G \sqrt{\frac{G}{2\rho A_{\text{quad}}}}}{G \sqrt{\frac{G}{2\rho A_{\text{heli}}}}} = \sqrt{\frac{1}{0,686}} = 1,207$$

Dabei wurde die oben genannte Rotorpackungsdichte für das Verhältnis der durchströmten Flächen eingesetzt:

$$\frac{A_{\text{quad}}}{A_{\text{heli}}} = 0,686$$

Es ergibt sich bereits bei der einfachsten Abschätzung der Schwebefugleistung ein Leistungsmehrbedarf von 20,7%, weil die Gesamtrotorfläche infolge der Verteilung auf Einzelrotoren kleiner wird. Im Vergleich dazu ergibt sich mit den oben genannten empirischen Daten ein Leistungsverhältnis von:

$$\frac{P_{\text{multi}}}{P_{\text{heli}}} = \frac{170 \frac{W}{kg}}{130 \frac{W}{kg}} = 1,307$$

Ein wesentlicher Einfluss der Effizienz scheint sich also bereits durch die Strahltheorie abbilden zu lassen.

3.3. Trägheit der Rotoren

Zur Effizienzsteigerung kann man die Rotorblätter von Multikoptern aber auch nicht beliebig vergrößern. Mit der Vergrößerung der Rotorblätter steigt auch deren Drehträgheit überproportional an, so dass eine drehzahlbasierte Stabilisierung und Steuerung aufgrund der begrenzten Motorleistung erst schwierig und dann unmöglich wird. Denn die zur Beschleunigung eines Rotors von einer Drehzahl auf eine andere benötigte Leistung P beträgt:

$$P = \frac{\Delta W}{t}$$

Die zu verrichtende Arbeit hängt von der Drehzahlsteigerung und der Drehträgheit J (hier: dünner, mittig gelagerter Stab) ab.

$$\Delta W = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$J = \frac{1}{12} m l^2$$

$$\omega = 2\pi f$$

Dann ergibt sich:

$$P = \frac{\frac{1}{6} \pi^2 m l^2 f^2}{t}$$

Die Masse m skaliert mit der Länge des Rotorblattes kubisch, da zur Aufnahme der vergrößerten Lasten auch das Profil (Blattquerschnitt) im gleichen Maße mit vergrößert werden muss. Die sog. Steineranteile sorgen weiterhin für eine zusätzliche quadratische Zunahme der Trägheitsmomente mit der Vergrößerung des Rotordurchmessers.

Benötigt man also bei kleinen Multikoptern mit leichten und kurzen Rotoren nur einen Bruchteil der Schwebefugleistung, um eine benötigte Drehzahländerung herbeizuführen, so wächst diese Leistung bei wachsender Rotorgöße stark an und überschreitet schnell sogar die Schwebefugleistung des Systems.

Aus diesem Grund verteilt man den Auftrieb bei Schwerlastmultikoptern auf viele Einzelrotoren anstatt der Nutzung effizienterer größerer Rotoren. Die momentan größten Rotoren von Multikoptern erreichen Durchmesser von maximal 1,5 m (aus [4]).

3.4. Optimierte Rotorgeometrie

Allerdings gibt es auch einen Effekt, der die Effizienz heutiger Multikopter gegenüber vielen unbemannten oder RC-Hubschrauberkonfigurationen steigert. Nahezu alle Multikopter sind mit für den Schwebeflug optimierten Rotoren ausgestattet, also Rotoren, die zumindest eine nach außen abnehmende Verwindung aufweisen. Dagegen sind für die Mehrzahl der hier betrachteten Hubschrauber lediglich unverwundene Rotorblätter verfügbar. Die erzielbare Effizienzsteigerung durch eine optimierte Rotorblattgeometrie, also eine gleichmäßige Durchflussgeschwindigkeit durch die Rotorscheibe beträgt lt. [5] ca. 5%.

3.5. Drehzahlabhängigkeit der Effizienz

Für alle Drehflügler gilt, dass die Effizienz auch stark von der Drehzahl abhängt. Im Schwebeflug stellt die kleinste noch flieg- und steuerbare Drehzahl die energieeffizienteste Drehzahl dar. Eine Steigerung dieser Drehzahl bietet zwar Vorteile im Vorwärtsflug, bei Windböen und für die Steuerbarkeit, benötigt aber durch den stark ansteigenden Luftwiderstand deutlich höhere Antriebsleistungen (vergl. [12]).

Auch im kleinen Maßstab für unbemannte Luftfahrzeuge ist dieser Effekt zu beobachten. In BILD 5 wurden Messdaten für den spezifischen Schwebefugleistungsbedarf zweier RC-Hubschrauber mit einem Rotordurchmesser von 1,8 m (eGenesis) und 1,5 m (T-Rex 700E) bei unterschiedlichen Drehzahlen bzw. Blattspitzengeschwindigkeiten aufgetragen. Die Daten des T-Rex stammen dabei aus [13], der eGenesis ist ein DLR Versuchsträger. Mit wachsender Drehzahl wurde der ansteigende Auftrieb durch die Reduktion der Blatteinstellwinkel kompensiert. Bei beiden Systemen tritt der starke Leistungsbedarfanstieg mit wachsender Drehzahl deutlich hervor. Zur Effizienzsteigerung sollte die Rotordrehzahl also weitest möglich reduziert werden. Die Drehzahlreduzierung kann sowohl für Hubschrauber als auch für Multikopter durchgeführt werden und zeigt auch in beiden Fällen deutliche Wirkung, war beispielsweise bei den oben genannten Rekordflügen wesentliches Optimierungskriterium. Prinzipbedingt kann man den Effekt mit Multikoptern nicht ganz so weit ausreizen, da man sowohl für Beschleunigung als auch für Drehzahlreduzierung im Rahmen der Steuerung bzw. der Stabilisierung dort noch Reserven benötigt [14]. Beschleunigt man einen Multikopter auf höhere Flugeschwindigkeiten, so kann das nur über die gesteigerter Drehzahl einiger Rotoren erfolgen, die in diesem Zustand

dann unausweichlich auch einen höheren Luftwiderstand infolge der erhöhten Anströmgeschwindigkeit erzeugen.

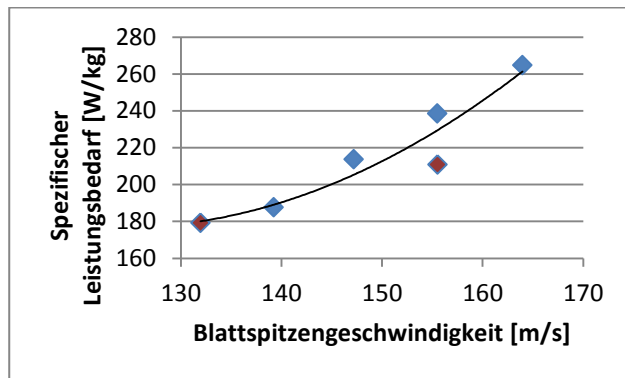


BILD 5: Variation der Schwebeflugleistung mit der Drehzahl (T-Rex 700E (blau) & eGenesis (rot))

3.6. Getriebeeinfluss

Die Verringerung der Drehzahl am Hauptrotor bringt bei konventionellen Hubschraubern das mechanische Problem mit sich, dass verhältnismäßig große Drehzahlen von Elektromotoren auf relativ geringe Hauptdrehzahlen für große Rotoren umzusetzen sind. Durch Anpassung der Polpaarzahl, spezielle Motorwicklungen usw. ist dies nur begrenzt möglich, daher weisen die meisten Hubschrauber Getriebe auf. Gebräuchlich sind mehrstufige Zahnrad- und Zahnriemengetriebe, für diese sind in der Literatur [15] Wirkungsgrade von maximal 96% angegeben. Dem gegenüber weisen die meisten Multikopter Direktantriebe auf, d.h. sowohl das Getriebe als auch zusätzliche Lagerungen, Umlenkungen etc. entfallen komplett.

3.7. Blattschlagen

Ein weiterer Effizienzeinfluss betrifft vorwiegend den Vorwärtsflug bzw. den Schwebeflug bei Wind. Blattanstellwinkelvariable Hubschrauber benötigen zur Steuerung den Effekt des Blattschlagens. Über die Auf- und Abbewegung des Rotorblattes in z-Richtung des Luftfahrzeuges über einen Blattumlauf wird der Auftriebsvektor geneigt und, ggf. gemeinsam mit resultierenden Mastmomenten, eine Beschleunigung der Hubschrauberzelle erreicht. Den benötigten Freiheitsgrad erreicht man über Blattgelenke oder gezielte Blattelastizität. Dieser Freiheitsgrad erlaubt aber auch ein Kippen der Rotorscheibe ohne gleichzeitiges Kippen der Hubschrauberzelle. Im stationären Zustand (Seitenwind oder Schnellflug) nimmt der Rotor dann gegenüber der anströmenden Luft eine größere Neigung ein, als die Hubschrauberzelle. Daher kann auch der Luftwiderstand des Hubschraubers unter diesen Bedingungen geringer ausfallen, als dies beim Multikopter der Fall ist. Hier muss zur Steuerung infolge der starren Rotoren und der Drehzahlsteuerung der Auftriebsvektor mit dem gesamten Luftfahrzeug gemeinsam geneigt werden.

3.8. Drehmomentausgleich

Zum Schluss seien noch die Unterschiede der verschiedenen Konzepte bezüglich des Drehmomentausgleichs der auftriebserzeugenden Rotoren genannt. Während beim Hubschrauber im Schwebeflug bis zu 30% der Leistung über den Heckrotor für den Drehmomentausgleich investiert werden müssen, sind Multikopter durch ihre gegenläufigen Motoren prinzipiell drehmomentausgeglichen. Die Leistung kann also ausschließlich in den Auf-

trieb fließen und muss nicht das Heading des Luftfahrzeuges stabilisieren. Das ist ein klarer Vorteil für den Multikopter, der aber mit zunehmender Fluggeschwindigkeit an Bedeutung verliert, da der Hubschrauber dann durch Rumpf und Heckleitwerk an Stabilität gewinnt und der Heckrotor entlastet wird.

In TAB 6 sind die Effekte nochmals zusammengefasst. Bisherige Auslegungen zeigen den Effizienzvorteil der Hubschrauber, bei konsequenter Nutzung der Multikopterstärken lassen sich aber durchaus spezielle Auslegungen und Anwendungen denken, in denen auch ein Multikopter das effizientere System wäre, vor allem für Aufgaben mit hohem Schwebefluganteil.

Effizienzeinfluss	(RC) Hubschrauber	Multikopter
Niedrige Strahlbelastung	+	-
Optimierte Rotorblattgeometrie	-	+
Niedrige Drehzahl	+	-
Getriebewirkungsgrad	-	+
Schrägstellung des Rumpfes	+	-
Drehmoment- und Drallausgleich	-	+

TAB 6: Effizienzeinflüsse

4. FLUGREGELUNG

These 4: Multikopter lassen sich einfacher fliegen

Durch Hersteller und Betreiber von Multikoptern wird häufig der Eindruck erweckt, die Steuerung eines Multikopters sei sehr einfach, schnell zu erlernen und prinzipbedingt gegenüber anderen Konfigurationen im Vorteil. Dem muss an dieser Stelle widersprochen werden: Im Gegenteil ist die Steuerung eines Multikopters so schwierig, dass der Pilot zwingend Unterstützung durch Drehratensensoren und einen Flugsteuerrechner benötigt. Ohne diese künstliche Stabilisierung ist ein Multikopter dermaßen agil und instabil, dass er auch durch trainierte RC-Piloten nicht beherrscht werden kann. Dies ist beispielsweise bei herkömmlichen RC-Hubschraubern nicht der Fall. Bei entsprechender Auslegung kann man diese ohne jede Reglerunterstützung fliegen, wenn auch zumindest eine Kreiselunterstützung um die Hochachse als angenehm empfunden wird [16].

Um einen Multikopter durch einen Piloten beherrschbar zu machen, sind folgende elektronische Hilfen notwendig:

- Mapping der Steuerkommandos für Steigen / Sinken, Rollen, Nicken und Gieren auf die Drehzahlverstellung der Einzelrotoren
- Dämpfung der Flugbewegung bei Steuerkommandos und Störungen
- Stabilisierung der Fluglage

Für die letzten beiden Punkte ist die Flugsteuerung mit Drehratensensoren, zusätzlich häufig Beschleunigungssensoren, barometrischer Höhenmessung sowie GPS-Positionsbestimmung ausgestattet. Sog. PID-Regler für die drei unterschiedlichen Raumachsen ermöglichen das Ausbalancieren eines ansonsten instabilen Fluggerätes.

Um also einen sinnvollen Vergleich der Flugeigenschaften im Sinne von Pilotenbewertungen durchführen zu können,

muss als Vergleichsgerät nicht ein unregelmäßiger sondern vielmehr ein ebenfalls geregelter Hubschrauber herangezogen werden. Tut man dies, so stellt man schnell fest, dass sich alle Multikopterfunktionen mit dem gleichen Steueraufwand auch auf konventionelle Hubschrauber übertragen lassen. Dies schließt sogar einen vollautomatischen Wegpunktflug nach Koordinaten sowie Start und Landung ein. Das Fliegen eines modernen, mit einem sog. FBL (Flybarless) System ausgestatteten RC-Hubschraubers zeigt, was an dieser Stelle möglich ist, inklusive Panikknopf, der den Hubschrauber aus Kunstflugfiguren auf schnellstmöglichem Wege wieder in die Normalfluglage bringt.

Allerdings soll hier nicht verschwiegen werden, dass eine elektronische Regelung für einen konventionellen Hubschrauber deutlich aufwändiger zu realisieren ist als für vergleichbare Multikopter. Dies liegt nicht an der Regelungstechnik selber, hier können sogar identische Verfahren verwendet werden, sondern an den in Hubschraubern allgegenwärtigen Vibrationen. Diese verfälschen die der Regelung zugrunde liegenden Beschleunigungs- und Drehratenmessungen stark und müssen daher konstruktiv und durch geeignete Filterung reduziert werden. Zusätzlich erfolgt eine Stützung der Beschleunigungs- und Drehratensensoren über GPS und barometrischen Höhenmesser. Insbesondere der Einfluss des Hauptrotors auf die Vibrationen ist erheblich, spezielle Rotorköpfe sind erforderlich für das dynamische Auswuchten der Blätter und das Justieren des Blattspurlaufs. Multikopter mit ihren kürzeren, gegenläufigen Rotoren deutlich geringerer Masse weisen diese Probleme nicht in dem Maße auf, es können billigere Sensoren und unaufwändigere Datenaufbereitung verwendet werden.

Das Fazit zur obigen These muss also lauten: Flugregelungssysteme erleichtern die Steuerung von Hubschraubern und ermöglichen die Steuerung von Multikoptern. Alle mit Multikoptern realisierten vereinfachten Steuerkonzepte lassen sich ebenso für Hubschrauber anwenden.

5. QUERSCHNITTSTHEMEN

These 5: Multikopter sind alltagstauglicher

Im Gegensatz zu unbemannten Hubschraubern konnten sich Multikopter innerhalb kurzer Zeit für vielfältige Einsätze etablieren, vor allem für Luftbildaufnahmen. Dies liegt sicherlich am hohen Vorfertigungsgrad der angebotenen Systeme. Im Gegensatz zu den komplizierteren Hubschraubern fliegen Multikopter häufig „out of the box“, ohne Einstellarbeiten, Anpassung an eigene Fernsteuerungen, handwerkliche Fähigkeiten usw.. Der Endanwender ist nicht gezwungen, sich mit dem Luftfahrzeug an sich auseinanderzusetzen. Der Zeitraum zur Vorbereitung eines Fluges ist kürzer, die Flugdurchführung aufgrund standardmäßig vorhandener elektronischer Flugsteuersysteme einfacher und der Flugbetrieb lässt sich verhältnismäßig unauffällig durchführen (vergl. These 11). Beschädigungen im Flugbetrieb treten seltener auf und haben geringere Folgen (vergl. These 7). Bis auf Sonderfälle, bei denen es um Flugleistung oder Effizienz geht sind Multikopter im Alltagsbetrieb daher die bessere Wahl.

These 6: Multikopter sind billiger

Ein weiterer Aspekt der Alltagstauglichkeit sind die geringeren Kosten von Multikoptern für Beschaffung und Wartung. Dies liegt einerseits am einfacheren Aufbau mit geringerer Systemkomplexität, andererseits aber auch an

der hohen Modularität und Austauschbarkeit der Komponenten. Kann man bei einem Hubschrauber meist nur bei einem Hersteller Ersatzteile beziehen oder muss diese selber anfertigen, so sind bei Multikoptern eine Vielzahl von Motor-, Regler- und Rahmenkombinationen möglich. Entsprechend groß ist die Auswahl an Herstellern und Lieferanten.

These 7: Multikopter sind sicherer

Zudem sind beim Multikopter die Crashfolgen grundsätzlich geringer, wenn man sie mit Hubschraubern der gleichen Gewichtsklasse vergleicht. Ein großer Teil der für Beschädigungen verantwortlichen Energie ist bei Hubschraubern im Hauptrotor gespeichert und wird beim schlagartigen Anhalten der Drehbewegung freigesetzt, also bei Boden- oder Hindernisberührung sowie der Kollision mit hubschraubereigenen Elementen (Heckflosse oder Heckausleger). Die Folge sind defekte Lager, verbogene Wellen, Strukturschäden am Heck und Getriebschäden. Da sich bei Multikoptern die Auftriebserzeugung auf mehrere, kleinere, leichtere Rotoren verteilt, fallen hier die Folgen aufgrund der geringeren Trägheitsmomente deutlich geringer aus. Durch die geringere kinetische Energie und den fehlenden Freilauf reagiert ein Multikopter aber auch schneller auf eine Notbremsung des Antriebs, so dass die Energie der Rotorblätter vor dem Einschlag noch weiter vermindert werden kann.



BILD 6: WS-Kopter

Masse 5 kg, Durchmesser Motor-zu-Motor 86 cm

Sowohl Hubschrauber als auch Multikopter haben einen eigenen Mechanismus, um sicherheitskritische Fehlerfälle zu entschärfen: Beim Hubschrauber besteht durch die Verstellung der Blattstellwinkel und die Entkopplung des Rotors zum Antriebsstrang durch einen Freilauf die Möglichkeit zur Autorotation, beim Multikopter kann man ab sechs Motoren den Ausfall eines Motors mit Hilfe der anderen Antriebe kompensieren (Redundanz). Dafür müssen allerdings die Geometrien, Motorleistungen und Flugregler passend abgestimmt sein, nicht für jede Kombination ist ein Abkippen bei Motorausfall zu vermeiden.

Als letzter Punkt eignen sich Multikopter besser als Hubschrauber dafür, die Rotoren durch Käfige, Gitter oder Prallgestänge abzusichern. Dadurch kann für den Bediener ein Berührungsschutz hergestellt werden und Kollisionen mit Hindernissen führen nicht mehr zwangsläufig zum Absturz. Dadurch sind Multikopter auch prädestiniert für Einsätze in hindernisreicher Umgebung und dem Innenraum.

Zusammengefasst können Multikopter den Vergleich der Sicherheiten bzw. des Gefährdungspotentials klar für sich entscheiden, hauptsächlich wegen der geringeren Rotationsenergien.

5.1. Missionen & Einsatzspektrum

These 8: Multikopter eignen sich besser als Kamera-träger

Hubschrauber stellen durch ihre Möglichkeit zum Schwebeflug bereits völlig neue Möglichkeiten für Luftbild- und Filmaufnahmen zur Verfügung. Allerdings weisen auch Hubschrauber noch Unterschiede hinsichtlich ihrer Manövrierbarkeit in den drei Raumachsen auf. Schwebeflüge mit Wind, der von hinten auf das Heck bläst sind beispielsweise instabiler, Kurvenflüge nach links und rechts fallen unterschiedlich aus aufgrund der asymmetrischen Wirkung des Heckrotors und auch Schwebeflüge ohne Wind sind immer durch einen Rollwinkel zur Kompensation des Heckrotorseitenschubs überlagert. Der rotations-symmetrisch aufgebaute Multikopter kennt diese Effekte nicht, eine Unterscheidung von Roll- und Nickbewegung findet nicht statt und Kameras können völlig frei am Himmel platziert werden. Dazu kommt das geringere Vibrationsniveau infolge geringerer rotierender Massen und Verteilung auf ein größeres Spektrum infolge der Drehzahlvariationen. Bei Hubschraubern ist dagegen regelmäßig ein hoher Aufwand erforderlich, um die montierten Kameras von den Vibrationen zu entkoppeln. Der Einsatz als Kameraträger ist also nicht ohne Grund die Hauptanwendung von Multikopterkonfigurationen.

These 9: Multikopter eignen sich besser für Waren-lieferungen

Die Diskussion zur Nutzung von Multikoptern für die Auslieferung von Waren ergibt sich aus den bereits diskutierten Vorteilen bezüglich ihrer Alltagstauglichkeit und Sicherheit. Auf der anderen Seite stehen aber die möglichen Transportleistungen. Bei Betrachtung der möglichen Nutzlast, Reichweite und Geschwindigkeit sind andere Konfigurationen besser geeignet. In der nächsten Zeit werden bei dieser Thematik aber eher zulassungs- und sicherheitstechnische Fragestellungen im Vordergrund stehen, nicht Flugleistungen und Flugeigenschaften.

These 10: Multikopter eignen sich auch für den be-manneten Flug

Wie im Abschnitt 3 gezeigt wurde, ergibt sich kein Vorteil bei Nutzung von Multikoptern für mannttragende Luftfahrzeuge. Konkurrenzfähig werden die Systeme erst bei deutlicher Steigerung der Leistungsdichten der Energieträger oder bei Nutzung hybrider Antriebssysteme. Auch die Weiterverbreitung des luftfahrzeuggestützten Individualverkehrs durch den Multikopter ist nicht zu erwarten.

Zwar lassen sich die heute benötigten Fähigkeiten zum reinen Steuern und Stabilisieren eines Luftfahrzeugs bei Multikoptern durch Flugregelungssysteme stark reduzieren, dies trifft jedoch auf alle Luftfahrzeugkonfigurationen zu. Ein Großteil der Ausbildung und Befähigung von Piloten ist aber gerade nicht die Koordination von Bewegungseindrücken und Steuerkommandos sondern die sog. Airmanship, also das verantwortliche Fällen von Flugscheidungen basierend auf Situationsbewusstsein und Kenntnissen (vergl. BILD 7). Diese Fähigkeiten sind weitgehend vom Luftfahrzeug unabhängig, durch die Einführung eines neuartigen Luftfahrzeugtyps sinken die Anfor-

derungen an Ausbildung, Training und Fähigkeiten der Piloten daher nicht.

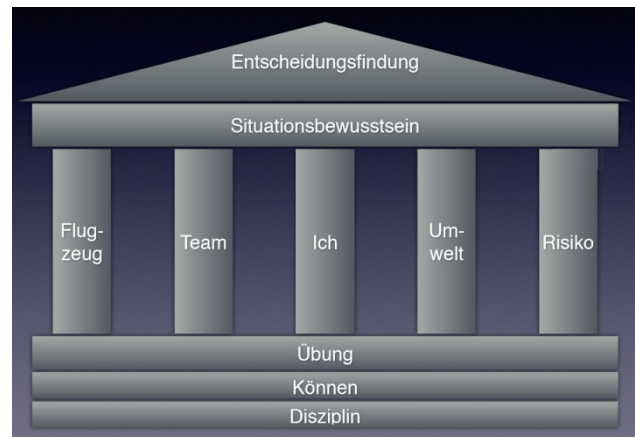


BILD 7: Elemente der Pilotenqualifikation (nach [17])

Basierend auf den vorhergehenden theoretischen Erörterungen bezüglich der fehlenden Schlaggelenke beim Multikopter sei hier auch die Prognose gewagt, dass der Flug im drehzahlgesteuerten Multikopter von den Passagieren als unkomfortabel empfunden werden wird, da jede Bewegung oder Windböe sich direkt in Lageänderungen des Luftfahrzeuges abbildet und nicht, wie beim Hubschrauber, durch den Freiheitsgrad der Rotorscheibe abgefedert wird.

Bei den im mannttragenden Flug typischen Reisegeschwindigkeiten werden sich beim Multikopter dann auch die Nachteile eines starren Rotors ohne zyklische Anstellwinkelverstellung manifestieren. Durch die Differenz der Anströmgeschwindigkeiten von vor- und rücklaufendem Rotorblatt wird es zu starken Rollkräften um die Flugrichtung kommen, die zwar beim Multikopter symmetrisch sind, aber zusätzlich Leistung kosten und Vibrationen verursachen werden. Die dann benötigten Auslegungen mit höheren Blattspitzengeschwindigkeiten werden die Effizienz weiter verringern.

Ein unschlagbarer Vorteil des Multikopters, der helfen könnte all die vorgenannten Probleme zu überwinden, ist die Möglichkeit günstiger Anschaffungspreise bei Serienfertigung. Die Systemkomplexität bemannter Hubschrauber ist so hoch, dass hier eine Chance auch für den skalierten Multikopter liegt. Die größte Gefahr für die Kosten eines bemannten Multikopters ist jedoch die elektronische Flugsteuerung, die ja sicherheitskritisch ist und daher besonderen Entwicklungsstandards, Tests und Qualitätsforderungen unterworfen ist. Für den mannttragenden Betrieb werden die Hersteller außerdem Redundanzen (Antrieb, Versorgung, Flugsteuerung) oder ggf. Rettungssysteme berücksichtigen müssen.

These 11: Multikopter sind leiser als Hubschrauber

Prinzipiell ist die Geräuscentwicklung von elektrisch betriebenen Multikopter und Hubschrauber erst einmal ähnlich. Der Elektromotor selbst ist sehr leise, typische Geräusche beim Hubschrauber rühren von den Getriebestufen zur Reduzierung der Drehzahl her. Beim Multikopter dagegen fällt die Regelungstätigkeit der Motoren auf, die kontinuierlich ihre Drehzahl ändern, um den aktuellen Flugzustand beizubehalten. Beide Geräusche verlieren

sich aber nach kurzen Entfernungen. Wirklich dominierend ist beim Hubschrauber eher das typische Knattern, welches durch das Einschlagen eines Rotorblattes in den Wirbel des vorherigen Blattes entsteht. Dies ist bei vielen Hubschraubern zu beobachten, bei Multikoptern dagegen nicht. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die ineffizienteren Multikopter ja die Luft stärker nach unten beschleunigen müssen und damit die Wirbel außerhalb der Reichweite der nachfolgenden Rotorblätter liegen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSSICHTEN

Folgende Zusammenhänge wurden im Rahmen der oben stehenden Erörterungen für Multikopter gefunden:

- Elektrisch betriebene VTOL Systeme haben eine Höchstflugzeit, die sich durch Hinzufügen weiterer Akkus nicht überschreiten lässt.
- Der Leistungsbedarf des Hubschraubers sinkt im Vorwärtsflug stärker ab, als der des Multikopters.
- Multikopter benötigen zum Fliegen eine künstliche Stabilisierung; diese ist aber mit geringerem Aufwand verbunden als bei konventionellen Hubschraubern, die jedoch auf diese Stabilisierung verzichten können.
- Bei gleicher Abflugmasse sinkt die aerodynamische Effizienz mit zunehmender Rotoranzahl.
- Aufgrund der wachsenden Trägheitsmomente der Rotoren muss bei Multikopterskalierungen für last- oder manntragenden Systeme gleichzeitig die Anzahl der Antriebsmotoren erhöht werden.
- Der einfache Aufbau der Multikopter und die geringere kinetische Energie der Rotorblätter erschließt Missionen, die bislang aus Kosten- und Sicherheitserwägungen nicht möglich waren.

Der Vergleich zwischen Multikopter- und Hubschrauberkonfigurationen fällt aufgrund der Vielzahl der beteiligten Effekte und Phänomene aber sehr gemischt aus. Was Flugleistungen angeht, so hat ein klassischer Hubschrauber unabwiesbare Vorteile, bei Kosten, Alltagstauglichkeit und Eignung für Missionen mit hohem Kollisionsrisiko ist der Multikopter das Luftfahrzeug der Wahl. Teilweise liegen die Vor- und Nachteile so eng beieinander, dass man schon genau auf die Auslegungsparameter schauen muss und eine generelle Aussage nicht mehr möglich ist.

Eine Stagnation der Multikopterentwicklung ist momentan noch nicht zu beobachten: Schräg angebaute Rotoren zur Verminderung des Rumpfwiderstandes im Schnellflug, Taumelscheiben auch auf Multikoptern, Drehrichtungsumkehr der Rotoren im Flug, Auftriebsentlastung des Multikopters durch zusätzliche Tragflächen und strömungsgünstige Verkleidungen lassen Agilität, Fluggeschwindigkeiten und Reichweiten weiter ansteigen. Die Vorteile der Multikopter können aber im Gegenzug auch zur Optimierung der bestehenden Hubschrauber inspirieren: Senkung von Vibrations- und Lärmniveau durch Feinwuchtung und höherharmonische Rotorblattansteuerung, Einführung optimierter Rotorblätter auch für kleine (RC-) Hubschrauber und Vereinfachung von Mechanikkomponenten mittels Direktantrieb oder elektronischer statt mechanischer Flugstabilisierung bieten hier große Chancen.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Mac, „Bow To Your Billionaire Drone Overlord: Frank Wang's Quest To Put DJI Robots Into The Sky,“ 6. Mai 2015. [Online]. Available: <http://www.forbes.com/sites/ryanmac/2015/05/06/dji-drones-frank-wang-china-billionaire/#76fe438b210c>. [Zugriff am 8. August 2016].
- [2] Wikipedia, „Energiedichte,“ 2016. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Energiedichte>. [Zugriff am 8. August 2016].
- [3] „Schweighofer Modellbau,“ 2016. [Online]. Available: http://www.der-schweighofer.de/wg/2050/motoren_und_zubehoer.
- [4] „Überblick Volocopter,“ 2016. [Online]. Available: <http://press.volocopter.com/index.php/ueberblick-volocopter>. [Zugriff am 8. August 2016].
- [5] W. Bittner, Flugmechanik der Hubschrauber, Springer, 2005.
- [6] C.-C. Rossow, K. Wolf und P. Horst, Handbuch der Luftfahrzeugtechnik, Carl Hanser Verlag, 2014.
- [7] Z. Kong und B. Mettler, „Evaluation of Guidance Performance in Urban Terrains for Different UAV Types and Performance Criteria using Spatial CTG Maps,“ *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, pp. 135-156, 2010.
- [8] C. Russel, J. Jung, G. Willink und B. Glasner, „Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles,“ in *AHS 72nd Annual Forum*, West Palm Beach, 2016.
- [9] „Guinness World Records,“ 2016. [Online]. Available: [http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/longest-rc-model-multicopter-flight-\(duration\)/](http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/longest-rc-model-multicopter-flight-(duration)/). [Zugriff am 8. August 2016].
- [10] FAI, „FAI Aeromodelling records,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.fai.org/ciam-records>. [Zugriff am 8. August 2016].
- [11] „Wikipedia,“ 2016. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Kreispackung_in_einem_Kreis. [Zugriff am 8. August 2016].
- [12] G. J. Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge University Press, 2006.
- [13] P. Henning, „<http://www.heli-planet.com>,“ 2016. [Online]. Available: http://www.heli-planet.com/auslegung_von_e_motoren.html. [Zugriff am 8. August 2016].
- [14] M. Orsag und S. Bogdan, „Influence of Forward and Descent Flight on Quadrotor Dynamics,“ in *Recent Advances in Aircraft Technology*, Rijeka, Croatia, InTech, 2012, pp. 141-156.
- [15] W. Matek, Maschinenelemente, Braunschweig: Vieweg, 1987.
- [16] D. Schlüter, Hubschrauber ferngesteuert, Necker Verlag, 2007.
- [17] FAA, „FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, FAA-H-8083-25A,“ USA, 2008.

- [1] R. Mac, „Bow To Your Billionaire Drone Overlord: Frank Wang's Quest To Put DJI Robots Into The