

DRONE DECARBONISATION

G. Strickert, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Institut für Flugsystemtechnik,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Unbemannte Luftfahrzeuge versprechen Lösungen für viele drängende Probleme der Gegenwart und entwickeln sich sehr dynamisch hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten und technologischen Reife. Um Programme wie den Green Deal (EU) oder Gesetze mit Bezug zu Umwelt- und Klimaschutz (z.B. das Bundes-Klimaschutzgesetz Deutschland) umzusetzen, ist auch diese aufstrebende Technologie grundlegend bezüglich ihrer Wirksamkeit auf CO₂ Emissionen zu bewerten. Die vorliegende Arbeit trägt zu dieser Bewertung der Drohnentechnologie und ihrer Anwendungen bei. Dafür wird zunächst grob abgeschätzt, wie groß der Anteil der menschenverursachten CO₂ Übergänge in die Atmosphäre durch den Betrieb von Drohnen in Deutschland ist. Anschließend rückt der CO₂ Fußabdruck der Drohne selbst, also Herstellung, Transport und Nutzung in den Mittelpunkt. Anhand der Komponenten Avionik und Akku sowie pauschaler Betrachtungen für Konsumgüter werden die Haupteinflüsse beleuchtet. Es folgt eine systematische Aufstellung der Möglichkeiten zur CO₂ Einsparung bei und mittels Drohnen. Dafür wird das sog. A-S-I-Schema erweitert um direkte und indirekte Einspareffekte. Alle 6 grundsätzlichen Möglichkeiten werden erläutert, bewertet und mit Beispielen unterfüttert. Die vielversprechendsten Optionen für CO₂ Einsparungen finden sich in der Zusammenfassung.

1. EINORDNUNG DER DROHNE IN CO₂ KREISLÄUFE

Weltweit werden jährlich ca. 210 Gt Kohlenstoff in einem Gleichgewichtsprozess zwischen Atmosphäre, Boden und Meeren ausgetauscht. Der Mensch stört diesen Gleichgewichtsprozess, insbesondere durch das Verbrennen fossiler Energieträger, mit zusätzlichen 5,1 Gt, die sich in der Atmosphäre anreichern, und 2,5 Gt, die die Meere versauern [1].

Mit dem Massenverhältnis von CO₂ zu Kohlenstoff von 24/12 = 3,67 folgt daraus, dass sich in der Atmosphäre derzeit ca. 18,7 Gt / Jahr CO₂ anreichern.

Für Deutschland werden die CO₂ Emissionen mit derzeit 762 Millionen Tonnen angenommen [2], also ca. 4,1% der weltweiten Gesamtemission.

Von diesen 4,1% sind laut [3] die größten Verursacher die

- Erzeugung von Industrieprozesswärme (15,4%)
- Erzeugung von industriell genutztem Strom (15,1%)
- Betrieb von PKW und Nutzfahrzeugen (11%)

Auf Platz 12 der größten Verursacher folgt der Flugverkehr, mit 3,2%.

Im Flugverkehr spielen derzeit Drohnen vom Umfang eine eher untergeordnete Rolle. Beispielsweise der Anteil der Beschäftigten der unbemannten Luftfahrt an der Gesamtluftfahrt beträgt laut [4] und [5] ca. 1,6 % (14000 zu 848700 Beschäftigte).

Der Anteil der weltweiten CO₂ Emissionen durch deutsche Drohnen liegt nach dieser groben Abschätzung bei ca. $(0,041 \cdot 0,032 \cdot 0,016 =) 0,021$ ‰. Er liegt damit auf dem Niveau des CO₂ Ausstoßes einer sportlichen Großveranstaltung wie z.B. der Tour de France [6].

Die momentane Bedeutung des Einsatzes von Drohnen in Deutschland für den weltweiten CO₂ Ausstoß ist also eher gering, es bieten sich kaum Einsparpotentiale für eine signifikante Verbesserung der Gesamtbilanz. Wenn man allerdings die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens mit Erwärmungen von 1,5-2°C gegenüber 1990 einhalten will, so bedeutet das eine zwingende Reduktion des CO₂ Ausstoßes gegenüber 1990 um 40,8% [1]. Ein Handeln ist hier auf allen Ebenen erforderlich [7], [8], das Thema darf durch verantwortlich handelnde Drohnenhersteller und -betreiber nicht vernachlässigt werden. Über Hebelwirkungen kann sich ein potentiell positiver Effekt der Nutzung unbemannter Luftfahrzeuge dann auch auf weitere Industrien und Technologien auswirken.

2. CO₂ FUßABDRUCK

Die Bestimmung des sog. CO₂ Fußabdrucks, also aller in der Lebensdauer eines Produktes erzeugten CO₂ Emissionen, ist komplex und mit vielen Unsicherheiten und Annahmen behaftet. Eine komplette sog. Lebenszyklusanalyse gemäß z.B. [9] ist für Drohnen in der Literatur oder seitens der Hersteller bislang nicht zu finden.

Als Einstieg in die Thematik wird daher zunächst der CO₂ Fußabdruck einer Drohne durch Betrachtung seiner Hauptkomponenten Avionik und Akkus angenähert. Diese Betrachtungen werden ergänzt durch die exemplarischen Abschätzungen eines Entwicklers für Dekarbonisierungsprojekte bzw. sog. Carbon Finance Produkte, South Pole (www.southpole.com). Dieser bemisst verursachte CO₂ Emissionen hauptsächlich anhand des Versandgewichts

einer Drohne, inklusive Fernsteuerung, Wechselakku und aller übrigen Einzel- und Ersatzteilen.

2.1. Avionikkomponenten

Die Minimalausstattung einer Drohne mit Bordrechner, Datenlinks, Beschleunigungs- und Drehratensensorik, GNSS Navigationsempfänger, sowie Ein- und Ausgabeschnittstellen lässt sich sehr gut durch die Fähigkeiten aktueller Smartphones annähern. Hinsichtlich der Anzahl der Komponenten, der verwendeten Materialien, der Komplexität des Fertigungsprozesses, der Widerstandsfähigkeit gegen Umweltbedingungen, der weitweiten Transportwege und der Lebensdauer lassen sich viele Gemeinsamkeiten zwischen Smartphones und einer Drohnenavionik finden. Es liegt daher nahe, dass auch der CO₂ Fußabdruck der unterschiedlichen Geräte zumindest ähnliche Größenordnungen aufweist. Dabei skaliert die Masse und Komplexität der Avionik aufgrund geforderter Minimalfähigkeiten für Drohnen zwischen Abflugmassen von ca. 1kg und 25 kg kaum und kann als konstant angenommen werden.

Der CO₂ Fußabdruck von Smartphones über ihre Lebensdauer wurde bereits mehrfach untersucht [10], [11]. Die unabhängige, vergleichende Studie [12] kommt zu einem durchschnittlichen CO₂ Wert von 77,2kg (bei 2-jähriger Nutzung).

Bei den weit verbreiteten Drohnen zwischen 1 und 25 kg Abflugmasse können also für die Avionikkomponenten ca. 77 kg CO₂ als Größenordnung veranschlagt werden.

2.2. Akkus

Die auch in Drohnen verwendeten Lithium-basierten Akkus gelten als CO₂-intensiv. In Anbetracht der Tatsache, dass mehr als ein Drittel der Abflugmasse einer Drohne (36%, Tab. 3 im Anhang) auf das Konto des Akkus geht, lohnt hier eine eigene Betrachtung.

Die Studie [13] kommt zu der Abschätzung, dass die CO₂ Bilanz der reinen Herstellung (ohne Betrieb) von aktuellen Lithium-Ionen Zellen 73g CO₂ / Wh beträgt. Berücksichtigt man die Abflugmasse der Drohne, den Akkumassenanteil von im Mittel 36% und die heutigen Leistungsdichten von Li-Io Batterien von ca. 160 Wh/kg, so kann man den CO₂ Abdruck einer Drohne abschätzen zu:

$$w_{Drohn} = w_{Bat} * 0,36 = 160 \frac{Wh}{kg} * 0,36 = 57,6 \frac{Wh}{kg}$$

Dann ergibt sich die Masse des CO₂ Abdrucks zu:

$$m_{CO_2Bat} = \frac{73g}{Wh} * 57,6 \frac{Wh}{kg} * m_{Drohn} = \frac{4205g}{kg} * m_{Drohn}$$

Eine Drohne wird aber nur in den seltensten Fällen durch nur einen Akku betrieben. Meistens ist mindestens ein Wechselakku vorhanden und nach einem Betriebsjahr müssen viele Akkus bereits vorsorglich getauscht werden. Realistisch sollte man daher 4 Akkus für eine Drohne annehmen hinsichtlich der CO₂ Bilanzierung. Dieser Faktor findet sich dann in der untenstehenden Formel für den aus Avionik und Akkus näherungsweise zusammengesetzten CO₂ Abdruck einer Drohne:

$$\begin{aligned} m_{CO_2Drohn} &= m_{CO_2Avi} + 4 * m_{CO_2Bat} \\ &= 77kg + 4 * \frac{4205g}{kg} * m_{Drohn} \\ &= 77kg + 16,82 * m_{Drohn} \end{aligned}$$

2.3. Pauschalbetrachtung

Dieses Ergebnis vernachlässigt allerdings, dass eine Drohne für den Betrieb auch mechanische Komponenten wie Motoren und Rahmen benötigt, mit Nutzlasten ausgestattet ist, weiterer Komponenten wie Ersatzteile, Ladegerät und einer Fernsteuerung bedarf sowie produziert und integriert, verpackt und transportiert werden muss. Einen Ansatz zur Bestimmung der damit verbundenen CO₂ Emissionen findet man bei CO₂ Kompensations-Dienstleistern wie z.B. South Pole (www.southpole.com, für spezielle Produkte z.B. berechnet auf www.galaxus.de unter dem Stichwort der Produktbeschreibung „Klimakompensation“). Diese weisen bestimmten Produktgruppen wie Möbeln, Unterhaltungselektronik oder eben Drohnen bestimmte CO₂ Fußabdrücke bezogen auf das Versandgewicht zu. Das ist sinnvoll, weil sich auf diese Weise sowohl alle Drohnenkomponenten, die für den Betrieb erforderlich sind, erfassen lassen als auch Verpackung und Transport berücksichtigt wird. Für Drohnen kommt man durch Auswertung von Stichproben lt. Tab. 1 zu der Beziehung, dass ca. 104 kg CO₂ für 1 kg Versandgewicht veranschlagt werden.

2.4. Ergebnisse

Am Beispiel weit verbreiteter Drohnentypen zeigen sich die Tendenzen der Abschätzungen:

Typ	Masse Drohne [g]	Versandmasse [kg]	Avionik CO ₂ [kg]	Akku CO ₂ 1x [kg]	Drohne CO ₂ [kg]	Konsumgut CO ₂ [kg]
DJI Mini Flymore	250	1,6	77	1,05	81,2	166
DJI Mavic 3	895	2,0	77	3,76	92,0	215
DJI FPV Combo	795	3,0	77	3,34	90,4	323
DJI Phantom	1391	7,0	77	5,85	100,4	733
DJI Inspire	3440	13,0	77	14,46	134,9	1361

Tab. 1: CO₂ Abschätzungen für Drohnen (Spalte Konsumgut: South Pole, übrige Spalten: eigene Berechnungen)

Je größer bzw. schwerer die Drohne also wird, desto weniger relevant sind die Anteile aus Avionik und Akku bezüglich des CO₂ Abdruckes. Die zusätzlich erforderlichen Systeme wie Ladetechnik, Ersatzteile, Nutzlast und Bodenkontrollstation und die damit verbundenen Emissionen wachsen nach dieser Abschätzung überproportional mit der Drohnenmasse an. Liegen die CO₂ Fußabdrücke bei kleinen Kameradrohnen noch auf dem Niveau einer 1000 km Autofahrt (2,65kg CO₂/l Diesel, 6l/100km Verbrauch:

	Di Direkte Auswirkung	In Indirekte Auswirkung	
A (Avoid) Vermeiden	Verringerung des Bedarfs an Drohnenbetrieb	Verringerung CO ₂ Übergang in die Atmosphäre Vergrößerung CO ₂ Entnahme aus der Atmosphäre	Ausbildung und Qualifizierung junger Frauen
S (Shift) Verlagern	Verlagern von Drohnenbetrieb auf die jeweils ressourcenschonendste Drohne bzw. Betriebsart.	Substitution von Nicht-Drohnen Diensten und Prozessen mit höherem Fußabdruck (bemannte Fliegerei, Bodentransporte, Energiegewinnung durch Drohnenbetrieb	
I (Improve) Verbessern	Verringerter CO ₂ Fußabdruck von Drohnenfertigung und Einsatz	Nutzung von Drohnen für Monitoring, Optimierung, Steuerung, und Forschung zum Zwecke der CO ₂ Einsparung in anderen Bereichen	

Tab. 2: Erweitertes A-S-I Schema

1044km bei 166 kg CO₂), so erreichen sie bei den größeren Systemen durchaus bereits über 1/10tel des durchschnittlichen CO₂ Ausstoßes pro Person in Deutschland (2021: 11,17 to/ Person laut Umweltbundesamt [2] bzw. [14]).

Im Folgenden Abschnitt wird betrachtet, inwiefern das Restbudget des CO₂ Ausstoßes zur Begrenzung der Klimaerwärmung (laut [15] noch 400 Gt CO₂ ab 2020 zur Erreichung des 1,5°C Ziels der globalen Erwärmung) durch Drohnen nicht nur be- sondern vielmehr entlastet werden kann.

3. KLASSIFIKATION VON DROHNENBETRIEB

Für eine systematische Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten zur CO₂ Reduzierung in Verbindung mit Drohnen sollen zunächst die prinzipiell möglichen Ansätze gefunden bzw. präzisiert werden. Später kann dann eine Einordnung bestehender und möglicher Drohnen-nutzungen in diese Cluster erfolgen.

Einen Hinweis auf die prinzipiellen Möglichkeiten für nachhaltigeren Ressourcenumgang gibt der durch das GIZ vorgestellte A-S-I Ansatz [16]. Dieser steht für:

A: Avoid / Reduce, also das Vermeiden, hier des CO₂ Ausstoßes, das Überflüssigmachen einer Technologie.

S: Shift / Maintain, also das Ersetzen oder Ausbauen des Ersatzes hin zu günstigeren Alternativen von CO₂ erzeugenden Prozessen.

I: Improve: Verbessern der Effizienz, also das Reduzieren der Emissionen innerhalb einer Technologie.

Betrachtet man allerdings mit diesem Ansatz die Vielzahl möglicher Drohneneinsatzmöglichkeiten, so fehlt für eine vollständige Klassifizierung noch eine weitere Dimension, nämlich die der direkten und indirekten Auswirkungen des Drohnenbetriebs.

Die direkten Auswirkungen resultieren dabei aus dem Drohnenbetrieb selbst, also dem theoretisch messbaren,

verringerten CO₂ Fußabdruck des Betriebes und dem direkten Eingriff in CO₂ Flüsse. Die indirekten Einsparungen lassen sich realisieren, indem man Drohnen als Werkzeug oder zum Erkenntnisgewinn für die Verringerung von CO₂ Ausstoßen einsetzt. Dies ist z.B. bei Einsätzen für Monitoring, Law Enforcement und Forschung der Fall. Diese Anwendungen erfordern einerseits natürlich den Ausstoß von CO₂ im Rahmen des Drohnenbetriebes, können aber in höherem Umfang zur Verbesserung der Bilanz globaler CO₂ Flüsse beitragen, z.B. durch die Unterbindung illegalen Holzeinschlags oder durch Feuerlöscheinsätze bei Waldbränden.

Zusammen ergibt sich dann das Ordnungsschema nach Tab. 2.

Mittels dieses Schemas lassen sich alle gesammelten Drohnenprojekte und -Betriebe hinsichtlich ihrer CO₂ Auswirkungen klassifizieren. Zu den folgenden Abschnitten 3.2 bis 3.6 finden sich jeweils Ansätze, Beispiele und Anwendungen vertieft im Anhang.

3.1. A-Di Vermeidung des Drohnenbetriebs

Die grundsätzlichste und wirksamste Methode zur Verringerung der menschengemachten CO₂ Ausstöße ist es natürlich, diese gar nicht erst entstehen zu lassen. Bezogen auf den Einsatz von Drohnen würde das bedeuten, Drohnen von vorneherein nicht als Lösung von z.B. Transport-, Mess- oder Energieerzeugungsproblemen in Erwägung zu ziehen oder sogar zu untersagen. Gemäß den obigen Ausführungen (Abschnitt 1) sowie der allgemeinen und politischen Wahrnehmung sind allerdings Drohnen derzeit kein wesentlicher Treiber der CO₂ Emissionen. Dementsprechend sind auch keine Ansätze bekannt, Drohnenbetrieb aufgrund von CO₂ Erwägungen einzuschränken. Vielmehr, wie folgende Ausführungen zeigen, können sie an vielen Stellen zur Entlastung des CO₂ Budgets beitragen [17].

3.2. A-In Vermeidung oder Reduzierung von CO₂ Emissionen mithilfe von Drohnen

Durch die Beeinflussung bereits vorhandener globaler CO₂ Ströme zwischen Atmosphäre, Boden und Ozeanen durch den Einsatz von Drohnen können effektiv menschengemachte CO₂ Emissionen kompensiert werden. Prinzipiell bieten sich die Möglichkeiten, den unerwünschten Übergang des CO₂ in die Atmosphäre zu verringern oder die Aufnahme der Land- oder Wassermassen von CO₂ zu erhöhen. Für beide Fälle können Drohnen Beiträge leisten.

3.2.1. Reduktion des CO₂ Übergangs in die Atmosphäre

Der Übergang von CO₂ in die Atmosphäre wird verursacht durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, aber auch durch Wald-, Savannen- und Torfmoorbrände sowie Brände in der Landwirtschaft oder Heide. Lt. Greenpeace verursachen letztere Brände globale CO₂ Emissionen von 7,3 Milliarden Tonnen jährlich und damit mehr, als der globale Verkehr. Waldbrandbekämpfung ist daher ein Thema mit erheblichem Potential für die Verminderung des CO₂ Übergangs in die Atmosphäre. Drohnen können hier mit ihrer Präzision, dem für Menschen risikoarmen Betrieb in schwierigen Umgebungsbedingungen und der Möglichkeit zur Automatisierung sinnvoll unterstützen. Dies wird reflektiert durch diverse Projekte, eine Auswahl findet sich im Anhang. Neben der Unterdrückung von Feuern finden sich dort auch Projekte zum gezielten Legen von Feuern, um beispielsweise rechtzeitig potentiellen unkontrollierten Feuern die Nahrung zu entziehen, Brandschneisen zu schaffen oder gezielt und präzise Landschaftspflege zu betreiben.

3.2.2. Erhöhung des CO₂ Übergangs in Boden und Meere

Die wohl bekannteste Klimaschutzmaßnahme, das Pflanzen von Bäumen (durch Organisationen wie OroVerde, Eden Reforestation Projects, Primaklima), dient der langfristigen Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre und dem Einlagern in Pflanzenmasse auf und unter den Boden. Diverse Start-Ups wollen dieses Prinzip auch mit Drohnen verwirklichen, entweder zur Erhöhung der Pflanzgeschwindigkeit oder für die Aufforstung auch unzugänglicher Areale. Das Säen aus der Luft imitiert dabei auch weitgehend natürliche Prozesse, so dass die Hoffnung auf intakte, robuste Pflanzenlebensgemeinschaften besteht. Das Pflanzen von Bäumen ist zwar mittelfristig klimaneutral, da das während des Wachstums eingelagerte CO₂ am Ende der Lebensdauer des Baumes durch Verbrennung oder Verwesung wieder freigesetzt wird. Ein Wald mit Bäumen unterschiedlichen Alters ist aber in der Lage, mehr CO₂ zu binden, als andere Landnutzungsformen (Landwirtschaft, Bebauung etc.), sowohl über als auch unter der Erde.

Ebenfalls der Erhöhung der CO₂ Aufnahme im Boden und Gewässern dienen hypothetisch Methoden des Geoengineerings, bei denen vorsätzlich und großräumig in geochemische oder biogeochemische Kreisläufe der Erde eingegriffen wird [18]. In einfachen Fällen erfolgt dies durch das Ausbringen von Gesteinsmehlen auf Wasser oder Erde, um das Bindevermögen von CO₂ zu erhöhen. Drohnenanwendungen sind hier noch nicht bekannt, liegen aber angesichts von drohnenunterstützter Land- und Forstwirtschaft

(z.B. [19]) sowie Düngung und Schädlingsbekämpfung aus der Luft mit bemannten Luftfahrzeugen nahe.

3.3. S-Di Verlagern von Drohnenbetrieb auf die jeweils ressourcenschonendste Drohne bzw. Betriebsart

Der Drohnenbetrieb an sich ist bislang nicht auf möglichst geringe CO₂ Emissionen optimiert. Beim großen Spektrum der unbemannten Luftfahrzeuge bietet sich aber auch hier ein Potential, durch Verlagerung der Aufgabe auf eine andere (meistens kleinere oder effizientere) Drohne, zu Einsparungen zu kommen. Hier finden sich die Bemühungen der Hersteller wieder, durch neue Konfigurationen bestimmte Betriebsarten wie den Erkundungs- oder Transportflug zu optimieren. Die bisher überwiegend verwendeten Multikopter werden mit Tragflächen hybridisiert, mit Schwenktriebwerken ausgestattet oder aerodynamisch verfeinert (z.B. durch Wingcopter, Germandrones, oder bei [20]). Aus der bemannten Luftfahrt gibt es ergänzende Impulse für größere Drohnen. Eine Steigerung der Nutzlasten und Reichweiten geht hier beinahe zwangsläufig einher mit geringeren CO₂ Ausstößen pro geflogenen Kilometer oder transportiertem Gewicht. Eine Sonderrolle bei den möglichen Konfigurationen der Drohnen nehmen solar betriebene Luftfahrzeuge ein. Diese lassen sich ganz ohne CO₂ Emissionen betreiben, mehrwöchige Flüge wurden bereits demonstriert (z.B. Airbus' Zephyr).

Auch Drohnenschwärme oder die Aufgabenteilung zwischen Drohnen mit unterschiedlichen Fähigkeiten können im Einzelfall sinnvolle Betriebsarten darstellen [21]. Dies gilt insbesondere, wenn die arbeitsteiligen Drohnen insgesamt mit weniger Ressourceneinsatz zu betreiben sind, als dies für eine einzelne, universal nutzbare Drohne möglich wäre. Betriebsarten wie das Fliegen außerhalb der Sichtweite des Steuerers sind zwar zurzeit mit hohen regulatorischen Hürden versehen [22], bieten sich aber an, um die begleitende Logistik von Material und Personen zu begrenzen.

3.4. S-In Substitution von Diensten und Prozessen mit höherem CO₂ Fußabdruck

Drohnen konkurrieren auf vielen Gebieten mit bereits etablierten technischen Lösungen. Im Sinne des Klimaschutzes wird es dort sehr interessant, wo sich etablierte Lösungen, beispielsweise im Straßen- oder Luftverkehr oder der Energieerzeugung, durch Drohnenservices mit deutlich geringem CO₂ Impact ersetzen lassen.

3.4.1. Flugwindkraft, Ersatz für Windräder oder Windparks on- und offshore

Die Erzeugung von Energie mittels Windkraftanlagen ist für Deutschland ein Erfolgsmodell. Ca. 20% der Bruttostromerzeugung stammen 2021 bereits aus der Windkraft und der Anteil soll weiter ausgebaut werden. Problemfrei ist diese Technologie aber nicht. Nicht alle vom Wind begünstigte Orte dürfen erschlossen werden, Betonfundamente erzeugen große CO₂ Emissionen, die Windrotoren können nicht recycelt werden [23]. Meistens sind erhebliche Infrastrukturmaßnahmen erforderlich, um den Strom auch vom Ort der Erzeugung zum Verbraucher zu bekommen. Der Effizienz sind durch die Bauhöhe der Anlagen technische Grenzen gesetzt [24]. Hier setzt die luftgestützte

Windkraftenergie an. Anstelle in Bodennähe Energie aus gebremstem und verwirbeltem Wind zu ernten werden unbemannte, eigenstartfähige Luftfahrzeuge an langen Leinen gestartet und in höhere Luftschichten geflogen. Ab dort wandeln sie über Rotoren oder entsprechende Flugprofile an bodengestützten Seilwinden Windenergie. Dadurch können sie mit weniger Ressourceneinsatz mehr Energie ernten [25] als herkömmliche Windkraftanlagen, genau an dem Ort, wo die Energie benötigt wird. Noch besser fällt die Bilanz aus, wenn man diese Energieerzeugung ansonsten durch die Verstromung fossiler Energieträger erreicht hätte.

3.4.2. Substitution bemannter Luftfahrzeuge durch Drohnen

Durch die fortwährende Ausweitung der Drohnenfähigkeiten ist es nur eine Frage der Zeit, bis unbemannte Luftfahrzeuge auch die Aufgaben bemannter Luftfahrzeuge übernehmen. Erfolgt ist dies bereits nahezu vollständig auf dem Gebiet der Luftbild- und Bewegtbilderzeugung [26]. Aber auch Drohnen für Sprühflüge in der Landwirtschaft oder für meteorologische Vermessungen konnten sich bereits etablieren oder sind bereits käuflich erwerbbar. Momentan stehen Drohnen an der Schwelle, sogar für den Personentransport eingesetzt werden zu können, im Rahmen von Air-Taxi oder UAM Konzepten (z.B. Volocity, Lilium Jet, CityAirbus). Damit ersetzen sie vor allem die Verwendung bemannter Hubschrauber. Der Vorteil von Drohnen ist dabei bezüglich der CO₂ Ersparnis immer der gleiche: Die gleiche Aufgabe lässt sich mit zum Teil deutlich verringerten Ressourceneinsatz erfüllen, im Falle elektrischer Drohnen sogar ganz ohne lokale CO₂ Emissionen. Zumindest die Massen für den Piloten und die Cockpitausstattung lassen sich im Falle des Lufttransports von Waren oder Personen einsparen.

3.4.3. Substitution von Bodentransporten durch Drohnen

Die Substitution von Bodentransporten (mit Fahrzeugen, auf Schienen usw.) durch Drohnen ist dagegen nur in Nischenfällen sinnvoll [27]. Die Drohnentechnologie trifft hier auf lange ausgereifte und optimierte Verkehrssysteme. Neben zeitlichen Vorteilen kann es aber auch bezüglich der CO₂ Ausstöße sinnvoll sein, Staus und Bodenhindernisse mittels Drohnenflugs zu vermeiden oder gänzlich unabhängig von Verkehrsinfrastruktur wie Straßen zu operieren. Ihren Nutzen können kleine Drohnen bei Hochwert- und Kleintransporten ausspielen, wenn die Masse des Luftfahrzeuges in einer Größenordnung mit der transportierten Nutzlast liegt. Bei Kurierfahrten, Fahrten zur Probenlieferung oder Dokumentenlieferung durch Kraftfahrzeuge ist dieses Verhältnis deutlich ungünstiger. Waren von 2 kg werden beispielsweise bei einer Pizzalieferung teilweise durch ein Kraftfahrzeug inklusive Fahrer von 1,5 Tonnen bewegt. Noch extremere Einsparungen an Ressourcen und CO₂ werden möglich, wenn Drohnen Lufttransporte in infrastrukturalarmen Gebieten bedienen und die einzige Alternative dort wäre, diese stattdessen durch Straßen oder Schienenstrecken zu erschließen. Straßenbau ist äußerst CO₂ intensiv (12.210 Tonnen CO₂ je km Betonbett lt. [28]). Für gelegentliche Transporte kann sich eine Drohnenluftbrücke in Bezug auf CO₂ Emissionen also lohnen. Das gilt natürlich umso mehr für den Verzicht auf Tunnels und Brücken. Unternehmen wie Amazon scheinen darüber hinaus ein zumindest ökonomisches Potential für die Auslieferung

auf der letzten Meile zu sehen und entwickeln bereits seit 2013 entsprechende Services [29].

3.4.4. Telepräsenz

Eine Chance für den sinnvollen und ressourcenschonenden Drohneneinsatz ergibt sich auch dann, wenn Drohnen die physische Präsenz eines Menschen ersetzen und der Aufwand hierfür im Verhältnis zum Reiseaufwand bzw. der Logistik für den Menschen gering ist [30] [31]. Die Drohne ermöglicht dem Menschen also eine Projektion in entfernte Bereiche für Beobachtung, Zählung oder die Ansprache von Personen mittels Lautsprecher. In Entwicklung sind auch Drohnensysteme für die medizinische Assistenz [32].

3.4.5. Substitution von Verbrennungskraftmaschinen durch elektrische Antriebe in der Luftfahrt

Unbemannte Luftfahrzeuge müssen nicht prinzipiell elektrisch betrieben sein. Kolben- und Turbinen-triebwerke sind ebenfalls verbreitet [33]. Zu einer weiten Verbreitung der Drohnen bis hin zum Konsumgut hat aber sicherlich die Verwendung von günstigen, sauberen, vibrationsarmen, leicht zu bedienenden, leisen elektrischen Antrieben beigetragen. Im Falle der allgegenwärtigen Multikopter ist darüber hinaus die präzise Regelbarkeit und Zuverlässigkeit von Elektromotoren unverzichtbar. Im Gegensatz zu konventionellen Hubschraubersystemen sind elektrische, drehzahlgeregelte Multikopter erheblich einfacher aufgebaut. Batteriespeicher mit hoher Leistungsdichte sorgen in Verbindung mit effizienten Leistungsreglern und sehr kraftvollen, kompakten Elektromotoren für genug Leistung für den Schnell-, Transport- oder Schwebeflug [34]. All diese Vorteile strahlen auch in andere Bereiche der Luftfahrt aus. Zunehmend werden auch Starrflügel-Drohnen und Hubschrauber-Drohnen elektrifiziert, erste manntagende Ultraleichtflugzeuge sind auf dem Markt und unter dem Stichwort e-VTOL entwickeln diverse Firmen Konzepte für den elektrisch betriebenen Passagierflug [35]. Unbemannte Luftfahrzeuge dienen hier als fliegende Botschafter, mit denen man die Machbarkeit elektrischer Luftfahrtantriebe im Alltag demonstrieren kann. Außerdem lassen sich Drohnen auch ganz praktisch als fliegende Teststände für elektrische Antriebssysteme anwenden. Hier leisten Drohnen also einen ganz erheblichen Beitrag zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs und dienen als Repräsentant der Energiewende.

3.5. I-DI Verringerter Ressourceneinsatz für Drohnenbetrieb

Im Kapitel 3.3 wurde bereits thematisiert, wie innerhalb des Verkehrssystems Drohne ressourcenschonendere Lösungen und Dienste gefunden werden können. Im Folgenden geht es um die Verbesserung einzelner, spezifischer Drohnen zur Reduzierung von CO₂ Emissionen. Während S-DI in erster Linie ein Anwenderthema ist, sind in I-DI vorrangig Forschung und Entwicklung sowie die Drohnenhersteller angesprochen.

3.5.1. Reduzierung Flugemissionen

Auch ohne technische oder konstruktive Änderung an unbemannten Luftfahrzeugen lassen sich bereits erhebliche

CO₂ Einsparungen erzielen, indem der Anteil von antriebsfrei geflogenen Missionsabschnitten erhöht und die Mission insgesamt so weit wie möglich verkürzt wird. Ersteres lässt sich durch das Ausnutzen potentieller Höhenenergie [36] oder ohnehin vorhandener Aufwinde durch Thermik [37] oder Berghänge [38] erreichen. Prinzipiell wäre es auch möglich, Energie aus Windscherungen zu entnehmen, wie es beispielsweise der Albatros tut [39] oder den Bedarf an Flugleistung zu vermindern, indem man knapp über dem Boden oder Wasser im sog. Bodeneffekt [40] fliegt. All diese Ansätze bedürfen einer dynamischen Bestimmung und Anpassung der Flugtrajektorien und eine Optimierung hinsichtlich der Ziele der Gesamtmission. Die Optimierung der Gesamtmission hinsichtlich Flugzeit, Flugstrecke, Planung der Steig- und Sinkflüge z.B. über Hindernisse oder auf Missionshöhe dagegen ist heute bereits Stand der Forschung und Entwicklung. Für viele Zwecke des Drohneinsatzes lassen sich derartige Konzepte natürlich nicht nutzen, weil z.B. eine hohe Fluggeschwindigkeit oder Schwebefähigkeit in der Mission gefordert sind. Einfache Flugregelungsmodule, die aber z.B. Aufwinde langsamer und Abwinde schneller durchfliegen, könnten auch kleine Einsparungen für viele Luftfahrzeuge verwirklichen.

3.5.2. Reduzierung der Logistik für den Drohnenbetrieb

Erhebliche Einsparungen im Verhältnis zum eigentlichen Energieeinsatz für den Drohnenflug lassen sich auch erzielen, wenn die Anzahl der mit Drohnenflügen verbundenen Personen und deren Reisen und Logistik reduziert wird. Je nach Größe und Komplexität des Drohnenbetriebes wird neben einem Steuerer ein Bediener der Nutzlast, Luftraumbeobachter, Bodenpersonal bei Start und Landung, Personal für die Absicherung, Fluglotsen, Koordinatoren und Logistiker, Personal für die Dokumentation, Abwicklung des Betriebs- oder Flugfunks usw. benötigt. In den meisten Fällen werden Drohnen und Personal heute mit Kraftfahrzeugen ins eigentliche Missionsgebiet gefahren, die überflogenen Gebiete werden mit Fahrzeugen vom Boden aus vorerkundet um z.B. Notlandeplätze zu identifizieren. Hier bieten sich erhebliche Einsparungspotenziale für das Gesamtsystem Drohnenbetrieb. Um personell seltener mit den Drohnen interagieren zu müssen, kann man den Autarkiegrad der Drohnen erhöhen, auf die Automatisierung personalintensiver Prozesse setzen und die Abhängigkeit der Drohnen von Vor-Ort Infrastrukturen verringern. Beispiele finden sich in der entsprechenden Tabelle des Anhangs. Einen Schritt in diese Richtung gehen z.B. automatisierte Drohnen-Hangars (Copting Domum, Exabotix Droneport, Drohnenhangar SkyPort), die personalintensive Prozesse zumindest teilweise übernehmen können. Die Nutzung von vorhandenen Mobilfunknetzen verringert den Aufwand zur Erschließung des Fluggeländes durch eigene Datenlinks wie er z.B. durch den Aufbau von Antennenmasten entsteht. Hersteller und Betreiber sollten auf diesen Aspekt nicht nur aus Gründen der CO₂ Ersparnis Wert legen, über die Reduzierung personalintensiver Anteile des Drohnenbetriebes lassen sich auch in erheblichem Umfang Kosten sparen.

3.5.3. Komponenten- und Systemoptimierung der UAS

Auch bei gegebener Flugbahn, gegebener Konfiguration des UAS, feststehender Bedienmannschaft und Nutzlast

können durch Detailverbesserungen an Bord der Drohnen noch weitere Einsparungen an CO₂ Emissionen erreicht werden. Dabei handelt es sich überwiegend um Effizienzsteigerungen, die es ermöglichen, aus weniger Ressourcen gleichwertige oder gesteigerte Flug- oder Missionsleistung herauszuholen. Leichtbau ermöglicht kleinere Akkus, kleinere Motoren und Kabelquerschnitte bzw. ein besseres Verhältnis aus Eigengewicht und Nutzlast. Allerdings kann die Verwendung von Composite Materialien des extremen Leichtbaus auch besonders ressourcenintensiv sein, z.B. da die Herstellung, das Recycling oder eine Reparatur nur sehr energieintensiv oder überhaupt nicht möglich ist.

Für weitere Optimierungen kann man sich in der automobilen Elektromobilität bedienen, bei der z.B. für Temperierungsaufgaben zunehmend Wärmepumpen eingesetzt werden. Dies kann die Lebensdauer von Akkus erhöhen, oder zur Kühlung von Bordrechnern [41], Infrarotkameras oder verderblicher Nutzlasten dienen. Auch Brennstoffzellen mit Wasserstoff als Energieträger [42] sind für Drohnen ein Thema, wenn es um schnelles Betanken bzw. Aufladen für die nächste Mission oder besondere Standzeit- oder Reichweitenanforderungen geht. Gegenüber Akkus mit vergleichbarer Kapazität sind hier erhebliche Reduzierungen der Masse realisierbar, gleichermaßen ohne lokale CO₂ Emissionen [43]. Im Sinne der CO₂ Bilanz muss der Wasserstoff dann allerdings auch grün erzeugt werden, eine verringerter CO₂ Ausstoß gegenüber dem direkten Laden von Akkus mit regenerativ erzeugtem Strom ist nicht in jedem Fall gegeben [44]. Die Brennstoffzelle ist daher nur dort sinnvoll einzusetzen, wo sich ansonsten noch aufwändigere Prozesse durch die Nutzung von Drohnen substituieren lassen (Kapitel 3.4).

3.6. I-In Drohnen als Werkzeug der CO₂ Forschung, des Monitorings und der Regulierung

Unbemannte Luftfahrzeuge sind ideale Werkzeuge, um mit geringem Aufwand aus der Luft Mess- und Monitoringaufgaben durchzuführen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können einen erheblichen Beitrag zur weltweiten Steuerung und Überwachung von CO₂ Flüssen und der Wirksamkeit von CO₂ reduzierenden Maßnahmen leisten. Die geringen negativen direkten Folgen des Drohnenbetriebes lassen sich durch die positiven indirekten Effekte dabei an vielen Stellen ausgleichen oder in eine positive Gesamtbilanz verwandeln.

Das Monitoring aus der Luft gehört zu den im professionellen Umfeld häufigsten Dienstleistungen mit Drohnen [4]. Mit Kameras (auch infrarot oder multispektral) und diversen anderen Sensoren werden Prozesse in Industrie, Verkehr, Umwelt, Wohnen und Verkehr untersucht. Mit dieser Datenbasis lassen sich unter anderem CO₂ verringernde Maßnahmen planen und deren Wirksamkeit bestimmen. Werden diese Verfahren durch Behörden oder staatlich beauftragte Stellen durchgeführt, so leistet dieses Monitoring einen Beitrag zur Überwachung und Durchsetzung von CO₂ bezogenen Vorschriften und Regulierungen. Ein gutes Beispiel ist die Detektion illegaler Rodungen oder Holzrten in Wäldern durch Drohnen [45]. Forscher nutzen die Daten zur Grundlagenforschung und der Modellierung von CO₂ relevanten Prozessen [46].

3.7. A-S-I – In: Effekt der besseren Ausbildung junger Menschen in Schwellen- und Entwicklungsländern

Die bisher beschriebenen Ansätze beschäftigten sich mit der technisch geprägten Möglichkeit der CO₂ Reduktion durch und mit Drohnen. Die menschengemachten Emissionen sind aber überwiegend sozioökonomisch begründete Probleme infolge Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums [47]. Auf diesen Gebieten lassen sich daher viel größere und nachhaltigere (aber auch langsamere) Verbesserungen erzielen.

P. Hawken identifiziert in [48] als mit Abstand größten Effekt auf weltweite menschengemachte CO₂ Emissionen (neben vegetarischer Lebensweise und reduzierter Lebensmittelverschwendung) die verbesserte Bildung von Mädchen und jungen Frauen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Über die Wirkkette selbstbestimmten, nachhaltigeren Wirtschaftens von Anfang des Erwerbslebens an, verbesserter Gesundheit, späterer Familiengründung und verringerten Bevölkerungswachstums lassen sich so laut [48] in einem Zeitraum von 2020-2050 bis zu 68,9 Gt CO₂ vermeiden.

Hier ergeben sich für international agierende Drohnenhersteller und Betreiber Handlungsoptionen. Drohnen können als multidisziplinäre Technologie gerade in niedrig entwickelten Ländern mit schwacher Infrastruktur diverse Anwendungsszenarien bedienen. Durch die drohnenbezogene Ausbildung und Qualifikation junger Menschen in den Betriebsländern werden gleich mehrere positive Effekte erreicht: Es werden neue Märkte erschlossen, langfristig können sich die oben genannten CO₂ Einsparungen realisieren lassen und die lokale Akzeptanz des Drohnenbetriebs wird durch die Verankerung in der Gesellschaft gesteigert.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Zu Beginn der Ausführungen wurde dargelegt, dass der Anteil des Drohnenbetriebs an den weltweiten CO₂ Emissionen zurzeit vernachlässigbar ist und daher nicht im Fokus der notwendigen Einsparmaßnahmen zur Erreichung der Begrenzung der Klimaerwärmung steht. Gerade in der Einführungsphase einer neuen Technologie können sich aber diesbezügliche Weichenstellungen lohnen. Durch Betrachtung der Beiträge einzelner Drohnenkomponenten auf die CO₂ Bilanz liegt aber der Schluss nahe, dass selbst CO₂ intensive Komponenten wie Akkus oder Avionik kaum Einsparpotential bieten. Vielmehr wird der Hauptteil der CO₂ Ausstöße durch die Gesamtmasse des Drohnensystems inklusive aller benötigten Infrastruktur und Hilfskomponenten verursacht. Der noch größere Teil der CO₂ Emissionen für Logistik für Mensch und Material während des Drohnenbetriebes wurde nicht näher betrachtet, da vergleichbarer Aufwand auch für die Nutzung bodengebundener Technik oder mannttragender Luftfahrzeuge anfällt.

Bei einer systematischen Betrachtung möglicher Einsparungen an CO₂ mit und durch Drohnen haben sich folgende Ansätze als die Vielversprechendsten gezeigt:

- Optimierung von Prozessen der größten CO₂ Verursacher (Energieerzeugung und Industrie)
- Substitution bemannter Luft- und Bodenfahrzeuge, wenn dadurch die Vehikelmass und der Energiebedarf erheblich sinken kann
- Drohnenlogistik, wenn dadurch Straßen- Brücken- und Tunnelbau vermieden wird
- Automation der Drohnenmission für verringerten Logistik- und Personaleinsatz
- Drohnen als Botschafter der Elektromobilität und Energiewende
- Drohnen als Impulsgeber für die Ausbildung junger Menschen in Entwicklungs- und Schwellenländern.

Dabei haben durchgängig die indirekten Effekte größere positive Auswirkungen als die reinen Einsparungen, die innerhalb des Drohnenbetriebs noch erzielbar wären. Ein doppelter Gewinn und kommerziell interessant sind zukünftige Automatisierungsmöglichkeiten des Drohnenbetriebs, die sowohl zu einer CO₂ Ersparnis als auch zu einer Kostenersparnis führen können.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Rüger und A. Buchheim, „Klimaschutz in Zahlen“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin, 2021.
- [2] Umweltbundesamt, „Nationale Treibhausgas-Inventur“, Umweltbundesamt, Berlin, 2022.
- [3] Eurostat via Tech for Future, „12 größte Treibhausgasverursacher in Deutschland“, 2020.
- [4] Verband Unbemannte Luftfahrt, „Analyse des deutschen Drohnenmarktes“, BDL BDLI, Berlin, 2021.
- [5] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, „Luftfahrt und Wirtschaft 2019“, BDL, Berlin, 2019.
- [6] R. Abraham, „Silent Summer“, *Procyding*, pp. 81-95, 12 2021.
- [7] Europäische Kommission, „Der europäische Grüne Deal“, Europäischen Kommission, Brüssel, 2019.
- [8] J. Amilhat, „Fly the Green Deal“, ACARE, Brüssel, 2022.
- [9] H. Hottenroth, B. Joa und M. Schmidt, „Carbon Footprints für Produkte“, INEC, Pforzheim, 2013.
- [10] Fairphone, „Fairphone’s Impact 2021“, Fairphone, 2021.
- [11] Apple, „Product Environmental Report iPhone 13

- Pro,“ Apple Inc., 2021.
- [12] M. Cordella, F. Alfieri und J. Sanfelix, „Reducing the carbon footprint of ITC products through material efficiency strategies,“ *Journal of Industrial Ecology*, 2021.
- [13] H. E. Melin, „Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it,“ *Circular Energy Storage*, 2019.
- [14] K. Schächtele und H. Hertle, „Die CO2 Bilanz des Bürgers,“ Umweltbundesamt, Heidelberg, 2007.
- [15] IPCC, „Global Warming of 1.5°C,“ World Meteorological Organization, Geneva, 2018.
- [16] D. Bongardt, L. Stiller, A. Swart und A. Wagner, „Sustainable Urban Transport Avoid-Shift-Improve,“ GIZ, Eschborn, 2019.
- [17] A. Cole, „UAVs: Unlocking positive transformation in the world,“ Inmarsat & Cranfield University, Cranfield, 2021.
- [18] H. Ginzky, F. Herrmann und al., „Geo-Engineering,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2011.
- [19] K. S. Subramanian, S. Pazhanivelan und G. Srinivasa, „Drones in Insect Pest Management,“ *Frontiers in Agronomy*, 09 12 2021.
- [20] S. Krishnaraj und al, „Aerodynamic Analysis of Hybrid Drone,“ in *RIACT 2020*, Chennai, 2020.
- [21] A. Ross, J. Jablonski und al, „Heterogeneous UAV Multi-Role Swarming Behaviors for Search and Rescue,“ in *Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)*, Victoria, 2020.
- [22] EASA, „Easy Access Rules for Unmanned Aircraft,“ EU, 2021.
- [23] Umweltbundesamt, „Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen,“ Dessau-Roßlau, 2019.
- [24] A.-K. Wallasch, S. Lüers und K. Rehfeldt, „Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Nabenhöhen von Windkraftanlagen,“ Deutsche Windguard, Varel, 2017.
- [25] S. Mann, K. Gunn und G. Harrison, „Wind Yield Assessment for Airborne Wind Energy,“ in *EWEA Offshore*, Copenhagen, 2015.
- [26] Levitate Capital, „The Future of the Drone Economy,“ Menlo Park, California, 2020.
- [27] J.-P. Aurambout, K. Gkoumas und B. Ciuffo, „Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential,“ *European Transport Research Review*, 2019.
- [28] Wissenschaftliche Dienste, „Ökobilanzen zum Bau von Infrastrukturen des bodennahen Verkehrs,“ Deutscher Bundestag, Berlin, 2021.
- [29] A. Welch Sudbury und B. Hutchinson, „A Cost Analysis of Amazon Prime Air (Drone Delivery),“ *Journal for Economic Educators*, 2016.
- [30] M. Sabet, M. Orand und D. McDonald, „Designing Telepresence Drones to Support Synchronous, Mid-air Remote Collaboration,“ in *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, 2021.
- [31] I.-h. Bae, „Avatar Drone: Drone as telepresence platform with 3D mobility,“ in *13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, Xián, 2016.
- [32] P. Nedelea, T. Popa, E. Manolescu und al, „Telemedicine System Applicability Using Drones in Pandemic Emergency Medical Situations,“ *Electronics 2022*, 2022.
- [33] V. Prisacariu, „The History and Evolution of UAVs from the Beginning till the 70s,“ *Journal of Defense Resources Management*, 2017.
- [34] B. Zhang, Z. Song, F. Zhao und al, „Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles,“ *Energies 2022*, 2022.
- [35] E. Head, „eVTOL Basics for Investors,“ MHM Publishing, Kitchener, 2021.
- [36] A. Baliarda, „Study of the viability of a glider drone for the return of experiments carried by weather balloons,“ UPC, Catalunya, 2015.
- [37] Z. Ákos, M. Nagy, S. Leven und T. Vicesk, „Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles,“ *Bioinspiration Biomimetics*, 2010.
- [38] C. de Jong, B. Remes und al, „Autonomous Soaring of a Unmanned Aerial Vehicle in Front of a Moving Obstacle,“ *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2021.
- [39] M. Boslough, „Autonomous Dynamic Soaring,“ in *Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, 2016.
- [40] C. Papadopoulos, D. Mitridis und K. Yakinthos, „Conceptual Design of a Novel Unmanned Ground Effect Vehicle (UGEV),“ *Drones 2022*, 2022.
- [41] J. Mehta, „Unmanned Aerial Systems Thermal Management Needs, Current Status and Future Innovations,“ in *10th International Energy Conversion Engineering Conference*, Atlanta, 2012.
- [42] T. Bradley, B. Moffitt und T. Fuller, „Design Studies for Hydrogen Fuel Cell Powered Unmanned Aerial Vehicles,“ in *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Honolulu, 2008.
- [43] A. Friedrich, „Batterie oder Brennstoffzelle, was bewegt uns in Zukunft,“ DLR Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart, 2014.
- [44] A. Sternberg, C. Hank und C. Stebling, „Greenhouse Gas Emissions for Battery Electric and Fuel Cell Electric Vehicles,“ ISE Fraunhofer, Freiburg, 2019.
- [45] T. A. Ouattara, V.-C. J. Sokeng und I. C. Zo-Bi, „Detection of Forest Tree Losses in Côte d’Ivoire Using Drone Aerial Images,“ in *Drones 2022*.
- [46] Hernández-Cole, J., E. Ortiz-Malavassi und al,

- „Evaluation of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a Tool to Predict Biomass and Carbon,“ *Drones 2021*, 2021.
- [47] D. Meadows, E. Zahn und P. Milling, *Die Grenzen des Wachstums*, Deutsche Verlags-Anstalt, 1972.
- [48] P. Hawken, *Drawdown - der Plan*, Gütersloh: Gütersloher Verlagshaus, 2019.
- [49] E. Ausonio, P. Bagnerini und M. Ghio, „Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework,“ *Drones 2021*, 2021.
- [50] D. Goll, P. Ciaia, T. Amann und al., „Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock,“ *Nat. Geosci*, p. 545–549, 2021.
- [51] C. Goh, J. Kuan, J. Yeo und al., „A fully solar-powered quadcopter able to achieve controlled flight out of the ground effect,“ *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, pp. 869-878, 2019.
- [52] CENJOWS, „Advancements in Drone Swarms,“ New Delhi, 2021.
- [53] R. Kulkarni, G. LaRocca und al., „Sub-scale flight test model design,“ *Progress in Aerospace Sciences*, 4 2022.
- [54] W.-C. Chiang, Y. Li, J. Shang und T. L. Urban, „Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization,“ in *Applied Energy V242*, Elsevier, 2019, pp. 1164-1175.
- [55] Volkswagen, „Klimabilanz verschiedener Antriebe in Co₂ Emission in Gramm/km“.
- [56] Polestar, „Carbon footprint of Polestar2 variants,“ Polestar, 2021.
- [57] K. Meyer, „Klimabilanz von Elektroautos,“ Agora Verkehrswende, Berlin, 2019.
- [58] Airshaper, „Generic Fixed Wing Drone Aerodynamic Simulation Report,“ Antwerp, 2018.
- [59] Eurostat, *Data Browser*, 2022.
- [60] DLR Programmdirektion Luftfahrt, „Auf dem Weg zu einer emissionsfreien Luftfahrt,“ in *Dialogforum Luftfahrt*, 2022.
- [61] DJI Enterprise, Malek Murison, „How Drones are Saving the Planet,“ 2021.

ANHANG

A-In, Reduktion des CO₂ Übergangs in die Atmosphäre

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Feuerbekämpfung	Präzisionslöscheinätze durch unbemannte Flugzeuge, Hubschrauber oder Multikopter mit Löschanlagen, Löschbomben oder Schaum	<ul style="list-style-type: none"> • EHang 126 Firefighting • Mikafiresystems, NLR • Drone Swarms in Fire Suppression [49]
Feuerprävention, Landschaftspflege	Kontrolliertes Legen von Feuern	<ul style="list-style-type: none"> • Throwflame TF-19 Wasp drone flamethrower • Drone Amplified IGNIS

A-In, Erhöhung des CO₂ Übergangs in Boden und Meere

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Aufforstung	Aussähen beschichteter Samenkapseln oder von Samenmischungen aus der Luft, Mittelfristige CO ₂ Bindung in Holz und Pflanzenmasse	<ul style="list-style-type: none"> • Dronecoria • Lord of the trees • Dendra Systems
Geoengineering Land	Die beschleunigte Verwitterung von Basaltstaub bindet CO ₂ und düngt gleichzeitig den Boden [50].	<ul style="list-style-type: none"> • In unzugänglichen Gebieten Ausbringung des Gesteinsstaubs durch Drohnen aus der Luft
Geoengineering Wasser	Durch die Alkanisierung des Wassers durch Kalk steigt der PH-Wert und gleichzeitig die Fähigkeit des Ozeans, CO ₂ aufzunehmen (Geomar Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung)	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbringung durch Drohnen (z.B. präzise, regelmäßig, automatisch über Korallenriffen).

S-Di, Verlagern von Drohnenbetrieb auf die jeweils ressourcenschonendste Drohne bzw. Betriebsart

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Konfiguration Luftfahrzeug	Verlagerung der Mission auf jeweils effizientestes Drohnenkonzept verringert den Energiebedarf und Ressourcenbedarf	<ul style="list-style-type: none"> • Solar statt Akku • HAP Nullenergieflug / Solarflug Flugzeuge • Solar powered quadcopter [51] • E-VTOL statt Hubschrauber • Flugzeug statt E-VTOL oder VTOL • Klein statt groß • Leicht statt schwer
Flottenkonzepte	Nutzung angepasster Drohnen statt einer Universaldrohne oder die Nutzung einer Flotte unterschiedlicher Systeme minimiert den CO ₂ Ausstoß der Mission	<ul style="list-style-type: none"> • Schwärme • Modular • Dissimilar • Advancements in Drone Swarms [52]
Automatisierter Betrieb „außer Sicht“ (BVLOS)	Minimierung des Personalansatzes und der Logistik	<ul style="list-style-type: none"> • Wegfallende Streckenposten • Wegfallende Luftraumbeobachter • Wegfallende Einweiser

S-In, Flugwindkraft, Ersatz für Windräder oder Windparks on- und offshore

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Luftgestützte Windkraftherzeugung	Mit geringerem Ressourcenbedarf kann über gefesselte Drohnen Windenergie aus höheren energiereicheren Luftschichten geerntet werden. Reduzierung des Bedarfs an fossil erzeugter Energie.	<ul style="list-style-type: none">• Ampyx Power AWES• Skysails Power• Kitepower Falcon• X Company Makani• Skypull drone

S-In, Substitution bemannter Luftfahrzeuge durch Drohnen

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Kalibrier- und Messflüge	Große, mannttragende Flugzeuge und Hubschrauber dienen derzeit als Mess-, Instrumenten- oder Antennenträger. Der Aufwand und damit CO ₂ Ausstoß ist durch die Nutzung kleinerer Drohnen potentiell sehr viel geringer.	<ul style="list-style-type: none">• Kalibrierung Instrumentenlandesystem• Antennenfeldvermessungen• Meteorologie: Aeromet_UAV
Foto- und Videoflüge	Die Erstellung vibrationsfreier, hochauflöser Videos und hochqualitativer Luftbilder kann bereits weitgehend ohne bemannte Luftfahrzeuge stattfinden. Die Ressourceneinsparungen einer Drohne gegenüber z.B. einem bemannten Hubschrauber sind erheblich.	<ul style="list-style-type: none">• EC145: 1700kg, DJI Phantom: 1,4kg• Kartenerstellung• Dokumentation im Bau• Film• Werbung
Sprühflüge / Präzisionsagrikultur	Drohnen ermöglichen GPS-genaue bis pflanzreihengenaue Präzisionsagrikultur. Der Einsatz von Sprühmitteln kann so um Größenordnungen verringert werden. Neben der positiven CO ₂ Wirkung lassen sich so auch andere klimaaktive Nebenprodukte wie Lachgas reduzieren.	<ul style="list-style-type: none">• Schädlingsbekämpfung• Düngung• DJI Agras T30
Scaled Flight Testing	Flugversuche zur Ermittlung von Flugleistungen und -eigenschaften sind teuer und risikoreich. Mittels unbemannter, skalierter Flugversuchsträger lässt sich ein Teil der Erkenntnisse mit deutlich geringerem (CO ₂ -) Aufwand gewinnen.	<ul style="list-style-type: none">• [53] Subscale Flight test model design
Inspektionsflüge	Für Inspektionsflüge kommen heute häufig die besonders ressourcenintensiven bemannten Hubschrauber zum Einsatz. Die Substitution durch kleine, elektrisch betriebene Drohnen ist zur CO ₂ Reduktion anzustreben.	<ul style="list-style-type: none">• Hochspannungsleitungen• Isolatoren• Brücken• Pipelines
Personentransport	Unter Verzicht auf Cockpit und Pilot können UAM und Air-Taxi Konzepte mit geringeren Ressourcen in Bau und Betrieb verwirklicht werden.	<ul style="list-style-type: none">• Volocopter Volocity• Lilium Jet• CityAirbus NextGen

S-In, Substitution von Bodentransporten durch Drohnen

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Hochwerttransporte, Informationstransporte, Medizint Transporte	Wichtige und zeitkritische Waren, Dokumente und medizinische Waren oder Proben werden anstelle von CO ₂ intensiven Kurierfahrten mit Drohnen befördert.	<ul style="list-style-type: none">• Dokumentenlieferungen von Schiffen vor der Anlandung an Häfen.• Labor Berlin / Matternet• Medifly Hamburg• Zipline
Kleinlieferungen	Bei Kleinlieferungen auf Kurzstrecke lässt sich durch Drohnen ein ansonsten verwendetes KFZ einsparen.	<ul style="list-style-type: none">• Domino's Skydrop• Wing Aviation• Amazon Prime Air• UPS / Verizon / Skyward
Intra-Logistik	Durch Nutzung der Luftlinie und Vermeidung von Bodenhindernissen lassen sich erhebliche Zeit- und Wegersparnisse realisieren gegenüber bodengebundenem Transport.	<ul style="list-style-type: none">• ProGeDa Merck / Wingcopter
Einsparung von Transportinfrastruktur	Drohnenluftbrücken in infrastrukturalarmen Gebieten vermeiden den ressourcenintensiven Bau von Straßen, Brücken, Tunneln etc.	<ul style="list-style-type: none">• Wings for Aid• Demo DHL Winklmoosalm

S-In, Substitution der Präsenz von Personen

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Lautsprecherdurchsagen	Drohnen sind in vielen Szenarien ohnehin für Monitoringzwecke vor Ort. Durch die Funkübertragung von Informationen oder Anweisungen über Lautsprecher kann auf die Präsenz von qualifizierten Personen verzichtet werden	<ul style="list-style-type: none">• Notarztunterstützung von Ersthelfern• Deficopter• Evakuierungen• Covid-Bekämpfung• Management von Menschenmengen
Inventur	Viele Arten von Inventur erfolgen noch in Präsenz mit großem Personalaufwand. Erhebliche Einsparungen an beteiligten Personen und Logistik durch Telepräsenz möglich.	<ul style="list-style-type: none">• Fahrzeuge auf Großparkplätzen• Hochregallager• Baustellenausstattung

I-Di, Reduzierung Flugemissionen

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Nutzung von Aufwinden	Segelflugzeuge können hunderte Kilometer lange Streckenflüge durchführen. Die Nutzung der Prinzipien für den Drohnenflug ermöglicht große Energieeinsparungen.	<ul style="list-style-type: none">• Thermikflug• Hangflug• Dynamischer Segelflug (Nutzen von Windscherungen)• Bodeneffektflug
Optimierung der Flugbahnen	Ideales Routing auf der Luftlinie und mit energieoptimalen Steig- und Sinkflügen sowie ggf. reduzierten Schwebefluganteilen verbraucht weniger Energie.	<ul style="list-style-type: none">• Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization" [54]

I-Di, Reduzierung der Logistik für den Drohnenbetrieb

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Verringerung Betriebspersonal	Betriebspersonal und deren Logistik verursacht den überwiegenden Teil der Emissionen eines Drohnenbetriebs. Durch Einsparung von Personen und Wegen lassen sich erhebliche Mengen an freigesetztem CO ₂ einsparen.	<ul style="list-style-type: none">• Verzicht auf Luftraumbeobachter oder Streckenposten• Automation von Verladevorgängen, Akkulation oder-tausch, Flugvor- und Nachbereitung• Automatisierte Drohnenhangars• Unterstützung durch nicht luftfahrtgeschul-tes Personal vor Ort• Verlängerte Wartungsintervalle• Automatisiertes Health Monitoring statt regelmäßiger Kontrolle und Wartung
Verringerte Vorbereitung des Fluggeländes	Mindestens am Ort der Bodenkontrollstation, bei Start- und Landeplatz, teilweise aber auch auf der Flugstrecke ist für Drohnenflüge Infrastruktur erforderlich (Strom, Daten, Absperrung, Antennen usw.). Bei der Reduzierung dieser Infrastrukturen lässt sich auch die damit verbundene Logistik verringern.	<ul style="list-style-type: none">• Nutzung von Mobilfunkdatenlinks (LTE, 5G) statt Punkt-zu -Punkt Verbindungen• GPS oder WAAS-Dienste statt örtlicher DGPS Bereitstellung• Landeplatzbewertung von der Drohne aus (hindernisfrei, eben usw.)
Autarkieerhöhung der Drohne	Durch die Erhöhung der Autarkie der Drohnen lässt sich die Notwendigkeit zu infrastruktur- und personalintensiven Flugunterbrechungen verringern. Die diesbezüglichen CO ₂ Emissionen sinken.	<ul style="list-style-type: none">• Verlängerte Flugdauer• Verzicht auf Bodenstrom• kein Akkuwechsel unterwegs

I-Di, Systemoptimierung der UAS

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Wärmepumpen in Drohnen	Wärmepumpen verbessern die Effizienz z.B. für die Akkutemperierung, Nutzlasttemperierung oder Rechnerkühlung.	<ul style="list-style-type: none">• HALE Drohnen
Recyclingfähigkeit, Lebensdauererhöhung	Verringerung des CO ₂ Fußabdrucks bei der Herstellung und Verschrottung von Drohnen, Strecken des Nutzungszeitraums.	<ul style="list-style-type: none">• Vermeidung Compositematerial• Vermeidung seltener Erden• Vermeidung geplanter Obsoleszenz durch Updatefähigkeit• Modularer Aufbau• Reparaturfreundlichkeit
Brennstoffzelle, Energie aus Wasserstoff	CO ₂ -intensive Akkus oder Verbrennungskraftmaschinen werden für Erzielung größerer Nutzlasten oder Reichweiten durch Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellen ersetzt.	<ul style="list-style-type: none">• Doosan DS30W Drohne
Leichtbau	Geringerer Ressourcenverbrauch bei Produktion, Transport und Betrieb der Drohne.	<ul style="list-style-type: none">• Funktionsintegration• Adaptive Bauteile• Elastische Strukturen
Regenerativ erzeugter Ladestrom und Betriebsstrom	Vermeidung von CO ₂ Ausstößen durch fossil erzeugten Strom (im deutschen Strommix).	<ul style="list-style-type: none">• Drohnenbetreiber verwenden selbst erzeugten regenerativ erzeugten Strom oder Ökostrom

I-In, Monitoring

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Umweltmonitoring	In sensiblen Gebieten können mit wenigen lokalen Emissionen Messungen aus der Luft durchgeführt werden. Diese helfen, CO ₂ verringernde Maßnahmen zu planen, durchzuführen oder in ihrer Wirksamkeit zu beurteilen.	<ul style="list-style-type: none"> • Detektion illegalen Waldeinschlags • Quantifizierung der Kohlenstoffspeicherfähigkeit von Wäldern durch Stammdurchmesserbestimmung (Projekt Shadow, DLR Institut für Datenwissenschaften) • Baumzählung, Baumdichte, Totholzbestimmung • Drohnen zur Kartographierung / Massenbestimmung arktischer und Gletschereismassen • Reflektions- oder Adsorptionsmessung für Klimamodelle
Gebäude- und Industriemonitoring	Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden und Industrieprozessen, dadurch geringerer Einsatz fossiler Brennstoffe.	<ul style="list-style-type: none"> • Photovoltaik Inspektion und Reinigung • Gebäudethermographie • Inspektion von Energieanlagen & Isolatoren und Leitungen • Inspektionen Windkraftanlagen • In-Situ Windmessung für Windparkplanung
Monitoring von Verkehrsprozessen	Schaffung einer Datengrundlage für die Optimierung des Verkehrssystems und damit zur Reduzierung von CO ₂ Emissionen.	<ul style="list-style-type: none"> • Intermodales Mapping • Verkehrsflussmessung • Stauprognose
Agrarmonitoring	Landwirtschaftliche Prozesse tragen viel zum CO ₂ Übergang in die Atmosphäre oder den Boden bei. Ein hochaufgelöstes und aktuelles Lagebild unterstützt eine CO ₂ optimale Prozessführung.	<ul style="list-style-type: none"> • Messung Wassergehalt • Erkennung Schädlinge • Nährstoffanalyse • Bestimmung Reifegrad

I-In, CO₂ Law Enforcement, Regulierung

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Kontrolle und Beweissicherung	Überwachung von Maßnahmen, Verordnungen und Gesetzen zur Verringerung von CO ₂ Ausstoß.	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltmessungen in Schiffsabgasen • Überwachung Emissionen Kohlekraftwerke • Grenzwerteinhaltung Tagebaue

I-In, CO₂ Forschung

Ansatz	Kurzbeschreibung und CO ₂ Bezug	Beispiele
Erkundung und Multiskalenmessungen, wiederholbar, zeitlich und örtlich hoch aufgelöst.	Mittels Drohnen können Messaufgaben durchgeführt werden, die auf anderem Wege nicht oder nur mit größerem Aufwand möglich wären.	<ul style="list-style-type: none"> • Bestandserhebung • Analysen • Vergleiche • zeitliche Entwicklungen

Akkuanteile typischer Multikopter am Gesamtgewicht

Typ	MTOW	Akku	Akkuanteil
DJI Mavic Air 2	570g	198g / 27Wh / 136Wh/kg	34%
DJI Matrice M300 RTK	7 kg (bei 1kg Nutzlast)	2x 1,35kg / 548Wh / 202 Wh/kg	38%
Yuneec Typhoon H520E	1860g	650g / 92Wh / 141 Wh/kg	35%

Tab. 3: Akkuanteil Multikopter, gem. Datenblättern / Betriebsanleitungen