

SYSTEMIDENTIFIKATION VON KEROSIN-MODELL-TURBINEN FÜR DIE ANWENDUNG IN EINEM VTOL UAV

T. Müller*, V. Gollnick*

* Technische Universität Hamburg, Institut für Lufttransportsysteme, Harburger Schlossstr. 22a, 21079 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Am Institut für Lufttransportsysteme wird ein VTOL-UAV mit 22kg Abflugmasse entwickelt, das primär von zwei P130-RX-B Modelltriebwerken der Marke JetCat angetrieben wird. Um den Senkrechtstart des Fluggerätes zu ermöglichen, werden die Triebwerke entsprechend geschwenkt. Die mit Kerosin betriebenen Triebwerke mit einem max. Schub von 13,25 kg (130 N) weisen aufgrund des thermodynamischen Verbrennungsprozesses und der nicht einsehbaren Programmierung der Steuerelektronik Besonderheiten auf, die es zu quantifizieren gilt. Die Ermittlung des Betriebsverhaltens und der Systemdaten der Triebwerke für die Auslegung und Flugregelung stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit. Zur Ermittlung der Parameter und des Betriebsverhaltens in den jeweiligen Flugphasen und Betriebszuständen wird ein institutseigener modularer Schubprüfstand eingesetzt. Neben den Schubkennlinien sind auch Bodeneffekte Bestandteil der Messkampagne.

Keywords

Systemidentifikation, Modellturbine, Regelung, VTOL UAV, JetCat

1. MOTIVATION

Das Institut für Lufttransportsysteme (ILT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) arbeitet an einer Senkrechtstarter-Testplattform zur Erprobung verschiedener Nutzlasten, aber auch zur Entwicklung von Regelungskonzepten, insbesondere der Flugregelung. Ein Hauptziel dieses Flugkonzepts ist die Untersuchung der Einsatzfähigkeit schwenkbarer Verbrennungsantriebe für Drohnen. Der aktuelle Entwurf dieses VTOL-UAVs ist in Bild 1 dargestellt (Triebwerke sind blau hervorgehoben). Um senkrecht starten zu können, werden die beiden Triebwerke an den Flügelspitzen senkrecht nach unten geschwenkt. Zum Momentenausgleich wird ein drittes Hubtriebwerk in der Rumpfnase eingesetzt. Für den Reiseflug werden die Triebwerke in die Horizontale geschwenkt. Der Entwurf weist eine Spannweite von 2,5 m ohne Triebwerke auf, sowie eine max. Abflugmasse (MTOM) von 22 kg.

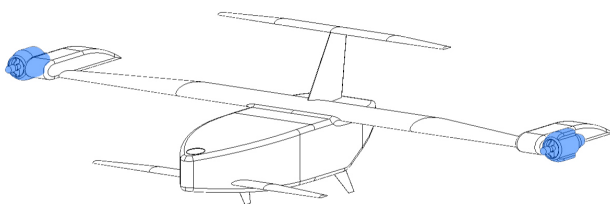


BILD 1. Aktueller Entwurf des VTOL UAV

Für die Hauptantriebe an den Flügelspitzen werden zwei P130-RX-BL Modelltriebwerke der Marke

JetCat [1] eingesetzt, die mit Kerosin betrieben werden. Typische Eigenschaften dieser Triebwerke sind neben den Herstellerangaben, dass sie je nach Umgebungsbedingungen unterschiedliche Schubniveaus liefern, nicht unerhebliche Totzeiten aufweisen und die Arbeitsweise der Steuerelektronik einer Blackbox ähnelt. Für die Entwicklung einer robusten Flugregelung ist es daher notwendig, die Triebwerke und ihr Betriebsverhalten genau zu kennen. Für die vorliegende Arbeit wird dafür ein modularer Prüfstand verwendet.

2. TRIEBWERKSKENNDATEN

Bei den Triebwerken, die hier betrachtet werden, handelt es sich um zwei P130-RX-BL der Marke JetCat. Diese sind anhand ihrer jeweiligen Seriennummern 1594 und 1595 unterscheidbar. Aus der Bezeichnung des Triebwerks kann der maximale Schub von 13,25 kg (130 N) abgelesen werden. RX steht für die Generation, BL für die *brushless* betriebene Kraftstoffpumpe. Das in Bild 2 dargestellte Triebwerk wurde unter anderem aufgrund seines Schub-Eigengewichtsverhältnisses $\frac{S}{G}$ von 10 ausgewählt (vgl. P80-SE $\frac{S}{G} \sim 7$). Weitere Kenndaten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Mit den Daten aus Tabelle 1 kann der Wirkungsgrad des Triebwerkes bestimmt werden. Bei Annahme eines Kerosin Heizwertes $H_{Kerosin}$ von 34,5 MJ/l ergibt sich zusammen mit der Dichte von Kerosin, die zwi-



BILD 2. JetCat P130-RX-BL [1]

Benennung	Einheit	Wert
Gewicht	kg	1,326
Durchmesser	mm	99
Länge	mm	284
@idle		
Schub	N	4
Kraftstoffverbrauch	ml/min	100
Drehzahl	1/min	40.000
@max		
Schub	N	130
Kraftstoffverbrauch	ml/min	441
Drehzahl	1/min	127.000
Abgastemperatur	°C	490-720
Abgasgeschwindigkeit	km/h	1560
Strahlleistung	kW	28,2

TAB 1. Kennzahlen des P130RX-BL aus [1]

schen 0,747-0,84 g/cm³ schwankt, nach Formel 1 folgende gravimetrische Energiedichte [2]:

$$(1) \quad E_{grav} = \frac{34,4 \text{ MJ/l}}{0,8 \text{ g/cm}^3} = 12 \text{ kWh/kg}$$

Die Wärmeleistung $\dot{Q}$ lässt sich zusammen mit dem maximalen Kraftstoffverbrauch $\dot{m}$ nach Formel 2 berechnen:

$$(2) \quad \dot{Q}_{max} = H_{Kerosin} \cdot \dot{m}_{max} = 253,58 \text{ kW}$$

Mit der Strahlleistung P_{Strahl} kann nun der Wirkungsgrad des Triebwerkes bestimmt werden. Setzt man diesen in Bezug zur Energiedichte des Kerosin erhält man die Energiedichte des Triebwerkes bei maximalem Schub:

$$(3) \quad \eta_{TW} = \frac{P_{Strahl}}{\dot{Q}_{max}} = 11,1\%$$

$$(4) \quad E_{TW} = E_{grav} \cdot \eta_{TW} = 1332,2 \text{ Wh/kg}$$

Die für Modelltriebwerke üblichen Wirkungsgrade resultieren im Wesentlichen aus dem verwendeten Radialverdichter und der einstufigen Turbine.

Trotz des geringen Wirkungsgrades zeigt sich hier ein Vorteil gegenüber batteriebetriebenen Systemen. Herkömmliche Lithium-Polymer-Batterien (Lipo) erreichen im Modellbereich Energiedichten von 140-180 Wh/kg [3] [4]. Daraus ergibt sich ein theoretischer Vorteil um den Faktor 7,5-9,5. Darin sind jedoch zusätzliche Peripherie- und Systemkomponenten wie Tanks, Kraftstoffpumpen, Startermotor etc. nicht berücksichtigt.

3. SCHWENKBARER SCHUBPRÜFSTAND

Der verwendete Schubprüfstand wurde am ILT speziell für die Messung dieser Anwendungen entwickelt und gebaut. Mit dem in Bild 3 dargestellten Prüfstand können Triebwerke mit einem maximalen Schub von 20 kg (196,2 N) vermessen werden. Die gesamte Messeinrichtung ist bis zu einer Höhe von 1,5 m verstellbar. Ein seitlich angebauter Schrittmotor mit Schneckengetriebe ermöglicht das Schwenken der gesamten Messeinrichtung. Somit können verschiedene Ausrichtungen des Motors, bspw. horizontal und vertikal, gemessen werden. Beliebige Zwischenstellungen mit einer Genauigkeit von 1° sind ebenfalls möglich und dynamisch während einer Schubmessung einstellbar.



BILD 3. Schwenkbarer Schubprüfstand

Für die Messung werden zwei Wägezellen mit einer Höchstlast von 20 kg verwendet. Diese sind in Abbildung 4 dargestellt. Der im Bild rechts markierte Sensor wird zur Messung der Schubkraft in Längsrichtung des Triebwerks verwendet. Zu diesem Zweck ist das Interface auf einer Linearschiene montiert. Der zweite Sensor ist orthogonal zum ersten ausgerichtet und kann über einen Drehpunkt auftretende Drehmomente messen. Die Abtastrate beider Sensoren beträgt 10 Hz.

Für die Erstinbetriebnahme wurden beide Sensoren direkt am Prüfstand mit zwei Prüfgewichten kalibriert. Diese Gewichte, ein 5 kg und ein 10 kg Gewicht, werden auch vor jedem Prüfstandslauf zur Überprüfung der Messeinrichtung eingesetzt. Dies gewährleistet, dass keine schleichenden Fehler bspw. durch Programmänderungen im Messprogramm und/oder Temperatureinflüsse die Messergebnisse verfälschen.

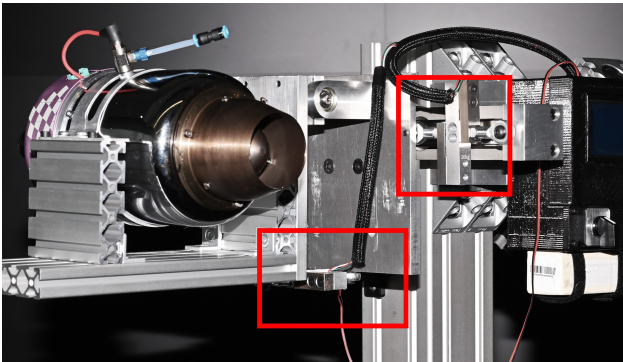


BILD 4. Wägezellen zur Messung von Schub und Moment

Die Genauigkeit der Messsensoren konnte auf 100 g bestimmt werden, was 0,7 % des maximal auftretenden Schubes entspricht. Dies resultiert hauptsächlich aus Messrauschen, aber auch aus Reibungseffekten durch die verwendete Linearschiene. Die Abweichungen sind für die geplante Anwendung akzeptabel.

Die Datenerfassung erfolgt über einen zentralen Mikrocontroller, der die Daten auf einer SD-Karte speichert. Zusätzlich können die Live-Daten über ein kleines Display direkt abgelesen werden. Folgende Daten werden pro Messreihe aufgezeichnet:

- fortlaufender Zeitstempel
- Winkelposition des Triebwerks
- Schub-Sollvorgabe der Funksteuerung
- Kraftmessung des 1. Sensors
- Momentenmessung des 2. Sensors

Die Umrechnung der Kraft des 2. Sensors in das vorhandene Moment erfolgt direkt im Mikrocontroller mit Hilfe der Hebelarmlänge.

Besonders wichtig ist die Aufzeichnung des Soll-Schubsignals zu Ist-Schubkraft, um nachträglich Totzeiten ermitteln zu können.

4. MESSKAMPAGNE

4.1. Sicherheitsmaßnahmen

Während eines Versuches wird am Prüfstand ein 5 l Tank mit einer Mischung aus Kerosin und Turbinenöl angebracht. Der Hersteller schreibt ein Mischungsverhältnis von 20:1 vor zur Schmierung der internen Keramiklager. Beim Umfüllen des Kraftstoffes werden Auffangbehälter verwendet um Kraftstofftropfen aufzufangen.

Als Brandschutz werden zwei Feuerlöscher verwendet:

- 2kg Kohlendioxid-Löscher
- 6kg ABC Pulverlöscher

Die beiden Feuerlöscher sind jeweils entsichert und in greifbarer Nähe zu platzieren. Beim Start eines Triebwerks kann eine größere Stichflamme entstehen, wenn zuvor Kerosin in die Brennkammer tropft, bspw. durch ein fehlerhaftes Spülen der Schlauchleitung.

Lärmetechnisch kann ein Triebwerk ca. 110dB Lautstärke in Abstand von 2m erreichen. Entsprechender Gehörschutz ist daher empfehlenswert.

Wenn der Triebwerksstrahl teilweise oder vollständig in Richtung Boden gerichtet ist, werden Steine, Sand und andere lose Gegenstände stark beschleunigt. Folglich ist das Tragen einer Schutzbrille Pflicht. Zudem sollte der Gefahrenbereich von unnötigem Equipment geräumt sein.

4.2. Versuchsplanung

Für die Messkampagne sind mehrere Messtage vorgesehen, die nicht direkt aufeinander folgen. Ziel der Unterbrechungen ist es, den Einfluss der Temperatur auf die Schubgrößen zu ermitteln. Nach den Erfahrungen aus [5] und [6] kann der Schub je nach Umgebungstemperatur zwischen 5 und 8 % schwanken. Ein Messtag hat für das jeweilige Triebwerk nachfolgende Ziele:

- Maximalschub ermitteln
- Totzeiten bei der Ansteuerung ermitteln
 - bei verschiedenen Schubleveln (10 % Schritte)
 - bei Wechsel von Idle auf Volllast
 - Steuergenauigkeit bestimmen
- Kraftstoffverbrauch ermitteln

Des Weiteren sind folgende Effekte zu bestimmen, die unabhängig vom Messtag bzw. der vorliegenden Temperatur ermittelt werden können:

- Einfluss der Temperatur
- Effekte bei wechselnder Orientierung
- Bodeneffekte in verschiedenen Messhöhen
- Bodenerosion und Einfluss
- Einfluss des Einlaufschutzes auf den Schub
- Einfluss wechselnder Peripherie

Termine & Wetterdaten

Die Umgebungsbedingungen zum Zeitpunkt des jeweiligen Außentests wurden mit Messmitteln vor Ort sowie lokalen Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes bestimmt und sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Die Tests liefern Daten zu Temperaturbereichen nahe des Gefrierpunktes, nahe der Standardtemperatur für Testläufe (15°C) und in einer sehr heißen Wetterumgebung.

Benennung	Einheit	Wert	
TW-Nr.		131-1595	131-1594
1.Außentest			
Datum		30.01.	31.01.
Wetter	-	bewölkt	wolkig
Temperatur	°C	2-3	3
Luftdruck	hPa	1007	1024
Luftdichte	kg/m ³	1,273	1,290
2.Außentest			
Datum		14.04.	14.04.
Wetter	-	wolkig & Wind	
Temperatur	°C	17-18	17-18
Luftdruck	hPa	1009	1009
Luftdichte	kg/m ³	1,208	1,208
3.Außentest			
Datum		01.07.	01.07.
Wetter	-	sonnig	
Temperatur	°C	29-30	30-31
Luftdruck	hPa	1016	1016
Luftdichte	kg/m ³	1,159	1,159

TAB 2. Termine & Wetterdaten Außentests

4.3. Auswertung 1.Außentest

Nachfolgend werden der Ablauf und die Ergebnisse eines Messdurchlaufes exemplarisch beschrieben. Das Vorgehen erfolgte simultan für andere Triebwerkorientierungen, Abstände zum Boden (Höhe) und an anderen Messtagen.

Bild 5 zeigt einen Ausschnitt einer Messreihe. Die gestrichelte Linie entspricht dem Vorgabesignal der Fernsteuerung, die blaue durchgängige Linie steht in diesem Fall für den gemessenen Schub. Das Triebwerk ist in diesem Ausschnitt bereits gezündet und stabilisiert im Idle. Aus dem Idle heraus wird im 1.Segment der Schub auf Volllast gesetzt. Die verzögerte Antwort ist hier deutlich erkennbar. Darauf folgt wieder aus dem Idle in Segment 2 eine stufenweise Erhöhung des Schubes in 10 % Schritten. Zu diesem Zweck wurde eine Rastung an der Steuerung installiert um die Schritte abzubilden. Der Stufentest erfolgt in beide Richtungen. Im 3.Segment wird ein Schubniveau frei eingestellt und sprunghaft variiert. Im letzten 4.Segment erfolgt eine Wiederholung des Sprung auf Maximalschub um evtl. Aufwärmprozesse durch Komponenten festzustellen.

Schubniveau

Zunächst werden die Schubpegel der beiden Triebwerke in einer Messhöhe von 1 m in Bild 6 betrachtet. Das dort erkennbare Schubdelta der Triebwerke zueinander beträgt je nach Ausrichtung zwischen 3,4 und 4,3 %. Dies entspricht einem Unterschied von etwa 500-600 g an Schub. Weiterhin ist zu erkennen, dass mit zunehmender Triebwerksschwenkung das Schubniveau max. 1 % reduziert wird.

Aufwärmefekte durch Komponenten konnten nicht erkannt werden.

Die Werte des ersten Außentests (2–3 °C) weichen vom Nennwert des Herstellers (130 N) ab. Das Delta

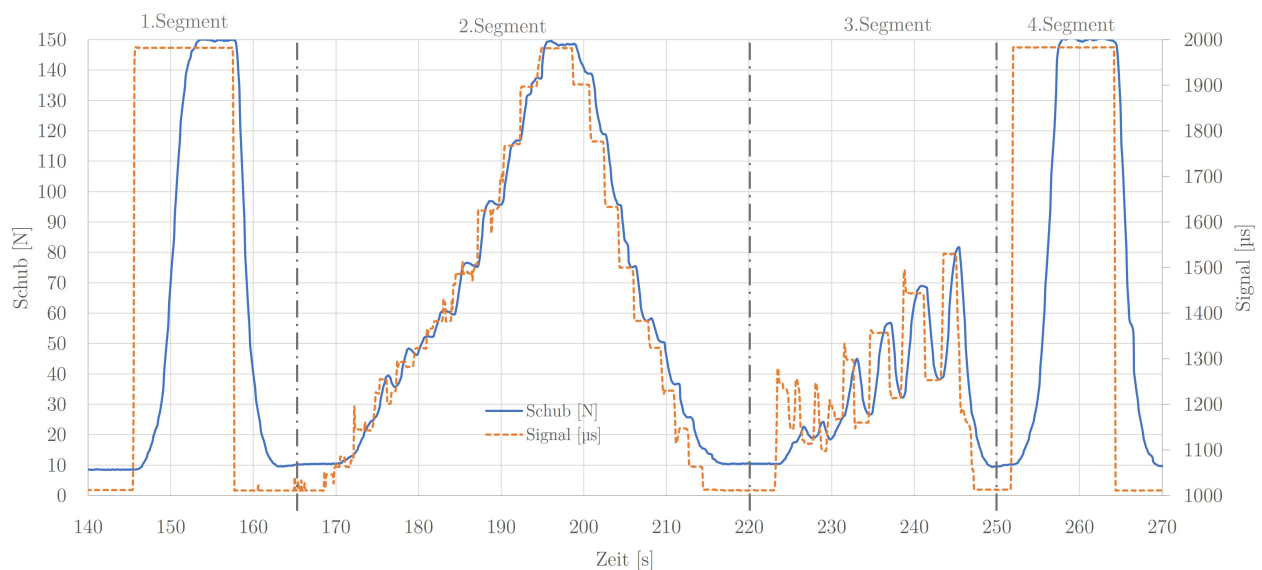


BILD 5. 1.Außentest 1595 mit Orientierung 0° und Höhe 1m

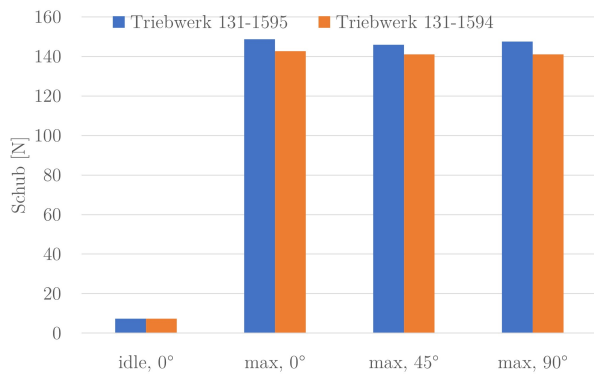


BILD 6. Schübe beim 1. Außentest, Höhe 1m

beträgt 14,4 % bzw. 9,7 % über dem Nennwert. Dies ist nachvollziehbar, da sich die Herstellerangabe vermutlich auf die Standardatmosphäre (15 °C) bezieht.

Totzeiten

Die Bestimmung der Totzeiten im Ansprechverhalten ist für die Auslegung der Regelung besonders wichtig. Meist wird hier eine Totzeit mit Hilfe eines PT2-Gliedes nachgebildet [7] [8]. Das in Bild 7 dargestellte Übertragungsverhalten wird durch die Verzögerungszeit T_u und die Anstiegszeit T_a beschrieben. Diese erhält man, indem man eine Tangente an den Wendepunkt des verzögerten Anstiegs legt. Zusätzlich kann das Verhältnis T_u/T_a verwendet werden, um eine Aussage über die Regelbarkeit zu treffen [8]. Ein Verhältnis kleiner als 1/10 (0,1) gilt als gut regelbar, 1/6 (0,17) als noch regelbar und 1/3 (0,33) als schwer regelbar.

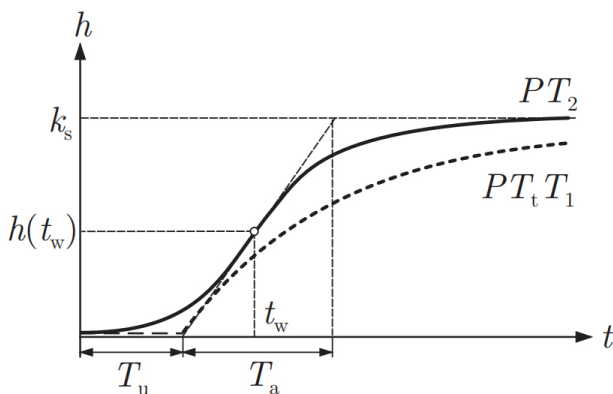


BILD 7. Übertragungsverhalten eines PT2-Gliedes [7]

Für die Auswertung werden die Segmente 1-3 aus Bild 5 analysiert. Die Auswertepunkte der jeweiligen Segmente sind in den Bildern 8, 9 und 10 dargestellt. Die Ergebnisse können der Tabelle 3 entnommen werden. Daraus ist ersichtlich, dass die Regelung bei direktem Wechsel vom Idle bis zur Volllast kaum regelbar ist. Für den Schwebeflug wird jedoch ein gewisses Mindestschubniveau benötigt, idealerweise im Bereich des ausgelegten MTOM des UAV. Daher können die Verzögerungszeiten der Segmente 2-3 für

die Auslegung des Flugreglers herangezogen werden. Aus den Verhältnissen T_u/T_a kann geschlossen werden, dass das System für diese Segmente noch regelbar ist.

Segment	1.	2.	2.	3.
		(Anstieg)	(Abstieg)	
T_u	2,73	0,27	0,26	0,31
T_a	3,47	1,00	1,13	1,25
T_u/T_a	0,79	0,27	0,23	0,25

TAB 3. Verzögerungs- & Anstiegszeiten des 1595

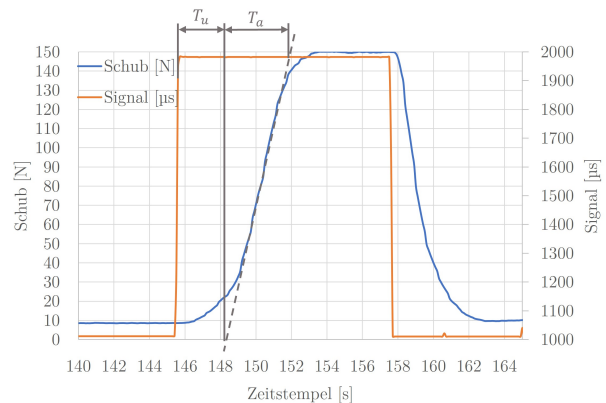


BILD 8. Totzeitenbestimmung 1.Segment

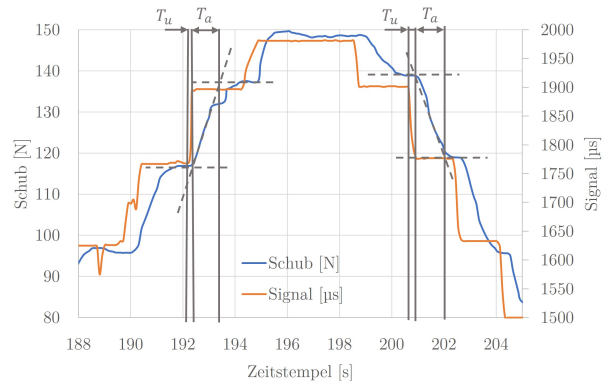
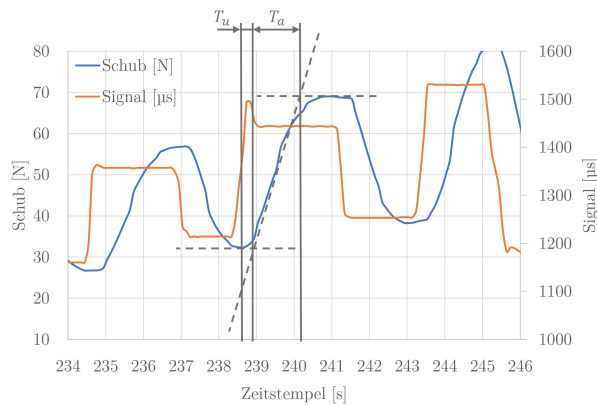


BILD 9. Totzeitenbestimmung 2.Segment

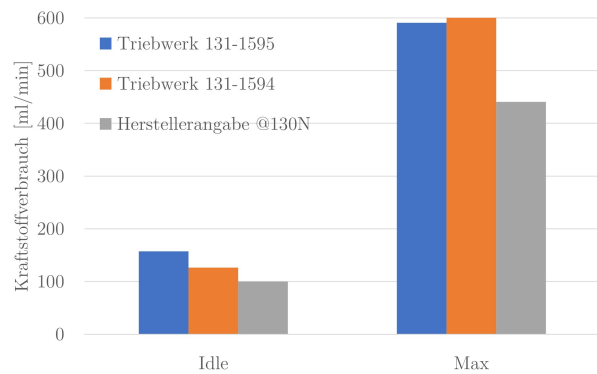
Kraftstoffverbrauch

Tendenziell liegt der Verbrauch bei beiden Turbinen über den Herstellerangaben, wie Bild 11 zeigt. Der maximale Verbrauch liegt bei beiden Triebwerken ca. 35 % über der Herstellerangabe. Die Herstellerangabe bezieht sich hingegen auf einen Schub von 130 N. Interpoliert man beide Schübe auf ein Schubniveau von 130 N ergeben sich dennoch Differenzen von +17 % für das 1595 und +25 % für das 1594.

Auffällig ist jedoch, dass der Verbrauch des 1594 höher ist als der des 1595, obwohl der Maximalschub des 1595 höher liegt. Der Einfluss des Wetters kann


BILD 10. Totzeitenbestimmung 3. Segment

in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden, da sich die Temperaturen und die Luftdichte zu den Testzeitpunkten um ca. 1,3 % unterscheiden.


BILD 11. Kraftstoffverbrauch, 1. Außentest, Orientierung 0°, Höhe 1m

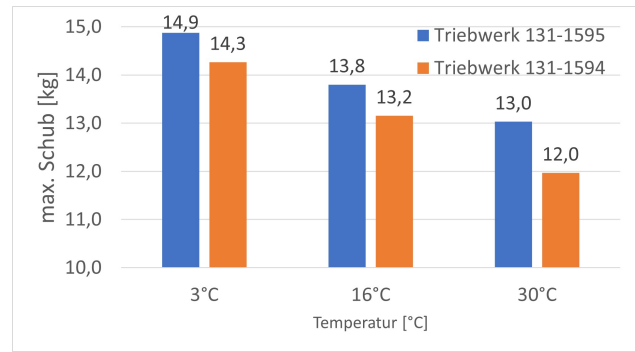
5. ERGEBNISSE

Einfluss der Temperatur

Durch die durchgeführte Messkampagne mit zeitlich versetzten Terminen konnte der Einfluss der Temperatur auf den Schub ermittelt werden. In Bild 12 sind die Ergebnisse entsprechend dargestellt. Es ist ersichtlich, dass beide Triebwerke im Temperaturbereich um 15 °C die vom Hersteller genannten 13,25 kg (130 N) Schub erreichen. Bei allen Tests wurde jedoch deutlich, dass das Triebwerk 1595 tendenziell mehr Schub als erforderlich leisten kann.

Betrachtet man die prozentuale Streuung der Messungen bezogen auf den zweiten Außentest (16 °C), so lässt sich für das 1595 ein Temperatureinfluss von +7,8/–5,6 % und für das 1594 von +8,4/–9,0 % bestimmen. Die maximale Differenz (3°C zu 30°C) wird für das 1595 mit 13,4 % und für das 1594 mit 17,5 % erreicht. Für die Auslegung eines VTOL ist dieses Delta folglich als zusätzliche Schubreserve aufzuschlagen.

Man kann aus den Analysen eine lineare Trendlinie bilden, die die Temperaturabhängigkeit mit einer Un-


BILD 12. Einfluss der Temperatur auf den Schub

genauigkeit von 200 g Schub ausdrückt. Die Ungenauigkeit bezieht sich auf den Gradienten des Temperatureinflusses. In Gleichung 5 ist dieser Zusammenhang dargestellt, wobei die Temperatur ϑ in [°C] eingegeben wird und der Schub S in [N] berechnet wird.

$$(5) \quad S(\vartheta) = -0,766 \cdot \vartheta + 145$$

Wird ein Triebwerk zuvor einmalig vermessen, berechnet sich entsprechend der Ordinatenabstand im Gleichung 5.

Der Treibstoffverbrauch ist nicht vom Temperatureinfluss abhängig und verhält sich quasi konstant. Jedoch liegt er bei beiden Turbinen stets über der Herstellerangabe. Im Leerlauf ist der Verbrauch bei beiden Triebwerken ca. 10 % höher. In den oberen Schubebenen liegt der Verbrauch 15–19 % höher. Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs wurde ein geeichter Messbecher verwendet, um während einer Messung bei unverändertem Schub die Zeiten und Füllstände erfassen zu können. Neben dem Maximalschub wurden auch andere Schublevel diesbezüglich untersucht.

Einfluss der Orientierung

Zur Bestimmung des Einflusses der Orientierung wurde die Schwenkeinheit am Prüfstand verwendet. Dabei schwenkt ein Schrittmotor mit Schneckengetriebe die gesamte Messeinheit inklusive laufendem Triebwerk. Die Aufteilung der Winkelschritte wurde auf 10° festgelegt. Nach jedem Winkelschritt verblieb das Triebwerk für zehn Sekunden in dieser Stellung. Die Winkelverstellung und die zeitliche Verschaltung erfolgten automatisch über das Messprogramm. Um den Messeinfluss durch das Eigengewicht der Einheit zu kompensieren, wurde eine Trockenmessung ohne laufendes Triebwerk durchgeführt.

Schließlich konnte festgestellt werden, dass die Orientierung keinen Einfluss auf den Schub hat.

Bodeneffekte

Zur Bestimmung der Bodeneffekte wurde das Triebwerk 1595 verwendet und vertikal geschwenkt. Die angegebenen Höhen sind jeweils vom Boden bis zum

Düsenaustritt gemessen. Bild 13 zeigt, dass der maximale Schub mit abnehmendem Abstand vom Boden abnimmt. Die maximale Abnahme beträgt -2 % bezogen auf 1 m Höhe. Die Abnahme wird auf Rezirkulationseffekte auf der Einlaufseite zurückgeführt.

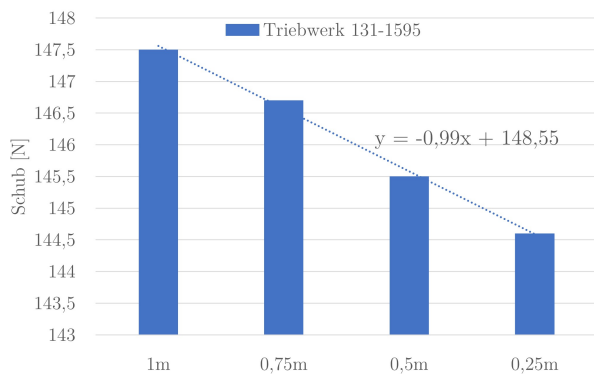


BILD 13. Bodeneffekt, 1. Außentest, Orientierung 90°

Bei der Messung in 0,25 m Höhe wurde eine deutliche Verfärbung der Betongewichte festgestellt (vgl. Bild 14). Eine Erosion der Betongewichte fand nicht statt, jedoch war sehr auffällig, dass die umliegenden Schottersteine willkürlich stark beschleunigt wurden. Außerdem hat sich der Aluminiumrahmen im Bodenbereich auf ca. 70-90°C erwärmt. Diese Erwärmung muss bei der Auslegung des UAV-Fahrwerks berücksichtigt werden.

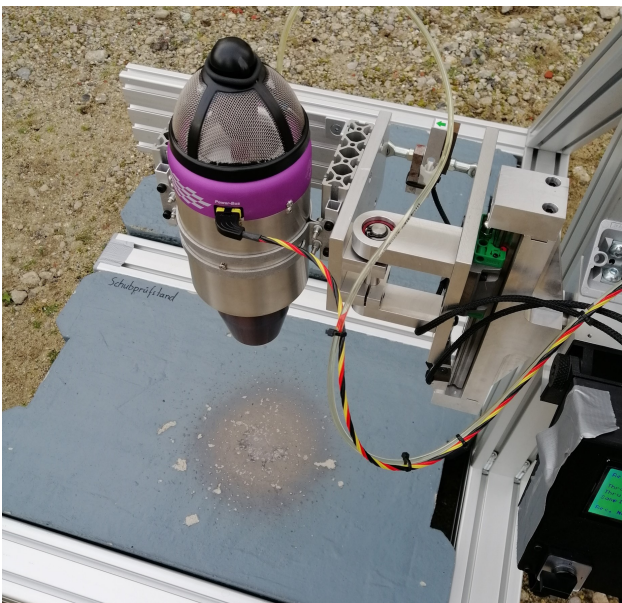


BILD 14. Bodeneinfluss bei 0,25m Höhe

Einfluss des Einlaufsschutzes

Das sogenannte JetNet ist ein feinmaschiges Schutzgitter, dass vor dem Einlauf des Verdichters montiert ist (vgl. Bild 14). Es verhindert das Einsaugen von kleinen Steinen, die je nach Größe auch zum Versagen des Triebwerkes führen könnten. Während der durchgeführten Messkampagne wurde bspw. der auf dem Messgelände vorhandene Schotterboden stark

aufgewirbelt bzw. wurden viele Steine weggeschleudert.

Der Einfluss des JetNet konnte auf ca. 200-400g Schubverlust bestimmt werden abhängig vom getesteten Triebwerk.

Einfluss Peripherie

Um die vorhandene Schubdifferenz zwischen den Modellen 1595 und 1594 weiter einzugrenzen, wurde die *Brushless* Kraftstoffpumpe während der Versuchsläufe ausgetauscht. Dazu wurde zunächst eine Referenzmessung durchgeführt, anschließend erfolgte der Wechsel der Kraftstoffpumpe. Ein Einfluss auf den Schub konnte nicht festgestellt werden.

Zudem wurde der Einfluss eines anderen Akkutyps auf die Kraftstoffpumpe untersucht. Der Hersteller erlaubt den Betrieb mit 2- bis 4-S-Lipo-Akkus. Für den Test wurde der Unterschied zwischen einem 2S- und einem 3S-Akku analysiert. Im resultierenden Schub konnte kein Unterschied festgestellt werden. Es konnte beobachtet werden, dass die verwendete 2S-Batterie jedoch schnell ein zu geringes Spannungsniveau erreichte, um das Triebwerk fehlerfrei zu zünden. Trotz einer Restkapazität von 34 % kam es häufiger zu Zündfehlern. Dies konnte bei Verwendung des 3S-Akkus nie beobachtet werden.

Um eine zum Zielkonzept passende Batterie besser auslegen zu können, wurde der Leistungsbedarf in verschiedenen Phasen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Phase	Einheit	Wert
Vorheizen	W	100
Anpumpen	W	70
Stabilisiert IDLE	W	5
@80N Schub	W	10

TAB 4. Stromverbrauch der ECU

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt war der Einfluss der Schlauchlänge auf den Schub und die Totzeiten. Für den Fall, dass im Flugzeugdesign die Kraftstoffpumpe im Rumpf platziert ist und die Schlauchleitung über den Flügel zum Triebwerk an der Flügelspitze gelegt wird. Dazu wurde ein etwa 2 m längerer Kraftstoffschlauch zwischen Pumpe und Brennkammer platziert. Ein Einfluss konnte nicht festgestellt werden. Zeitweise wurden beabsichtigt Blasen in den Kerosinkreis eingebracht. Dies führte zu einem erhöhten Rauschen (einige 100-200 g) im Schub, jedoch konnte kein Flame-out Ereignis ausgelöst werden.

6. FAZIT UND AUSBLICK

In der vorgestellten Arbeit wurden verschiedene Effekte und Einflussfaktoren auf zwei Modelltriebwerke der Marke Jetcat untersucht. Die wichtigsten Einflüsse umfassen die Schubdifferenzen der Triebwerke untereinander. Trotz aufeinanderfolgender Seriennummern konnte ein Schubdelta von bis zu 1,5 kg (14,7 N) festgestellt werden. Zudem unterliegen die Triebwerke starken Schwankungen des Maximalschubes, die von der Umgebungstemperatur abhängig sind. Dieser Effekt zeigt für jedes Triebwerk einen eigenen Gradienten, die tendenziell gleich verlaufen.

Die Bestimmung der Totzeiten hat darüber hinaus gezeigt, dass eine Regelung von Leerlauf auf Volllast nicht möglich ist. Die Totzeiten sind jedoch im Bereich des geplanten Schubniveaus noch regelbar durch die dortigen kürzeren Totzeiten.

Diese Aspekte sind folglich in der Flugregelung als auch im Systementwurf der Regelung zu berücksichtigen. Ein besonderer Fokus muss hier auf den Start gelegt werden, sodass die Triebwerke vor dem dazuschalten der Regelung ein bestimmtes Mindest-Schubniveau aufweisen.

Ein weiterer Punkt betrifft den Fall eines Triebwerkswechsels. Die gezeigten Ergebnisse zeigen, dass beim Einsatz eines neuen Triebwerks eine erneute Vermessung erforderlich ist. Diese muss jedoch zu unterschiedlichen Temperaturen erfolgen, um die Gradienten in Steigung und Höhe bestimmen zu können. Alternativ wäre es erforderlich, Kraftmesssensoren in die Flugzeugstruktur zu integrieren, um eine erneute Vermessung zu vermeiden. Dem stehen jedoch der Massenzuwachs und die höheren Kosten durch die zusätzliche Sensorik gegenüber.

Aufgrund der identifizierten Unterschiede und des schlechten Ansprechzeitverhältnisses ist die Regelbarkeit solcher Antriebe für die geplante Anwendung erschwert. Die Einsatzfähigkeit von multiplen, schwenkbaren Verbrennungsantrieben in Drohnenanwendungen muss daher kritisch betrachtet werden.

Die weitere Forschung wird sich auf die Vermessung angeströmter Triebwerke konzentrieren. Insbesondere soll das Verhalten der Triebwerke bei Schräganströmung untersucht werden. Im geplanten Entwurf sind die Triebwerke, die sich an den Flügelspitzen befinden, unmittelbar der anströmenden Luft ausgesetzt. Für die Retransition, also den Wechsel vom Horizontal- zum Schwebeflug, werden die Triebwerke bei hoher Fluggeschwindigkeit vertikal geschwenkt. Ein fataler Fehler in diesem Zustand wäre ein Flame-Out Ereignis, das zum Absturz des Fluggeräts führt. Daher ist die Untersuchung dessen priorisiert.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt wird auf die Nachmodellierung des Triebwerksverhaltens abzie-

len, um mit elektrischen Antrieben ein ähnliches Totzeitverhalten zu erzeugen. Der Hintergrund besteht darin, dass so kleinere Testträger in gleicher Flugzeugkonfiguration vorab getestet werden können. Dies erleichtert die Testprozedur und schützt die wesentlich teurere Hauptstruktur des Zielflugzeugs im Falle eines Absturzes.

Kontaktadresse:

Mail: thomas.mueller.ilt@tuhh.de , **Tel.** +49 40 42878 4447

Literatur

- [1] P130-RX-BL, jetcat.de, Zugriff am 20.01.2025, https://www.jetcat.de/de/productdetails/produkte/jetcat/produkte/RC%20ENGINES/Engines/p130_rx
- [2] Kerosin, chemie.de, Zugriff am 20.04.2022, <https://www.chemie.de/lexikon/Kerosin.html>
- [3] SLS LiPo Akkus für den RC-Modellbau, stefansliposhop.de, Zugriff am 20.04.2022, <https://www.stefansliposhop.de/akkus:::173.html>
- [4] Lithium-Polymer-Akkumulator, chemie.de, Zugriff am 20.04.2022, <https://www.chemie.de/lexikon/Lithium-Polymer-Akkumulator.html>
- [5] 30°C Außentemperatur und Turbinenschub ?, rc-network.de, Zugriff am 15.01.2025, <https://www.rc-network.de/threads/30%C2%B0c-au%C3%9Fentemperatur-und-turbinenschub.49127/>
- [6] JetCat P 80 Tuning, rc-network.de, Zugriff am 15.01.2025, <https://www.rc-network.de/threads/jetcat-p-80-tuning.11700/>
- [7] Lunze J., *Regelungstechnik 1*. 9.Auflage, Springer, 2013, Berlin
- [8] Samal E., Becker W. *Grundriss der praktischen Regelungstechnik*. 21.Auflage, Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2004, München