

# Analyse von Energieverbrauchsmodellen für elektrisch betriebene Transportdrohnen

Gazmend Mavraj\*, Yuzhuo Fu, Edvard Avdevicius, Detlef Schulz  
 Professur für Elektrische Energiesysteme  
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
 Hamburg, Deutschland  
 \*gazmend.mavraj@hsu-hh.de

**Kurzfassung** – Der Energieverbrauch ist eine entscheidende Einschränkung für den elektrischen Betrieb von Transportdrohnen. Der vorliegende Artikel stellt eine Übersicht verschiedener Drohnen-Energieverbrauchsmodelle unter Verwendung einheitlicher Notation dar. Hierbei werden relevante Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung mit der Konfiguration der Drohne analysiert. Die Modellergebnisse werden hinsichtlich dem Energieverbrauch pro Meter (Epm) derselben Drohnenkonfiguration während einer stationären Flugphase analysiert.

**Stichworte** – Drohne, UAV, Energiemodell, Energieverbrauch

## NOMENKLATUR

$\alpha$ in RAD	Anstellwinkel der Drohne
$A_k$ in $m^2$	Projizierte Fläche der Drohnenkomponente $k$
$C_{D_k}$	Luftwiderstandsbeiwert der Drohnenkomponente $k$
$D$ in N	Dynamischer Auftrieb
$d$ in m	Drohnen-Einwegfahrstrecke für einen einzelnen Transportflug
Epm in $\frac{J}{m}$	benötigte Energie für einen stabilen Drohnenflug pro Distanzeinheit
$\eta$	Übertragungseffizienz der Batterieleistung (von der Batterie zum Propeller)
$\eta_c$	Batterieladewirkungsgrad
$g$ in $\frac{m}{s^2}$	Ortsfaktor
i-LUM	innovative Luftgestützte Urbane Mobilität
$k$	Index der Drohnenkomponente (Drohnenkörper = 1, Batterie = 2, Nutzlast = 3)
$\kappa$	Faktor für induzierte Leistung
$\kappa_2$ in $\sqrt{\frac{m}{kg}}$	Faktor für Profilleistung
$\kappa_3$ in $\frac{1}{\sqrt{\frac{m}{kg}}}$	Faktor für Profilleistung in Verbindung mit Geschwindigkeit
$m_k$ in kg	Masse der Drohnenkomponente $k$

$n$	Anzahl der Rotoren
$P$ in Watt = $\frac{J}{s}$	Leistung, die benötigt wird, um einen stabilen Drohnenflug aufrecht zu erhalten
$P_{avio}$ in Watt	Benötigte Leistung für die gesamte Avionik der Drohne (unabhängig von der Drohnenbewegung)
$r$	Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand
$\rho$ in $\frac{kg}{m^3}$	Luftdichte
$T$ in N	Schubkraft
$t$ in s	Zeit
UAV	Unbemannte Luftfahrzeuge
$v_a$ in $\frac{m}{s}$	Fluggeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Drohne relativ zur Luft)
$v_i$ in $\frac{m}{s}$	induzierte Geschwindigkeit (die Änderung der Fluggeschwindigkeit nach dem Durchströmen eines Objekts)
$W$ in N	Gewichtskraft
$w$ in $\frac{J}{s}$	Downwash-Koeffizient
$\zeta$ in $m^2$	Aufgespannte Fläche der rotierenden Blattscheibe eines Rotors

## I. EINLEITUNG

Unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) haben sich zu einer ausgereiften Technologie entwickelt, die in Bereichen wie Landwirtschaft, Gesundheitswesen, Umweltmanagement, Lieferketten, Überwachung, Fotografie, Verteidigung, Suche und Rettung eingesetzt wird [1]. Transportdrohnen werden als Verfahren zum Liefern von Waren an Verbraucher oder zur Beförderung von Passagieren vorgeschlagen. Bei der Transportdrohne bestimmt der Energiebedarf der Drohne die wichtigsten Leistungskennzahlen für Reichweite, Kosten und Emissionen. Eine genaue Schätzung des Energieverbrauchs von Drohnen gewährleistet praktikable und effiziente Operationsentscheidungen.

Es besteht ein zunehmendes Interesse daran, dass UAVs zunehmend autonom operieren und Missionen durchführen [2]. Ein kritischer Aspekt der ordentlichen Missionsplanung

ist die Berücksichtigung des Energieverbrauchs der UAVs bei der Durchführung und Vollendung der Missionen. Viele Optimierungsmodelle, die Drohnen- oder LKW-Drohnen-Routen oder Drohnen-Transportsysteme entwerfen, berücksichtigen den Energieverbrauch jedoch nur indirekt als feste Grenze für die Flugzeit oder Reichweite [3]. Andere Forschungen zu Transportdrohnen beziehen Energie direkt in ein Energieverbrauchsmodell ein, das auf den grundlegenden physikalischen Kräften des Fluges basiert [4, 5, 6]. Einige dieser Drohnen-Energieverbrauchsmodelle sind mit nur wenigen Parametern recht einfach, während andere sehr komplex sind und aus mehreren voneinander abhängigen Komponenten bestehen, die detaillierte Darstellungen der Kräfte des Fluges und des Drohnedesigns liefern.

Im Folgenden beschränken wir uns auf batteriebetriebene Transportdrohnen. Die oben genannten verschiedenen Drohnenenergiemodelle können jedoch sehr unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf den Energieverbrauch derselben Transportvorgänge liefern, was zu großen Abweichungen in den modellierten Reichweiten und Emissionen führt.

Da sich die Drohnentechnologie schnell weiterentwickelt, wird in dem HamburgX-Projekt „innovative Luftgestützte Urbane Mobilität“ (i-LUM) unter anderem das Ziel angestrebt, das Verständnis des Energieverbrauchs von Drohnen zu erweitern und in die bodengebundene Infrastruktur zu verknüpfen [7].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher eine Analyse von Parametern und weiteren Einflussfaktoren verschiedener Drohnen-Energieverbrauchsmodelle durchzuführen, um in zukünftigen Schritten einen kollektiven Vergleich der Energieverbrauch-Modelle für die verschiedenen Drohrentypen, Nutzlasten, Geschwindigkeiten uvm. zu ermöglichen und validieren zu können.

In Abschnitt II werden daher zunächst ganz allgemein Einflussfaktoren, die den Energieverbrauch einer Drohne beeinflussen, in Kategorien zusammengefasst. Abschnitt III untersucht verschiedene physikalische Modelle aus der Literatur zur Abschätzung des Energieverbrauchs von Drohnen unter Verwendung einer einheitlichen Notation. In Abschnitt IV erfolgt eine Ergebnisanalyse der jeweiligen Energiemodelle. In Abschnitt V werden die Ergebnisse zusammengefasst.

## II. EINFLUSSFAKTOREN ZUR MODELLIERUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS VON DROHNEN

Eine Drohne verwendet Energie zum Fliegen, indem sie Schub- und Auftriebskräfte erzeugt, um die Gewichts- und Widerstandskräfte zu überwinden. Insbesondere sind die Fluggeschwindigkeit, die Nutzlast, das Drohnen- und Batteriegewicht wichtige Determinanten für den Energieverbrauch einer Drohne [8].

Einflussfaktoren, die den Energieverbrauch von Drohnen beeinflussen, können nach Demir et al. [9] in vier Kategorien eingeteilt werden: Drohnenkonfiguration, Umgebung, Drohndynamik und Transportbetrieb. Wichtige Einflussfaktoren sind den vier Kategorien in ABBILDUNG 1 zugeordnet.

Konfiguration	Umgebung	Dynamik	Transportbetrieb
Drohngewicht	Luftdichte	Geschwindigkeit	Gewicht der Nutzlast
Drohngroße	Gravitation	Bewegung (Start, Landung, Schweben, Horizontalflug)	Größe der Nutzlast
Anzahl der Rotoren	Windbedingungen	Beschleunigung	„Leergewicht“ nach Transport
Größe der Rotoren	Wetter (Regen, Schnee, etc.)	Startwinkel	Flottengröße
Batteriegewicht	Temperatur	Anstellwinkel	Anzahl der Transporte pro Flug
Energiekapazität der Batterien	Betriebs-Vorschriften	Flughöhe	Zustellart
Effizienz der Kraftübertragung			Gebiet der Serviceregion
Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand			

ABBILDUNG 1: FAKTOREN, DIE DEN ENERGIEVERBRAUCH EINER DROHNE BEEINFLUSSEN (IN ANLEHNUNG AN [8, 9]).

Zu den Konfigurationsfaktoren von Drohnen gehören das Gewicht und die Größe des Drohnenkörpers, die Anzahl und Größe der Rotoren, das Gewicht, die Größe und die Energiekapazität der Batterie, die Effizienz der Kraftübertragung, die maximale Geschwindigkeit und Nutzlast und das Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand.

Zu den Umgebungsfaktoren gehören Luftdichte, Schwerkraft, Windverhältnisse, Wetter (Schnee, Regen), Umgebungstemperatur und Betriebsvorschriften.

Zu den Faktoren der Drohndynamik gehören Drohnenfluggeschwindigkeit, Drohnenbewegung (d. h. Start, Landung, Schweben, Horizontalflug), Beschleunigung/Verzögerung, Anstellwinkel und Flughöhe.

Zu den Faktoren des Transportbetriebs gehören Gewicht und Größe der Nutzlast, „leere Rücksendungen“ (d. h. die Rückfahrt nach dem Transport erfolgt ohne Nutzlast), Flottengröße, die Anzahl der Transporte pro Flug, die Zustellart und das Gebiet der Serviceregion.

Einige dieser Faktoren werden durch das Drohnedesign bestimmt oder begrenzt (z. B. maximale Nutzlast, projizierte Fläche der Drohne), andere sind Betriebsfaktoren, die für ein bestimmtes Drohnedesign variieren können (z. B. Geschwindigkeit) und wieder andere sind externe Faktoren (z. B. Wetter) [10]. Darüber hinaus sind viele dieser Faktoren während eines Drohnenverkehrs voneinander abhängig und dynamisch. Unsicherheiten bei der Schätzung des Energieverbrauchs von Drohnen können aus all diesen Faktoren resultieren. Näheres zu den Einflussfaktoren, die relevant für den Energieverbrauch von Drohnen sind, finden sich in dem Werk von Beigi et al. [10].

## III. ENERGIEMODELLE FÜR DROHNEN

In diesem Abschnitt werden Drohnenenergiemodelle vorgestellt, die in der Literatur häufig zitiert und verwendet werden [8]. Hierbei beschränken wir uns auf fünf grundlegende Modelle für den Energieverbrauch von Drohnen im stationären Horizontalflug (schweben), nämlich das Energiemodell nach Stolaroff et al. [4], nach Kirchstein [5], nach Dorling et al. [6], D’Andrea et al. [11] und nach Tseng et al. [12]. Zu jedem Modell wird die entsprechende Formel für die Leistung  $P$  in einheitlicher Notation angegeben.

Die für einen gleichmäßigen Flug über eine Distanz  $d$  verbrauchte Energie ist die Leistung multipliziert mit der Flugzeit  $\frac{d}{v_a}$ , somit gilt für die Energie pro zurückgelegtem Meter (Epm):

$$\text{Epm} = \frac{P \cdot t}{d} = \frac{P \cdot \frac{d}{v_a}}{d} = \frac{P}{v_a} \quad (1)$$

Die Energieverbrauchsrate  $\text{Epm} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Geschwindigkeit}}$  (in Joule/Meter) ermöglicht somit die Modelle untereinander zu vergleichen. Bei der Angabe der Energieverbrauchsrate werden bewusst einige zulässige Annahmen und Modifikationen so getroffen, dass ein Vergleich der Modelle in deren Gültigkeitsbereich maximal möglich wird (zum Beispiel: Leistungsverbrauch für die Drohnen-Avionik oder Windgeschwindigkeit werden auf Null gesetzt, da nicht jedes Modell diesen Parameter berücksichtigt).

#### A. Energiemodell nach D'Andrea

Das Energiemodell von D'Andrea [11] basiert auf dem Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand der Drohne. Die Formel ist für einen gleichmäßigen Drohnenflug optimiert und nutzt die Masse der Drohne, die Fluggeschwindigkeit, das Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand und die Leistungsübertragungseffizienz der Batterie. Das Modell macht mehrere Annahmen, um sein Energieverbrauchsmodell zu erstellen. Die Nutzlast der Drohne ist nicht schwerer als 2 kg und hat eine Reichweite von 10 km. Ein Auftriebswiderstandsverhältnis mit einem konstanten Wert wird ausgewählt. Die Leistungsübertragungseffizienz wird auf 0,5 festgelegt. Eine Konstante  $P_{\text{avio}}$  wird hinzugefügt, um die Avionik zu berücksichtigen. Die Leistung beträgt

$$P = \frac{(\sum_{k=1}^3 m_k) \cdot g \cdot v_a}{r \cdot \eta} + P_{\text{avio}}, \quad (2)$$

wobei  $m_k$  die Masse jeder Drohnenkomponente darstellt, nämlich das Drohngewicht ( $k = 1$ ), das Batteriegewicht ( $k = 2$ ) und das Nutzlastgewicht ( $k = 3$ ). Mit  $v_a$  wird die Fluggeschwindigkeit der Drohne angegeben. Mit  $\eta$  wird die Leistungsübertragungseffizienz, mit  $r$  das Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand und mit der Konstante  $P_{\text{avio}}$  die für die Drohnen-Avionik erforderliche Leistung bezeichnet.

Für dieses Modell gilt die Energieverbrauchsrate

$$\text{Epm} = \frac{g \cdot (m_1 + m_2 + m_3)}{r \cdot \eta} + \frac{P_{\text{avio}}}{v_a}. \quad (3)$$

#### B. Energiemodell nach Dorling

Das Dorling-Energiemodell [6] berücksichtigt nur das Schweben der Drohne und kann daher den Energieverbrauch für Start, Reiseflug und Landung nicht detailliert beschreiben. Dieses Modell berücksichtigt jedoch die in der Drohne verwendeten Komponenten wie die Anzahl der Rotoren und die aufgespannte Fläche der Rotorblätter. Neben den Massenkomponenten  $m_k$  der Drohne, werden der Ortsfaktor ( $g$ ), die Luftdichte ( $\rho$ ), die Anzahl der Rotoren ( $n$ ) und die aufgespannte Blattfläche ( $\zeta$ ) als Parameter verwendet. Es gilt für die Leistung

$$P = \frac{(g \cdot \sum_{k=1}^3 m_k)^2}{\sqrt{2 \cdot n \cdot \rho \cdot \zeta}} \quad (4)$$

und für die modifizierte Energieverbrauchsrate (inklusive der Leistungsübertragungseffizienz der Batterie zum Propeller)

$$\text{Epm} = \frac{\sqrt{(g \cdot (m_1 + m_2 + m_3))^2}}{\eta \cdot v_a \cdot \sqrt{2 \cdot n \cdot \rho \cdot \zeta}}. \quad (5)$$

#### C. Energiemodell nach Stolaroff

Das Stolaroff-Energiemodell [4] berücksichtigt die Physik des Drohnenflugs, einschließlich der Kräfte, denen die Drohne aufgrund ihres Gewichts, des Widerstands und des induzierten Widerstands ausgesetzt ist. Das Modell besteht aus dem erzeugten Schub ( $T$ ), dem Anstellwinkel ( $\alpha$ ), der Leistungsübertragungseffizienz ( $\eta$ ) und der durch die Drohne verursachten induzierten Geschwindigkeit ( $v_i$ ). Die Leistung beträgt

$$P = \frac{T(v_a \cdot \sin(\alpha) + v_i)}{\eta}, \quad (6)$$

mit  $T = W + D = g \cdot \sum_{k=1}^3 m_k + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{k=1}^3 C_{Dk} A_k v_a^2$ , dem Luftwiderstandsbeiwert  $C_{Dk}$  und der projizierten Fläche senkrecht zur Fahrt jeder Drohnenkomponente  $A_k$ . Der Anstellwinkel wird ermittelt durch  $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{D}{W}\right)$  und die induzierte Geschwindigkeit  $v_i$  wird über die numerische Lösung von  $v_i = \frac{g \cdot \sum_{k=1}^3 m_k}{2 \cdot n \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \sqrt{(v_a \cdot \cos(\alpha))^2 + (v_a \cdot \sin(\alpha) + v_i)^2}}$  ermittelt.

Für die zugehörige Energieverbrauchsrate gilt

$$\text{Epm} = \frac{T \cdot (v_a \cdot \sin(\alpha) + v_i)}{\eta \cdot v_a}. \quad (7)$$

#### D. Energiemodell nach Tseng

Das Tseng-Energiemodell [12] unterscheidet sich von den anderen Energiemodellen dadurch, dass es aus einem nichtlinearen Regressionsmodell mit neun Termen besteht, das aus gesammelten Daten erstellt wurde. Dieses Modell wurde aus horizontalen und vertikalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, Nutzlast, Masse und Windgeschwindigkeitsdaten erstellt, die aus empirischen Tests gewonnen wurden.

Für eine kleine Drohne wird die modifizierte Leistung mit dem Regressionsmodell mit der Nebenbedingung  $v_a \leq 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  approximiert durch

$$P = -2,595 \cdot v_a + 0,197 \cdot m_3 + 251,7. \quad (8)$$

Für die Energieverbrauchsrate folgt dementsprechend

$$\text{Epm} = -2,595 + \frac{0,197 \cdot m_3 + 251,7}{v_a}. \quad (9)$$

#### E. Energiemodell nach Kirchstein

Das Kirchstein-Energiemodell [5] basiert auf den Umgebungsbedingungen und der Flugbahn der Drohne. Es ist ein weiteres Komponentenmodell mit Fokus auf optimiertem Startwinkel, Reiseflughöhe, Horizontalflug, Sinkflug und Landung. Dieses Modell berücksichtigt eine Vielzahl von Faktoren, wie z. B. die zum Steigen erforderliche Leistung,

Avionik und unterschiedliche Leistungsverluste, die sich aus Ineffizienzen des Elektromotors und der Kraftübertragung ergeben. Das Modell deckt den Stromverbrauch durch den Luftwiderstand aus dem Profil der Drohne und dem Rotorprofil, den für den Flug erforderlichen Auftrieb, den Aufstieg auf die vorgesehene Höhe und die Stromversorgung jeglicher Elektronik an Bord ab. Für die Leistung gilt

$$P = \frac{1}{\eta} \cdot \left( \kappa T w + \frac{1}{2} \rho \left( \sum_{k=1}^3 C_{D_k} A_k \right) v_a^3 + \kappa_2 \left( g \sum_{k=1}^3 m_k \right)^{\frac{3}{2}} + \kappa_3 \left( g \sum_{k=1}^3 m_k \right)^{\frac{1}{2}} v_a^2 \right) + \frac{P_{\text{avio}}}{\eta_c}, \quad (10)$$

wobei  $\kappa$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  Konstanten sind,  $w$  ist der Downwash-Koeffizient und  $\eta_c$  ist die Batterieladeeffizienz. Im Schwebезustand gilt für dieses Modell  $T = \sqrt{W^2 + D^2}$  (mit den Hilfsvariablen  $W$  und  $D$  aus Gleichung (6)). Den Downwash-Koeffizienten  $w$  erhält man aus der numerischen Lösung der Gleichung  $w = \frac{T}{2 \cdot n \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \sqrt{(v_a \cdot \cos(\alpha))^2 + (v_a \cdot \sin(\alpha) + w)^2}}$ .

Somit folgt für die Energieverbrauchsrate

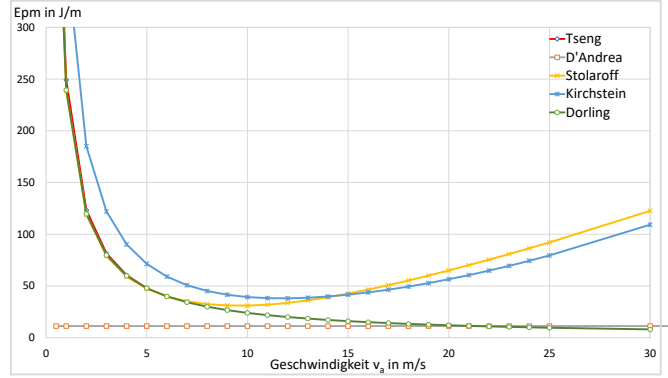
$$\text{Epm} = \frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{\kappa T w}{v_a} + \frac{1}{2} \rho \left( \sum_{k=1}^3 C_{D_k} A_k \right) v_a^2 + \frac{\kappa_2 (g \sum_{k=1}^3 m_k)^{\frac{3}{2}}}{v_a} + \kappa_3 \left( g \sum_{k=1}^3 m_k \right)^{\frac{1}{2}} v_a \right) + \frac{P_{\text{avio}}}{\eta_c \cdot v_a}. \quad (11)$$

#### IV. ERGEBNISSE

In ABILDUNG 2 werden die Energieverbräuche einer kleinen Drohne pro Meter miteinander verglichen. Größere Drohnen sind für einige Modelle nicht zulässig ([6, 8, 12]). Es werden folgende Input-Parameterwerte festgelegt, die für alle Modelle zulässig sind:  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $\eta = 0,75$ ,  $\eta_c = 1,25$ ,  $n = 4$ ,  $\zeta = 0,0507 \text{ m}^2$ ,  $m_1 = 1,07 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 1 \text{ kg}$ ,  $m_3 = 0,5 \text{ kg}$ ,  $A_1 = 0,0599 \text{ m}^2$ ,  $A_2 = 0,0037 \text{ m}^2$ ,  $A_3 = 0,0599 \text{ m}^2$ ,  $C_{D_1} = 1,49$ ,  $C_{D_2} = 1$ ,  $C_{D_3} = 2,2$ ,  $r = 3$ ,  $P_{\text{avio}} = 0 \text{ Watt}$ ,  $\kappa = 1$ ,  $\kappa_2 = 0,8 \sqrt{\frac{\text{m}}{\text{kg}}}$ ,  $\kappa_3 = 0,0044 \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{m}}{\text{kg}}}}$ .

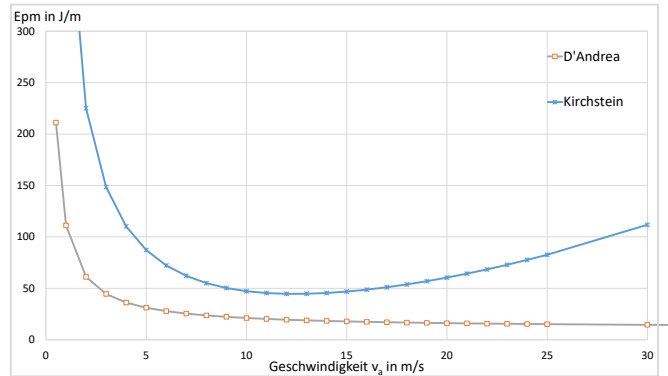
Für kleine Geschwindigkeiten  $v_a \leq 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  stimmen die Energieverbrauchsrate von Tseng, Stolaroff und Dorling gut überein. Es gibt große Abweichungen zu den restlichen Modellen. Durch die Annahme, dass  $P_{\text{avio}} = 0 \text{ Watt}$  gilt, ist das Modell für diesen Fall von D'Andrea völlig ungeeignet.

Für größer werdende Geschwindigkeiten driften die Modelle von Stolaroff und Dorling stärker auseinander.



ABILDUNG 2: ENERGIEVERBRAUCH EINER DROHNE PRO ZURÜCKGELEGTER STRECKE BEI VERSCHIEDENEN GESCHWINDIGKEITEN. DIE LEISTUNG FÜR DIE AVIONIK WIRD VERNACHLÄSSIGT.

In ABILDUNG 3 werden die Modelle von Kirchstein und D'Andrea, die beide die Leistung für die Drohnen-Avionik berücksichtigen, miteinander verglichen. Es gelten dieselben Input-Parameterwerte wie in ABILDUNG 2, jedoch beträgt nun  $P_{\text{avio}} = 100 \text{ Watt}$ . Selbst unter dieser Annahme gibt es eine große Diskrepanz zwischen diesen Modellen.



ABILDUNG 3: ENERGIEVERBRAUCH EINER DROHNE PRO ZURÜCKGELEGTER STRECKE BEI VERSCHIEDENEN GESCHWINDIGKEITEN. DIE LEISTUNG FÜR DIE AVIONIK BETRÄGT HIER  $P_{\text{avio}} = 100 \text{ Watt}$ .

#### V. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel wurde eine Übersicht von wichtigen Energieverbrauchsmodellen für den Drohnentransport bereitgestellt. Es wurden wichtige Faktoren, die den Energieverbrauch von Drohnen beeinflussen, sowie die unterschiedlichen Annahmen in den Drohnen-Energiemodellen, hervorgehoben. Die Ergebnisse zeigen große Unterschiede in den Energieverbrauchsrate für ein und dieselbe Drohne. Dies unterstreicht die Notwendigkeit weiterer Forschung, um genauere Parameterwerte für verschiedene Arten von Transportdrohnen zu erzielen, indem die Ergebnisse mit empirischen Daten verglichen werden, die aus umfassenden Realtestversuchen beim Drohnentransport stammen.

#### VI. DANKSAGUNG

Das Projekt „innovative Luftgestützte Urbane Mobilität“ (i-LUM) wird durch die Landesforschungsförderung Hamburg im Rahmen der HamburgX-Projekte gefördert.

## LITERATUR

- [1] H. Landrock, A. Baumgärtel, "Die Industriedrohne – der fliegende Roboter: Professionelle Drohnen und ihre Anwendung in der Industrie 4.0", Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [2] K.P. Valavanis, G.J. Vachtsevanos, "UAV Mission and Path Planning: Introduction". In: K. Valavanis, G. Vachtsevanos (Hrsg.), "Handbook of Unmanned Aerial Vehicles", Dordrecht: Springer, 2015.
- [3] C.C. Murray, A.G. Chu, "The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 54, 86–109, 2015.
- [4] J.K. Stolaroff, C. Samaras, E.R. O'Neill, A. Lubers, A.S. Mitchell, D. Ceperley, "Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery", *Nat. Commun.* 9 (1), 409, 2018.
- [5] T. Kirchstein, "Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services", *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 78, 1–18, 2020.
- [6] K. Dorling, J. Heinrichs, G.G. Messier, S. Magierowski, "Vehicle routing problems for drone delivery", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 47 (1), 70–85, 2017.
- [7] HamburgX-Projekt „Innovative Luftgestützte urbane Mobilität (i-LUM)“ [Online]. Available: <https://i-lum.de/>. [Zugriff am 10. Oktober 2022]
- [8] J. Zhang, J.F. Campbell, D.C. Sweeney II, A.C. Hupman, "Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 90, 102668, 2021.
- [9] E. Demir, T. Bektas, G. Laporte, "A review of recent research on green road freight transportation", *Eur. J. Oper. Res.* 237 (3), 775–793, 2014.
- [10] P. Beigi, M. Sadra Rajabi, S. Aghakhani, "An Overview of Drone Energy Consumption Factors and Models", <http://arxiv.org/abs/2206.10775v2>, 2022.
- [11] R. D'Andrea, "Guest editorial can drones deliver?", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 11 (3), 647–648, 2014.
- [12] C-M.Tseng, C-K. Chau, K. Elbassioni, K. and M. Khonji, "Autonomous recharging and flight mission planning for battery-operated autonomous drones", arXiv:1703.10049, 2017.