

Klimaneutral. Energieeffizient.
Nachhaltig – Innovationen im Luftsport.

Leitfaden

Umstellung von Luftsportvereinen auf elektrischen Flugbetrieb



Bearbeitung durch:

Gefördert durch:

Klimaneutral. Energieeffizient. Nachhaltig – Innovationen im Luftsport

Leitfaden Umstellung von Luftsportvereinen auf elektrischen Flugbetrieb

März 2019

Erstellt im Auftrag von

Deutscher Aero Club e.V.
Hermann-Blenk-Str. 28
38108 Braunschweig

Telefon: 0531 / 23540 - 0
Telefax: 0531 / 23540 - 11
info@daec.de

Bearbeitung durch

Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme
Appelstr. 9A
30167 Hannover
<http://www.ifes.uni-hannover.de/ees>

Autoren/Ansprechpartner

Dr.-Ing. Boris Bensmann
Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach

boris.bensmann@ifes.uni-hannover.de
rhr@ifes.uni-hannvoer.de

unter Mitarbeit von

Carla Schreibmüller, MSc. und Christopher Winnefeld, MSc.

Illustration des Titelbildes: Paula Föhr

Verwendete Schriftfamilie: Source Sans Pro (Fa. Adobe) unter der SIL Open Font License

Klimaneutral. Energieeffizient. Nachhaltig – Innovationen im Luftsport

Auf Grund aktueller öffentlichkeitswirksamer Debatten um den anthropogenen Klimawandel durch CO₂-Emissionen sowie die gesundheitsgefährdenden Feinstaub und Stickoxidemissionen steigt in der Bevölkerung das Bewusstsein für Umwelt- und Naturschutz. Auch der Luftsport gerät hier in den Fokus und stellt sich der Diskussion. Der Deutsche Aero Club (DAeC), der Dachverband der deutschen Luftsportvereine und Vertreter aller Luftsporttreibenden in Deutschland, unternimmt zunehmend Anstrengungen, um den Luftsport klimaneutral-energieeffizient-nachhaltig sowie umweltfreundlicher zu gestalten. Zusätzlich zu den bisherigen Maßnahmen, wie Projekten, Fördermaßnahmen und der Schulung der Piloten zum Naturschutz bzw. Maßnahmen im Gebäudebereich im Flugplatzbereich, soll mit diesem Leitfaden auch der Flugbetrieb direkt adressiert werden. Dieser Leitfaden gibt eine Anleitung zur Ermittlung und Ausschöpfung von Minderungspotenzialen in Bezug auf CO₂-Emissionen. Jeder einzelne Verein kann somit einen Beitrag leisten, um Emissionen zu reduzieren und das Erreichen der Klimaschutzziele mitzugestalten sowie voranzutreiben. Der Leitfaden beschreibt wie der DAeC in Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover innovative Ansätze im Bereich des Luftsports vorantreibt. Das Projekt wurde aus dem Innovationsfonds Sportentwicklung 2018 des Deutschen Olympischen Sportbundes gefördert.



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W. Müther', written in a cursive style.

Wolfgang Müther
DAeC-Präsident

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Motorflug-Segment	3
Schritt 1: Bestandsaufnahme	3
Schritt 2: Überlegungen zur elektrischen Flotte und zum Energiebedarf	5
Schritt 3: Überlegungen zur Ladeinfrastruktur	7
Schritt 4: Überlegungen zur Wahl der Strom-Bezugsquelle	8
Schritt 5: Verrechnung und vergleichende Gegenüberstellung	10
Option: Überlegungen zur Installation einer PV-Anlage	11
3. Segelflug-Segment	13
Schritt 1: Bestandsaufnahme	13
Schritt 2: Überlegungen zum elektrischen Windenstart	14
Schritt 3: Überlegungen zur Energieversorgung der Winde	15
Schritt 4: Verrechnung und vergleichende Gegenüberstellung	16
4. Zusammenfassung	17
Literatur	17

1. Einleitung

Die Verminderung von Emissionen wird im gesamten Luftfahrtsektor angestrebt. Der Flight Path 2050, der 2011 von der Europäischen Union vorgegeben wurde [1], sieht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 75%, eine Verminderung der Stickoxid (NO_x)-Emissionen um 90% und eine Minderung der Geräuschemissionen um 65% vor. Auch der Luftsport kann einen Beitrag dazu leisten.

Der vorliegende Leitfaden beschreibt die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten im Rahmen des aktiven Flugbetriebs, der den mit Abstand größten Teil der Emissionen ausmacht. Weiterführende Projekte, Maßnahmen und Initiativen im Bereich Klimaschutz, die kleine Einsparungen durch Effizienzmaßnahmen, Sanierungen, oder Energiemanagement betreffen, werden im Internetportal des Deutschen Olympischen Sportbunds "Klimaschutz im Sport" [2] ausführlich erläutert.

Im Mittelpunkt des klimaschonenden Fliegens steht die Reduktion der CO₂-Emissionen durch den Flugbetrieb. Aktuell werden in Bezug auf den kommerziellen Flugbetrieb der großen Fluggesellschaften zwei verschiedene Ansätze diskutiert: (a) Verwendung der konventionellen Antriebstechnologie über Verbrennungskraftmaschinen aber eine CO₂-neutrale Herstellung des Kraftstoffs oder (b) die Umstellung auf Elektromotoren, die ihre Energie aus Akkumulatoren oder Brennstoffzellen mit Wasserstoffversorgung beziehen. Ein großer Vorteil der ersten Variante ist die hohe Energiedichte der flüssigen Kraftstoffe, die aktuell nicht durch Akkumulatoren oder Wasserstoff erreicht werden kann. Vor allem auf den langen Strecken sind die Verbrennungskraftmaschinen daher noch alternativlos. Als Energieträger kommen statt der konventionellen Kraftstoffe Avgas und Kerosin in diesem Fall Kraftstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe (sog.

Biokraftstoffe) oder synthetisch erzeugte Kraftstoffe in Frage. Für Biokraftstoffe werden allerdings Nachteile bzgl. der limitierten Verfügbarkeit und der Flächenkonkurrenz zur Lebensmittelproduktion gesehen [3]. Werden die synthetischen Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien hergestellt, ist deren Verwendung CO₂-neutral möglich. Nicht gelöst ist damit allerdings die Problematik der lokalen Emissionen von Stickoxiden und Lärm. Zudem ist die Verfügbarkeit dieser Kraftstoffe aktuell nicht gegeben, da so gut wie keine Nachfrage vorhanden und die Herstellung sehr energieintensiv ist. Weiterführende Informationen zu diesem Thema sind in entsprechenden Literaturquellen zu finden (z. B. [4]).

Erste Studien zeigen, dass vor allem auf der Kurzstrecke eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs mit einer Energieversorgung aus dem Akkumulator vorteilhaft ist. Auf der Mittelstrecke bis Langstrecke hingegen kann Wasserstoff vorteilhaft eingesetzt werden (z. B. [5]).

Der generelle Vergleich möglicher Antriebsvarianten für verschiedene Flugprofile ist auch Bestandteil des kürzlich genehmigten Exzellenzclusters SE²A – Sustainable and Energy Efficient Aviation, an dem u.a. neben der Technischen Universität Braunschweig als Antragsteller auch die Leibniz Universität Hannover und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig beteiligt sind. In den kommenden sieben Jahren werden die Partner sich Fragen zur nachhaltigen und umweltverträglichen Entwicklung des Luftverkehrs widmen.

In den Luftsportvereinen kann auf Grund der vergleichsweise kurzen Flugstrecken und des geringen Gewichts der Flugzeuge der elektrische Flugbetrieb vollständig auf Basis von Akkumulatoren gewährleistet werden. Da mit flüssigen synthetischen Kraftstoffen keine Verbesserung in Bezug auf die lokalen Emissionen erreicht werden kann und auch Wasserstoff

Nachteile in Bezug auf die Effizienz bei der Herstellung hat, stellen beide Varianten keine geeignete Alternative dar. Im vorliegenden Leitfaden wird daher im Folgenden ausschließlich die Umstellung auf den elektrischen Flugbetrieb mit einer Energiebereitstellung über Akkumulatoren diskutiert und Luftsportvereinen eine Anleitung zur schrittweisen Umstellung auf den elektrischen Betrieb gegeben. Dabei wird der Motor- als auch der Segelflug betrachtet.

Die Umstellung wird exemplarisch an einem Beispiel erläutert. In diesem 270 Mitglieder zählenden Verein kommen vier vereins-eigene Motorflugzeuge zum Einsatz. Dies sind eine Aquila A210 und ein Czech Sport Aircraft PS 28 Cruiser als zweisitzige Motorflugzeuge sowie eine Cessna 172R und eine Piper PA-28-180, die als Viersitzer genutzt werden können. Insgesamt wurden mit diesen Flugzeugen in einem exemplarisch betrachteten Jahr knapp 900 Flugstunden absolviert. Zusätzlich fanden im gleichen Jahr 1.200 Seilwindenstarts von Segelflugzeugen statt. Dazu verfügt der Verein über eine dieselbetriebene Seilwinde und ein den Rückhol- oder Auszugsvorgang unterstützendes Dieselfahrzeug. Im Bereich Segelfliegen fallen durch die Verwendung der dieselbetriebenen Seilwinde und des Dieselfahrzeugs Emissionen von rund 2 Tonnen CO₂ pro Jahr an. Dies entspricht in etwa der CO₂-Menge, die durch einen einzelnen Pkw pro Jahr entsteht (Basis: 130 g_{CO2}/km, 15.000 km jährl. Fahrleistung). Im Bereich des Motorflugs liegt der jährliche Ausstoß des Vereins im Bereich von 70 Tonnen. Zieht man zur Einschätzung dieser Menge die nationalen und internationalen Klimaschutzziele heran, nach denen der jährliche pro Kopf Ausstoß von aktuell 9-10 Tonnen auf 1-2 Tonnen im Jahr 2050 gesenkt werden muss [6], wird ersichtlich, dass auch ein Luftsportverein einen signifikanten Beitrag zur Einhaltung der Ziele leisten kann.

Neben dem ökologischen Vorteil, bietet die Umstellung auf den elektrischen Flugbetrieb aber auch ökonomische Vorteile. Am Beispiel des hier betrachteten Luftsportvereins kann gezeigt werden, dass eine Umstellung im Bereich Motorflug trotz der Mehrkosten für die elektrischen Flugzeuge und die Infrastruktur wirtschaftlich sein kann. Pro Flugstunde könnten bei einer Umstellung durchschnittlich über alle Flugzeugtypen 19 € gespart werden.

Im vorliegenden Leitfaden werden die Umstellung des Motor- und des Segelflugs separat betrachtet. In beiden Fällen wird in Schritt 1 erläutert, wie eine Bestandsaufnahme zu den aktuellen CO₂-Emissionen durchgeführt werden sollte. Im Anschluss wird in weiteren Schritten auf Basis einer ökologischen und ökonomischen Analyse ein Maßnahmenkatalog für die Umstellung auf den elektrischen Flugbetrieb erstellt. Abschließend steht jeweils eine vergleichende Analyse, die als Entscheidungsgrundlage dienen kann.

Eine detaillierte Auflistung der Berechnungsgrundlagen kann bei Interesse bei den Autoren abgefragt werden.

2. Motorflug-Segment

Schritt 1: Bestandsaufnahme

Im Motorflug ist eine Einsparung direkt im Flugbetrieb möglich. Zur Bestimmung der aktuellen CO₂-Emissionen ist vor allem das Feststellen des Kraftstoffverbrauchs von Bedeutung. Für die Bestandsaufnahme muss der Kraftstoffbedarf des Vereins in einem repräsentativen Jahr ermittelt, oder über mehrere vergangene Jahre gemittelt werden.

In der Praxis wird der Kraftstoffbedarf für jeden Flug vor Beginn von den Piloten in Abhängigkeit des verwendeten Flugzeugtyps und der Umgebungsbedingungen, wie der Windgeschwindigkeit und Windrichtung bestimmt. Dies erfolgt anhand des für jeden Flugzeugtyp zur Verfügung stehenden Handbuchs auf Basis von Leistungstabellen. Oft wird nicht nachträglich dokumentiert, wieviel Kraftstoff während eines Fluges tatsächlich verbraucht wurde. Zur nachträglichen Bestimmung des Kraftstoffbedarfs wird daher das folgende Vorgehen empfohlen: In der Regel liegen für jeden Flug die genauen Start- und Landezeitpunkte aller Flüge eines Vereins vor. Aus den Start- und Landezeitpunkten dieser Flüge kann die entsprechende Flugdauer errechnet werden. In der Regel wird für das Anlassen, Rollen und

Notwendige Informationen für Schritt 1

a) Start- und Landezeitpunkte:

Quelle: Eigene Aufzeichnungen (z.B. Programm Aircraft Info Desk)

b) Nachträgliche Berechnung des Verbrauchs der Motorflugzeuge:

Quelle: Leistungstabellen aus den Handbüchern der vorhandenen Maschinen; Verbrauchsberechnung erfolgt nach Flugphasen auf folgender Basis:

- Rollphase Verbrauch pauschal 5 l
- Steigphase maximale Motorleistung
- Reisephase 45 % max. Motorleistung
- Spez. Emissionsfaktor Avgas 2,2 kg_{CO2}/l
- Spez. Kraftstoffkosten Avgas 1,8 €/l

Starten pauschal ein Bedarf von 5 l angenommen [7]. Der Steigflug wird unabhängig von der Flugdauer mit fünf Minuten angesetzt. Die Reiseflugzeit wird entsprechend aus der Gesamtflugzeit vermindert um 5 min berechnet. Für den Steigflug ist die maximale Leistung des Motors anzusetzen, während der Reiseflug bei durchschnittlich 45% der maximalen Leistung durchgeführt wird. Der Sinkflug wird hier nicht berücksichtigt, da der Kraftstoffverbrauch in dieser Phase nicht signifikant ist.

Tabelle 1: Kraftstoffdurchfluss, Leistung und Neupreise (gerundet), der im exemplarisch betrachteten Verein zur Verfügung stehen Motorflugzeuge.

Flugzeugtyp	Steigflug		Reiseflug		Neupreis EUR
	Verbrauch l/h	Leistung kW	Verbrauch l/h	Leistung kW	
Aquila A210	63,3	92	22	41,4	170.000
PS-28 Cruiser	63,3	73,1	22	33,1	141.000
Cessna 172R	122,4	156,9	36	70,6	234.000
Piper PA-28	120,0	176,4	35	79,4	305.000

In Tabelle 1 sind die Kraftstoff- und Leistungsbedarfe der vier im exemplarischen Verein verwendeten Flugzeugtypen aufgeführt.

Ein großer Teil der Motorflugzeuge im Luftsport fliegt mit dem Kraftstoff Avgas. Mit dem summierten Kraftstoffverbrauch und dem spezifische CO₂-Emissionsfaktor von Avgas von rund 2,2 kg_{CO2}/l können die Emissionen eines Fluges und entsprechend eines Jahres bestimmt werden.

Aus den Aufzeichnungen des hier betrachteten Vereins ergibt sich, dass für das betrachtete Jahr mit 900 Flugstunden unter Berücksichtigung aller vier Flugzeuge CO₂-Emissionen von rund 71 Tonnen anfallen. Aus dem entsprechenden Kraftstoffverbrauch errechnen sich zudem unter Berücksichtigung eines Preises von 1,80 €/l für Avgas Kraftstoffkosten von insgesamt 58.000 €.

In Abbildung 1 ist als Beispiel das Flugaufkommen der Aquila A210 des entsprechenden Jahres zu sehen. Für die Aquila A210 ergeben sich unter Berücksichtigung der Flugzeiten CO₂-Emissionen von 16,55 Tonnen sowie Kraftstoffkosten von rund 13.500 €.

Ergebnisse für Schritt 1 Bestandsaufnahme

Flugzeuge:	2 Zweisitzer 2 Viersitzer
Flugstunden:	ca. 900 h
i) jährliche CO ₂ -Emissionen (Bestand):	
Aquila A210	16,55 Tonnen CO ₂
Gesamt	70,89 Tonnen CO ₂
ii) jährliche Kraftstoffkosten (Bestand):	
Aquila A210	13.544 €
Gesamt	58.003 €

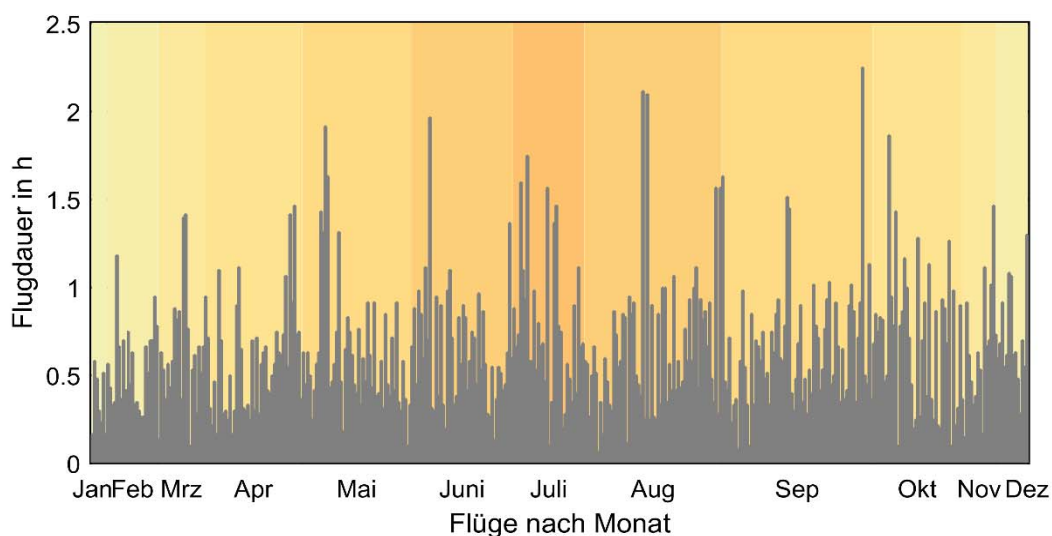


Abbildung 1: Flugaufkommen der Aquila A201 im betrachteten Beispiel-Verein.

Schritt 2: Überlegungen zur elektrischen Flotte und zum Energiebedarf

Generell gilt, dass die Elektrifizierung der Mobilität aktuell in allen Bereichen voranschreitet. Angefangen im Fahrradsegment, in dem der Marktanteil der Pedelecs im Jahr 2017 bereits 19% erreichte, bis hin zum Individualverkehr, in dem in den kommenden Jahren ein Wachstum zu erwarten ist [8]. Die deutlich verlässlichere Batterietechnik sowie die signifikante Kostenreduktion führen aktuell auch zu einem Umdenken. Vor allem auf Kurzstrecken und im urbanen Bereich ist davon auszugehen, dass sich der elektrische Antrieb auf Grund seiner lokalen Emissionsfreiheit und geringeren Betriebskosten durchsetzen wird [9]. Deshalb haben auch die großen Luftfahrtkonzerne begonnen umzudenken und Forschungsprojekte zum elektrischen Fliegen aufgesetzt. Angetrieben wird dies unter anderem auch durch politische Randbedingungen. So hat z. B. Norwegen beschlossen, dass Inlandsflüge ab 2040 nur noch elektrisch durchgeführt werden dürfen.

Für den Flugsport sind bereits verschiedene Modelle elektrischer Flugzeuge kommerziell zu erwerben. Stellvertretend wird hier das Modell Sunflyer (SF) der Firma Bye Aerospace betrachtet. Der Sunflyer 2 hat zwei Sitzplätze zur Verfügung, während der Sunflyer 4 in Leistung und Platz eher den konventionellen Viersitzern entspricht. Ein weiteres Modell ist z. B. der Alpha Electro der slowenischen Firma Pipistrel. Zum aktuellen Zeitpunkt hat zwar keines der elektrischen Flugzeuge eine Zulassung für den

Notwendige Informationen für Schritt 2

- a) Flugzeiten: aus der Bestandaufnahme (Schritt 1)
- b) Leistung der Flugzeuge: aus Tabelle 2
- c) Minimale elektrische Wirkungsgrade:
 - Entladung des Akkumul., Steigfl. 90%
 - Entladung des Akkumul., Reisefl. 95%
 - Leistungselektronik 95%
 - Elektromotor 95%
 - Ladevorgang 86%

europäischen Luftraum, es ist aber zu erwarten, dass dies bald erfolgen wird.

Die für den Sunflyer ausgewiesenen Neupreise liegen leicht über denen der vergleichbaren konventionellen Flugzeuge (Tabelle 2). Bei einer zukünftig anzunehmenden Serienproduktion wird sich dieser Preis noch deutlich verringern.

Die Bestimmung des Energiebedarfs der Elektroflugzeuge erfolgt wie bei den konventionellen Flugzeugen auf Basis der Flugzeiten. Dabei wird hier angenommen, dass sich das Flugverhalten nicht verändert und die Flugzeiten und damit die Fluglängen aus dem vorherigen Abschnitt übernommen werden können. Allerdings wird der Energiebedarf der Elektroflugzeuge nun direkt auf Basis der Motorleistung im Steig- und im Reiseflug ermittelt. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Sunflyer 2 zweisitzige Maschinen wie die Aquila ersetzt, während der Sunflyer 4 bei viersitzigen

Tabelle 2: Technische Daten ausgewählter elektrischer Flugzeuge.

Flugzeugtyp	Steigflug	Reiseflug	Akkukapazität kWh	Flugdauer h	Neupreis EUR
	Leistung kW	Leistung kW			
Sunflyer 2	80	21,0	83	3,5	304.000
Sunflyer 4	105	32,9	168	4,2	390.000

Maschinen anzuwenden ist. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade für die Entladung des Akkumulators, der Leistungselektronik und des Elektromotors kann der Energiebedarf ermittelt werden. Die Wirkungsgradkette des elektrischen Flugzeugs ist eine der großen Vorteile des elektrischen Fliegens. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor mit Wirkungsgraden zwischen 20 und 35%, je nach Modell und Alter, ist der elektrische Antriebstrang mit Werten von bis zu 90% deutlich effizienter.

Ein Sunflyer 2, für den das Flugprofil der zuvor ebenfalls zusätzlich separat betrachteten Aquila (vgl. Abbildung 1) zugrunde gelegt wird, kommt somit auf einen elektrischen Energiebedarf von 9,7 MWh. In Abbildung 2 ist die Verteilung des elektrischen Verbrauchs tagescharf über die Monate des Jahres für die komplette Flotte des hier betrachteten Vereins dargestellt. Somit ergibt sich im Beispieljahr ein elektrischer Gesamtenergiebedarf für den Betrieb aller Flugzeuge von 38,2 MWh. Dieser Energiebedarf ist in etwa mit dem jährlichen elektrischen Energiebedarf von acht Haushalten zu vergleichen.

Ergebnisse für Schritt 2

i) Energiebedarf für den Vortrieb:

Aquila A210	9,7 MWh
Gesamt	38,2 MWh

ii) Energiebezug aus dem Netz:

Aquila A210	11,2 MWh
Gesamt	44,4 MWh

Hinzu kommt noch, dass beim Laden des Flugzeugs ein zusätzlicher Wirkungsgradverlust auftritt, der von der Ladeleistung abhängt. Hierfür ist ein durchschnittlicher Ladewirkungsgrad von 86% anzusetzen. Der Energiebedarf des Vereins inkl. Ladeverlusten ergibt sich somit zu 44,4 MWh.

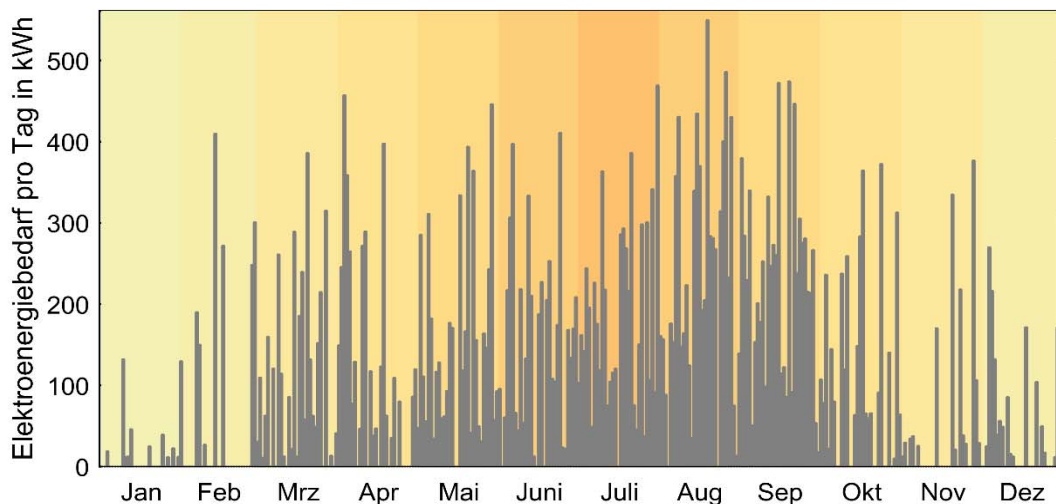


Abbildung 2: Elektrischer Energieverbrauch pro Tag summiert über alle absolvierten Flüge mit den vier Flugzeugen des betrachteten Vereins.

Schritt 3: Überlegungen zur Ladeinfrastruktur

Zum Laden der Flugzeuge stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die individuelle Anpassungen an die Infrastruktur erfordern.

Das Laden ist prinzipiell über vorhandene Steckdosen mit einer Spannung von 230 V möglich. Die Leistung ist in diesem Fall allerdings je nach Absicherung auf deutlich unter 10 kW begrenzt und eine vollständige Ladung für den SunFlyer 2 würde somit bis zu einem Tag benötigen. Um ein schnelleres Laden zu ermöglichen, kann z. B. eine Ladesäule mit einer Leistung von 22 kW am Flugplatz installiert werden. Dieses Modell ist weit verbreitet und wird auch für Elektroautos häufig eingesetzt. Dadurch reduziert sich die Dauer eines Vollladevorgangs auf ca. 4,4 h. Es besteht weiterhin die Möglichkeit die Ladeleistung auf 43 kW oder sogar 170 kW zu erhöhen: Entsprechende Technik ist allerdings deutlich teurer und ein dauerhaftes Schnellladen der Akkumulatoren in den Elektroflugzeugen führt zu einer Reduktion der Speicherkapazität und damit zu einem Reichweitenverlust. Außerdem ist bei den hohen Leistungen zu beachten, dass ein entsprechend hoher Leistungsanschluss am Flugplatz zur Verfügung steht.

Ein wichtiger Aspekt beim Ersetzen der konventionellen Flugzeuge ist, dass der bisherige Flugbetrieb nahezu unverändert aufrechterhalten werden kann. Dazu muss der Energiebedarf der Flüge während der verfügbaren Bodenzeiten (= Ladezeiten), unter der Berücksichtigung eventuell vorhandener Rest-

Notwendige Informationen für Schritt 3

Zu berücksichtigen ist:

- Ladeleistung muss ausreichend hoch sein, um das Flugprofil zu befriedigen/den Flugbetrieb aufrecht zu erhalten
- zu hohe Leistung ist aus ökonomischer Sicht nicht zu favorisieren

Tabelle 3: Übersicht zu den zu berücksichtigenden Kosten bei der Installation der Ladesäulen.

Komponente	Kosten EUR
Je 22 kW Ladesäule	7.000
Je Ladekabel	700
Installation einer Ladesäule	2.000

energie aus dem vorherigen Flug, mit der zur Verfügung stehenden Ladeleistung gedeckt werden können. Am hier betrachteten Beispiel kann mit Hilfe eines Berechnungswerkzeugs gezeigt werden, dass die benötigte Energie für die jeweils nächsten Flüge zweier Flugzeuge mit einer Ladeleistung von 22 kW nahezu komplett abgedeckt werden. Je nach Flugverhalten in anderen Vereinen können auch geringere Ladeleistungen ausreichen oder höhere notwendig werden.

Jede Ladesäule ist mit je zwei Steckdosen ausgestattet. Somit sind für die vier Elektroflugzeuge insgesamt zwei Ladesäulen notwendig. Ein weiterer Kostenfaktor ist die Installation, die je nach Umgebungsbedingungen unterschiedlich teuer ist. Vor allem Faktoren wie Erdarbeiten zur Verlegung von Kabeln beeinflussen den Preis. Die Kosten für die Installation sind in Tabelle 3 abgeschätzt [10].

Ergebnisse für Schritt 3

i) Ladeinfrastruktur für ein Flugzeug:

Leistung 22 kW
Kosten ca. 9.700 €

ii) Ladeinfrastruktur für vier Flugzeuge:

Leistung 2 x 22 kW (hier ausreichend)
Kosten ca. 20.800 €

iii) Wartungskosten für die Ladeinfrastruktur:

2,5% der Anschaffungskosten pro Jahr

Schritt 4: Überlegungen zur Wahl der Strom-Bezugsquelle

Eine Besonderheit des Elektroflugzeugs ist, dass während des Flugs keine CO₂-Emissionen anfallen. Die Emissionen während der Stromerzeugung sind stattdessen zu berücksichtigen. Hierbei ist die Bezugsquelle der elektrischen Energie von besonderer Bedeutung. Diese ist ein entscheidender Hebel zur Reduzierung der Emissionen durch elektrische Verbraucher. Durch die Umstellung auf den elektrischen Flugbetrieb wird der Bedarf an elektrischer Energie deutlich zunehmen. Daher wird dieser Aspekt hier zunächst erläutert. Dazu wird in die Verwendung von Grau- und Grünstrom unterteilt.

Graustrom

Die elektrische Energie kann aus verschiedenen Quellen bereitgestellt werden, die bei der Emissionsanalyse berücksichtigt werden müssen. Auch wenn die Elektrifizierung zu lokalen Emissionsminderungen führt, kann der tatsächliche Beitrag zu den Klimazielen nur unter Berücksichtigung der Strom-Bezugsquelle ermittelt werden. In der Regel besteht am Flugplatz ein Anschluss an das allgemeine Stromnetz. Damit wird zunächst der aktuelle Strom-Mix verwendet, der durch den Konsumenten nicht beeinflusst werden kann und daher hier als Graustrom bezeichnet wird. Der Anteil an erneuerbaren Energieträgern an der Bruttostromerzeugung lag im Jahr 2017 bei 33,3%. Die genaue Aufteilung ist in Abbildung 3 dargestellt. Durch

den hohen Anteil an Strom aus Kohlekraftwerken liegt der CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Stroms aktuell bei etwa 489 g_{CO2}/kWh [11]. Durch zunehmende Anteile erneuerbarer Energien ist in den kommenden Jahren allerdings mit einer Verringerung dieses spezifischen Emissionsfaktors zu rechnen. Unter Berücksichtigung des aktuellen Emissionsfaktors liegt der CO₂-Ausstoß des Sunflyer 2 mit dem Flugprofil der Aquila für das betrachtete Jahr bei 5,5 Tonnen und der gesamten Flotte bei rund 21,7 Tonnen. Somit können die Emissionen der gesamten Flotte bereits unter Verwendung von Netzstrom auf 30% der bisherigen Emissionen reduziert werden. Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Strompreises für Kleinverbraucher im Jahr 2018 von 29,44 ct/kWh und des errechneten Energieverbrauchs liegen die jährlichen Stromkosten für den Flugbetrieb des Sunflyers bei rund 3.300 € und für den gesamten Verein bei rund 13.000 €. Bei einem günstigeren Stromtarif sind entsprechend geringere Kosten anzusetzen.

Grünstrom

Eine einfache Möglichkeit den spezifischen Emissionsfaktor und damit auch die totalen Emissionen weiter zu verringern ist die Wahl eines speziellen Energieversorgungsvertrags. Hierbei kann ein Anbieter gewählt werden, der Strom vollständig aus erneuerbaren Quellen anbietet. Dieser kalkuliert den Energiebedarf der Kunden auf Basis verschiedener Richtwerte und speist die entsprechende Menge erneuerbarer Energien in das Netz ein. Allerdings ist hierbei besonders die Zeitgleichheit der Produktion und des Verbrauchs der erneuerbaren Energien spielt hier eine wichtige Rolle. Weitere diesbezügliche Informationen sind z.B. vom TÜV Süd zusammengetragen [12].

Notwendige Informationen für Schritt 4

- a) Energiebedarf: aus Schritt 2
- b) Spez. Emissionsfaktor:
 - Graustrom 489 g_{CO2}/kWh
 - Grünstrom 40 g_{CO2}/kWh
- c) Strompreis:
 - z.B. Kleinverbraucher 29,44 ct/kWh

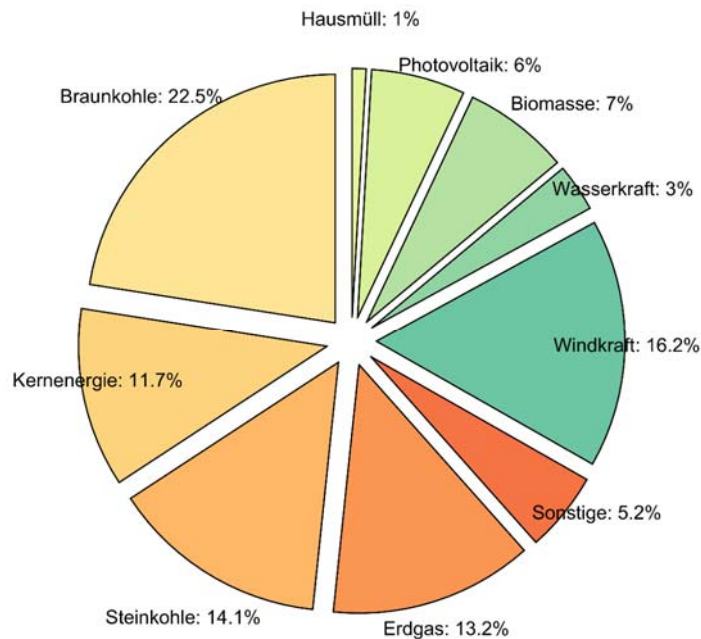


Abbildung 3: Anteile verschiedener Energieträger am Bruttostrom-Mix.

Der tatsächliche Einfluss eines Ökostromtarifs auf den spezifischen Emissionsfaktor hängt wie zuvor von den Anteilen der erneuerbaren Energieträger am Grünstrom ab. Auch für erneuerbare Energieanlagen ist durch Emissionen in der Produktionsphase ein Emissionsfaktor anzusetzen. Wird die energieintensive Herstellung auf die durchschnittliche Lebensdauer und die entsprechend produzierte Energiemenge umgerechnet, ergibt sich aktuell ein spezifischer Emissionsfaktor von 70 g_{CO_2} pro erzeugter kWh für PV-Anlagen und von 25 g_{CO_2}/kWh für Windstrom. Eine detaillierte Aufstellung hierzu ist in [13] zu finden.

Wird nun beispielhaft eine Energieversorgung aus 2/3 Windkraft und 1/3 PV-Anlagen zu Grunde gelegt, ergibt sich damit ein spezifischer Emissionsfaktor von 40 g_{CO_2}/kWh . Unter Berücksichtigung dieses Emissionsfaktors liegt der CO_2 -Ausstoß der gesamten Flotte bei nur rund 1,8 Tonnen und der des Sunflyer unter mit Flugprofil der Aquila bei etwa 0,5 Tonnen.

Der Preis bestimmt sich wie beim konventionellen Strom in der Regel aus dem

Bezugspreis und einer monatlichen Grundgebühr und schwankt von Anbieter zu Anbieter. Der Preis des Ökostroms kann dabei aber auch unter dem zuvor angesetzten Preis für konventionell erzeugten Strom liegen. Daher wird für diesen Vergleich ebenfalls ein Strompreis von 29,44 ct/kWh angenommen.

Ergebnisse für Schritt 4

i) jährliche CO_2 -Emissionen für die Elektroenergiebereitstellung:

auf Basis von Graustrom

Aquila A210	5,5 Tonnen CO_2
Gesamt	21,7 Tonnen CO_2

auf Basis von Grünstrom

Aquila A210	0,5 Tonnen CO_2
Gesamt	1,8 Tonnen CO_2

ii) jährliche Stromkosten:

Aquila A210	3.308 €
Gesamt	13.074 €

Schritt 5: Verrechnung und vergleichende Gegenüberstellung

Im Folgenden werden die bisherigen Ergebnisse ausschnittsweise gegenübergestellt. In Abbildung 4 sind die CO₂-Emissionen des betrachteten Flugvereins für den konventionellen Fall und einer Elektrifizierung der Flotte bei Verwendung von Graustrom und Grünstrom aufgeführt. Hierzu wurden jeweils die Emissionen der zwei- und viersitzigen Maschinen gemittelt. Es wird deutlich, dass die CO₂-Emissionen bereits mit dem heutigen Strom-Mix deutlich gesenkt werden können. Auf der Basis des hier betrachteten Vereins mit den entsprechenden Flugprofilen liegt die Emissionsreduktion im Beispieljahr bei über 67%. Vor allem bei den verbrauchstärkeren viersitzigen Maschinen können sogar fast 75% der Emissionen eingespart werden. Einen weiteren großen Hebel bildet allerdings der Strombezug über einen Ökostromtarif. Hiermit ist eine weitere deutliche Reduktion auf nur noch rund 3% des ursprünglichen Ausstoßes möglich.

Für die ökonomische Betrachtung wird für dieses Beispiel zunächst vereinfachend von einem Benutzungszeitraum von 20 Jahren

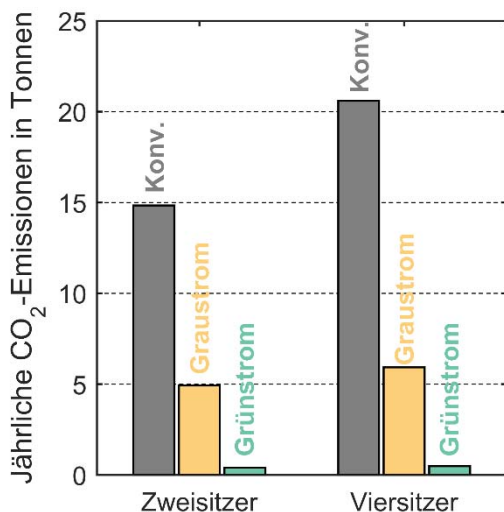


Abbildung 4: Jährliche CO₂-Emissionen des betrachteten Flugvereins.

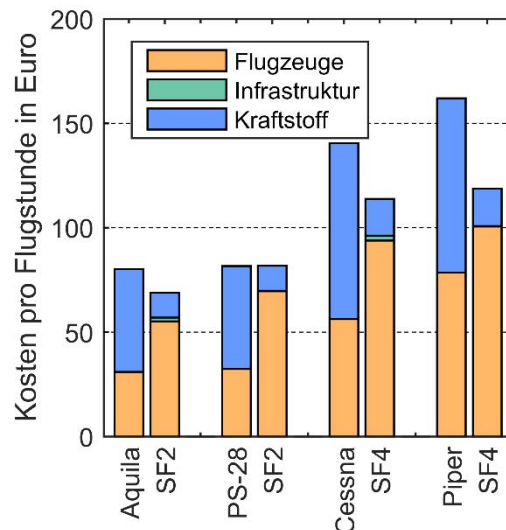


Abbildung 5: Gesamtkosten pro Flugstunde.

ausgegangen. Für jedes Jahr wird das Flugprofil des Beispieljahres angesetzt. Damit ergeben sich für die vier betrachteten Flugzeuge folgende in Abbildung 5 dargestellten Kosten pro Flugstunde. Es ist zu erkennen, dass der Anteil der Anschaffungskosten bei den elektrischen Flugzeugen plus Infrastruktur deutlich höher ist. Der effizientere Flugbetrieb und der dadurch geringere Energieverbrauch führen jedoch zu bis zu 78% geringeren Betriebskosten. Somit liegen die Gesamtkosten der elektrischen Variante für alle Modelle knapp oder deutlich unter denen der konventionellen. Vor allem bei den viersitzigen Maschinen mit dem höheren Verbrauch ergibt sich damit ein großes Einsparpotential. Im Fall der Piper können die Kosten um knapp 26% reduziert werden.

Der Vergleich zwischen der Aquila und der PS-28 verdeutlicht den Einfluss der Flugstunden. Beide werden durch eine SF2 ersetzt, der absolute Anschaffungspreis ist also gleich. Während die Aquila im Vergleichsjahr auf 275 Flugstunden kommt, wurden mit der PS-28 nur knapp 200 h absolviert. Entsprechend liegt der Preis pro Flugstunde höher, da die anteiligen Kosten der Anschaffung des Flugzeugs auf weniger Flugstunden aufzuteilen sind. Pro

Flugstunde reduzieren sich die Flugkosten bei Austausch der Aquila durch einen Sunflyer 2 in diesem Fall um rund 10 €. Im Schnitt aller vier Flugzeuge können in dem hier betrachteten Verein sogar rund 19 € pro Flugstunde eingespart werden.

Damit würde sich ein Umstieg auf elektrischen Flugbetrieb sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht lohnen.

Option: Überlegungen zur Installation einer PV-Anlage

Die Installation einer Photovoltaik-Anlage bietet zwei Möglichkeiten. Zum einen können bei Bezug von Graustrom die CO₂-Emissionen eigenständig gesenkt werden, da die Eigenversorgung den Anteil des Graustroms zu Gunsten des PV-Anteils reduziert. Zum anderen kann bei Netzbezug, egal ob Grün- oder Graustrom, eine Reduktion der Strom-Bezugskosten erfolgen.

Kann der erzeugte PV-Strom nicht direkt genutzt werden, kann dieser in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Für die Einspeisung werden von der Bundesnetzagentur aktuell noch Einspeisevergütungen für PV-Anlagen gezahlt [14], die von der Größe der Anlage und dem Jahr der Installation abhängig sind. Für eine PV-Anlage bis 100 kWp auf einer Freifläche gibt es aktuell noch einen Vergütungssatz von 7,93 ct/kWh. Die Absenkung der

Vergütung ist gesetzlich geregelt und richtet sich an der Brutto-Zubaurate von Solaranlagen in Deutschland aus. Aktuell reduziert sich die Vergütung um 1% pro Monat. Auf die Rentabilität der Anlage hat die sinkende Vergütung aber im hier betrachteten Einsatzgebiet kaum einen Einfluss.

Die Kosten liegen bei einer Freilandanlage, die neben der Start- und Landebahn errichtet werden kann, zwischen 600-1.000 €/kW. Für große Dachanlagen von 100-1.000 kW sind 800-1.000 €/kW zu veranschlagen [15]. Zusätzlich sind für alle Anlagengrößen jährliche Betriebskosten von 2,5% der Anschaffungskosten zu berücksichtigen.

Legt man die Anschaffungskosten auf die produzierte Energiemenge um, liegen die Stromgestehungskosten einer PV-Anlage an diesem Standort um die 7 ct/kWh. Daher ist jede selbst produzierte Kilowattstunde, die direkt „vertankt“ werden kann und nicht aus dem Netz bezogen werden muss, wertvoll. Zur Berechnung einer angemessenen Größe der Anlage sowie entsprechend des Anteils, der direkt zum Laden der Flugzeuge verwendet werden kann, ist ein zeitlicher Abgleich zwischen den Bodenzeiten der Flugzeuge und der zur Verfügung stehenden Einspeiseleistung der PV-Anlagen notwendig. Die tatsächlich zur Verfügung stehende Einspeiseleistung kann dabei aus der maximalen Anlagenleistung, der Ausrichtung der Anlage und solaren Einstrahlraten für den jeweiligen Standort ermittelt werden.

Für den hier beispielhaft betrachteten Verein wurde zunächst die Versorgung eines Sunflyer 2 unter Berücksichtigung des Flugprofils der Aquila, untersucht. Zur Abschätzung, wie viel PV-Leistung zur Versorgung aller Flugzeuge notwendig wäre, sind komplexere Rechnungen notwendig. Zudem wird die Abhängigkeit von den Flugprofilen der einzelnen Flugzeuge komplexer, sodass diese Berechnung nur an konkreten Beispielen erfolgen sollte.

Notwendige Informationen zur Option der Installation einer PV-Anlage

PV-Anlage:

- Dimension (sog. Peakleistung): ist mit einem Berechnungswerkzeug zu ermitteln
- Anschaffungskosten: 950 €/kW
- Betriebskosten: 2,5 %/a
(bezogen auf Anschaffungskosten)
- Einspeisevergütung: 7,93 ct/kWh
- CO₂-Emissionsfaktor: 75 g_{CO2}/kWh
(durch Herstellung der PV-Anlage)

Der dynamische Abgleich des Ertrags der PV-Anlagen mit dem Lastprofil des SF2 zeigt, dass mit einer 23 kW(peak)-Anlage 80% des Energiebedarfs gedeckt werden können. Im Vergleich zu PV-Anlagen, die zur Versorgung von Haushalten installiert werden, die ohne Installation eines Speichers auf maximal 35% kommen, ist dies ein vergleichsweise hoher Wert. Dies ist unter anderem damit zu begründen, dass vermehrter Flugbetrieb oft mit guter Sonneneinstrahlung zusammenfällt. Die Pausenzeiten zwischen den Flügen sind dann ausreichend lang, um den nächsten Flug abzudecken. An Tagen mit geringem PV-Ertrag wird tendenziell auch weniger geflogen, also weniger Energie verbraucht.

Wie oben angeführt, ist für PV-Anlagen ein spezifischer Emissionsfaktor von rund 70 g_{CO2} pro erzeugter kWh anzusetzen. Damit entfallen unter Berücksichtigung des genutzten Anteils pro Jahr rund 0,7 Tonnen CO₂ auf den Betrieb des hier betrachteten Sunflyer 2. Der Netzbezug wird auf 20% reduziert. Im Fall des Graustrom-Bezugs verringern sich die Gesamtemissionen für den Betrieb des Sunflyer 2 auf rund 1,7 Tonnen (Abbildung 6). Allerdings zeigt sich, dass die Emissionen im Fall des Grünstrombezugs bei

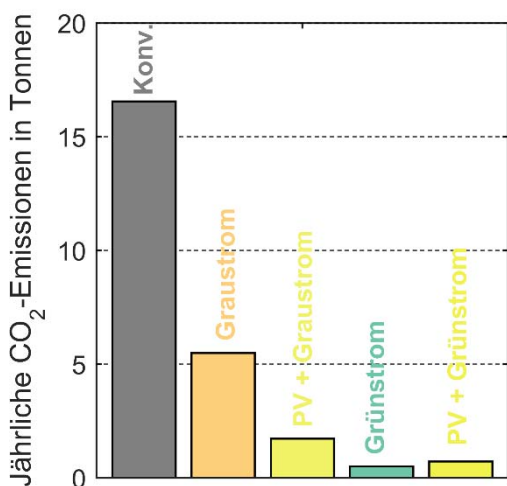


Abbildung 6: Gegenüberstellung der jährlichen CO₂-Emissionen für Aquila A210 und SF2.

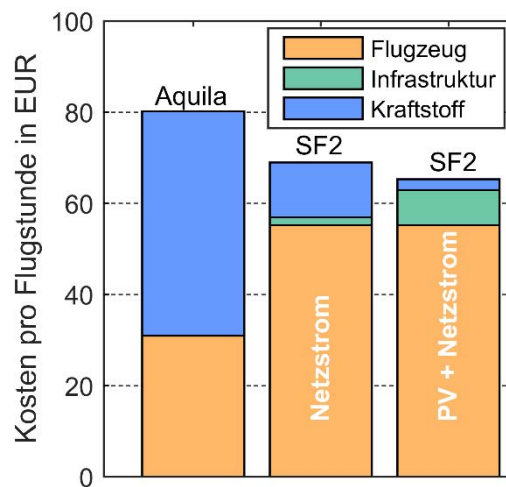


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Kosten pro Flugstunde für Aquila A210 und SF2.

Installation einer PV-Anlage leicht ansteigen. Dies ist mit dem höheren spez. Emissionsfaktor von PV-Anlagen im Vergleich zu Wind- oder Wasserkraft zu begründen.

Für die hier notwendige Anlage sind einmalige Kosten von 21.850 € sowie jährliche Betriebskosten von rund 550 € anzusetzen. Durch den hohen Anteil selbst erzeugten Stroms, sinken die Strombezugskosten zur Versorgung des Sunflyer 2 aus dem Netz auf rund 660 € pro Jahr. Mit dieser Ersparnis können die Anschaffungs- und Wartungskosten bereits kompensiert werden. Würde die Anlage zu den aktuellen Vergütungsätzen installiert, könnten entsprechende Erträge aus der Stromeinspeisung erzielt werden, die zu einer weiteren Senkung der Strombezugskosten führen könnten. Die geringeren Stromgestehungskosten der

Ergebnisse zur Option der Installation einer PV-Anlage zum Betrieb eines SF2

- Anschaffungskosten PV-Anl.: 21.850 €
- Wartungskosten: 546 €/Jahr
- jährliche Kosten Reststrom: 600 €
- jährliche CO₂-Emissionen: 1,72 Tonnen CO₂

PV-Anlage sowie Erträge aus einer möglichen Stromspeicherung wirken sich folglich positiv auf die Berechnung der Betriebskosten aus.

Zwar entstehen durch den Installationsaufwand zusätzliche Anschaffungskosten, diese werden aber im Betrieb mehr als kompensiert, sodass der Preis der Flugstunde für den Sunflyer 2 um weitere 4 € gesenkt werden kann (Abbildung 7).

3. Segelflug-Segment

Obwohl die meisten Emissionen in einem Luftsportverein im Motorflug emittiert werden, gibt es auch im Segelflug Potenziale den Flugbetrieb klimafreundlicher zu gestalten. Wie beim Motorflug, soll dies hier erneut am Beispiel des oben erwähnten Luftsportvereins erläutert werden.

Schritt 1: Bestandsaufnahme

Die Segelflugzeuge verursachen in der Regel im Flug selbst keine CO₂-Emissionen, da lediglich meteorologische Erscheinungen wie thermische und dynamische Aufwinde für den Vor- und Auftrieb genutzt werden. Sofern es sich nicht um einen Motorsegler handelt, ist kein mechanischer Antrieb vorhanden. Allerdings sind zum Start der Flugzeuge Hilfsmittel notwendig. Gängige Startverfahren sind der Flugzeugschleppstart (F-Schlepp) und der Start mittels einer Seilwinde. Bei diesen Startverfahren wird CO₂ emittiert. Der hier beispielhaft betrachtete Luftsportverein operiert überwiegend mit Windenstarts. Der Windenstart ist eines der gängigsten Startverfahren, da es kostengünstig ist und kein zusätzliches Motorflugzeug vorhanden sein muss. Allerdings ist ggf. ein Fahrzeug (hier diesel-betrieben) notwendig, um das Startwindenseil zur Startstelle ausziehen oder zurückzuholen. Für beide Komponenten wird in der Regel Diesel oder Benzin benötigt. Aus dem Verbrauch pro Startvorgang und den CO₂-Emissionsfaktoren der Kraftstoffe (Diesel: 2,6 kg_{CO2}/l, Benzin 2,2 kg_{CO2}/l) können die Emissionen durch die Seilwinde und das Fahrzeug pro Start bestimmt werden. Für die dieselbetriebene Seilwinde liegt der Verbrauch im Durchschnitt bei ca. 0,5 l pro Startvorgang. Damit verursacht die Seilwinde CO₂-Emissionen von 1,3 kg CO₂ für einen Start. Erfolgen die zusätzlich notwendigen Fahrten mit einem älteren Dieselfahrzeug, hier mit einem Verbrauch von 8 l/100km berücksichtigt, beläuft

Notwendige Informationen für Schritt 1

a) Anzahl der Starts:

Quelle: Eigene Aufzeichnungen (z.B. Programm Aircraft Info Desk)

b) Verbrauchsberechnung erfolgt pauschal pro Start:

- Streckenlänge: 2 km
- Spez. Verbrauch Fahrzeug: 8 l/100km
- Spez. Emissionsfaktor Diesel: 2,6 kg_{CO2}/l
- Spez. Kraftstoffkosten Diesel: 1,25 €/l

sich der zusätzliche Ausstoß pro Start auf der insgesamt 2 km langen Strecke auf 0,42 kg CO₂. Dies führt zu CO₂-Emissionen von rund 1,7 kg CO₂ pro Start. Im hier betrachteten Verein finden im Schnitt ca. 1.200 Starts mit der Winde statt. Somit werden insgesamt bis zu 2,1 Tonnen CO₂ emittiert.

Aus dem Dieserverbrauch können unter Berücksichtigung eines Preises von 1,25 €/l jährliche Kraftstoffkosten von 990 € bzw. 0,825 € pro Start ermittelt werden.

Der F-Schlepp ist ein weiteres Startverfahren, das verwendet wird. Da dieser jedoch häufig durch private bzw. vereinsfremde Flugzeuge durchgeführt wird, gibt es zumeist keine konkreten Aufzeichnungen zur Häufigkeit und zum Verbrauch. Ein Startvorgang kann aber auch hier überschlägig mit ca. 8 min veranschlagt werden, womit dann ein Verbrauch von rund 8 l pro Startvorgang ermittelt wird. Somit werden pro Start etwa 18 kg CO₂ emittiert. Sofern das Motorflugzeug im Anschluss den Flug nicht fortsetzt, sondern der Start einzig zum

Zweck des F-Schlepp erfolgt ist, liegen die damit verbundenen Emissionen am hier untersuchten Beispiel um den Faktor 6 höher als durch den Windenstart. Durch den hohen Kraftstoffverbrauch des Motorflugzeugs sind für dieses Manöver Kraftstoffkosten von bis zu 15 € anzusetzen.

Schritt 2: Überlegungen zum elektrischen Windenstart

Zur Einsparung von CO₂-Emissionen können die konventionellen Winden durch neue Elektrowinden ersetzt werden. Verschiedene Modelle sind schon kommerziell verfügbar.

Hersteller mit kommerziellen Lösungen sind Skylaunch und Ulbrich Industrieelektronik [16, 17]. Die Kosten (Tabelle 4) sind vergleichbar mit denen der konventionellen Winden (je nach Typ etwa 75.000 – 100.000 €). Im Gegensatz zu den elektrischen Motorflugzeugen sind die Winden nicht nur kommerziell verfügbar, sondern auch bereits für die Verwendung zugelassen.

Der Verbrauch beider Seilwinden wird von den Herstellern pro Start mit 1,0 bzw. 1,2 kWh angegeben. Daher liegt der Energiebedarf für 1.200 Starts bei 1,2-1,44 MWh.

Tabelle 4: Verbrauch und Anschaffungspreis elektrischer Seilwinden.

Hersteller	Verbrauch kWh/Start	Neupreis EUR
Skylaunch	1,0	100.000
Ulbrich Industrie-elektronik	1,2	85.000

Ergebnisse für Schritt 1 Bestandsaufnahme

Anzahl der Starts:	rund 1200
i) CO ₂ -Emissionen (Bestand) – Windenstarts:	
- Pro Start:	1,7 kg CO ₂
davon Seilwinde	1,3 kg CO ₂
davon Fahrzeug	0,4 kg CO ₂
- Pro Jahr	2,1 Tonnen CO ₂
davon Winde	1,6 Tonnen CO ₂
davon Fahrzeug	0,5 Tonnen CO ₂
ii) Kraftstoffkosten (Bestand) – Windenstarts:	
- Pro Start	0,825 €
- Pro Jahr	990 €
iii) CO ₂ -Emissionen (Bestand) – F-Schlepp:	
- Pro Start:	18 kg CO ₂
iv) Kraftstoffkosten (Bestand) – F-Schlepp:	
- Pro Start:	15 €

Schritt 3: Überlegungen zur Energieversorgung der Winde

Auch hier wird wie in Kapitel 2 in die Versorgung durch Grau- bzw. Grünstrom unterteilt und mit spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren von 489 bzw. 40 g_{CO2}/kWh gerechnet. Details zum Ursprung der Zahlen sind den entsprechenden in Kapitel 2 zu entnehmen.

Für die Berechnung der CO₂-Emissionen der elektrischen Seilwinde wird der elektrische Energiebedarf der Seilwinde nach den Angaben aus Tabelle 4 auf 1,1 kWh pro Startvorgang gemittelt. Entsprechend ergeben sich unter Verwendung von Graustrom für den reinen Betrieb der Seilwinde pro Start 540 g CO₂, wobei mit Grünstrom nur 64 g CO₂ anfallen. Moderne Seilwinden verfügen ggf. über einen automatischen Rückholmechanismus, der das Rückholen per Fahrzeug überflüssig macht. Sofern dies nicht möglich ist, könnte das Dieselfahrzeug durch ein betriebseigenes Elektrofahrzeug ersetzt werden. Mit einem Verbrauch von 0,2 kWh/km fallen dafür zusätzlich 240 g CO₂ bzw. 20 g CO₂ pro Startvorgang an. Damit ergeben sich rund 780 g CO₂ bei Verwendung von Graustrom bzw. 64 g CO₂ bei Grünstrom. Unter Berücksichtigung der Stromkosten sind damit für einen Start 0,47 € an Stromkosten anzusetzen.

Notwendige Informationen für Schritt 3

a) Anzahl Starts: aus der Bestandaufnahme

b) Verbrauch Elektrowinden: aus Tabelle 4.

c) Spez. Emissionsfaktor:

- Graustrom 489 g_{CO2}/kWh
- Grünstrom 40 g_{CO2}/kWh

d) Strompreis:

- z.B. Kleinverbraucher 29,44 ct/kWh

e) Verbrauch Elektroauto: 0,2 kWh/km

f) Wirkungsgrad Tankvorgang: 82%

Ergebnisse für Schritt 3

i) CO₂-Emissionen – Verwendung Graustrom:

- Pro Start 0,78 kg CO₂
- davon Seilwinde 0,54 kg CO₂
- davon Fahrzeug 0,24 kg CO₂
- Pro Jahr 0,93 Tonnen CO₂
- davon Winde 0,65 Tonnen CO₂
- davon Fahrzeug 0,28 Tonnen CO₂

ii) CO₂-Emissionen – Verwendung Grünstrom:

- Pro Start 0,064 kg CO₂
- davon Seilwinde 0,044 kg CO₂
- davon Fahrzeug 0,020 kg CO₂
- Pro Jahr 0,076 Tonnen CO₂
- davon Winde 0,053 Tonnen CO₂
- davon Fahrzeug 0,023 Tonnen CO₂

iii) Kraftstoff-/Energiekosten:

- Pro Start 0,47 €
- Pro Jahr 561 €

Da hier nur die Differenzkosten zu einer konventionellen Winde betrachtet werden, sind weitere Betriebskosten, wie Seilverbrauch oder Wartung in diesen Kosten nicht enthalten. Es ist aber sogar davon auszugehen, dass die Wartungskosten für die elektrische Winde geringer ausfallen werden, da keine Filter-, Öl- oder Bremscheibenwechsel erforderlich sind. Berichte zu guten Erfahrungen einzelner Vereine sind bereits zu finden.

Schritt 4: Verrechnung und vergleichende Gegenüberstellung

Abbildung 8 stellt die CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Startvarianten für Segelflugzeuge graphisch gegenüber. Da die Anschaffungskosten quasi äquivalent sind, bezieht sich der Vergleich nur auf die Kraftstoffkosten. Es wird deutlich, dass durch den Start mit einer dieselbetriebenen Seilwinde im Vergleich zum Schleppstart bereits deutlich Emissionen reduziert werden können.

Der Umstieg auf eine elektrische Seilwinde, die mit Netzstrom betrieben wird, führt zu weiteren deutlichen Einsparungen. Bei der Verwendung von Graustrom reduzieren sich die Emissionen um weitere 60% im Vergleich zur dieselbetriebenen Winde. Bei einem Grünstromvertrag fallen sogar nur noch knapp 3% der Emissionen an. Ähnlich verhält es sich mit den berechneten Kraftstoffkosten, die in Abbildung 9 zu sehen sind. Während der F-Schlepp mit rund 6 € anzusetzen ist, reduziert sich der Kraftstoffpreis bei einem Start mit Dieselwinde und Dieselfahrzeug auf 0,83 €. Bei einem elektrischen Start sind allerdings 50% im Vergleich zur konventionellen Winde einzusparen. Wie zuvor

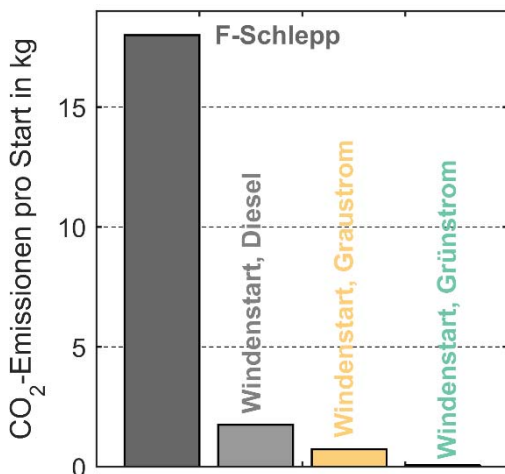


Abbildung 8: Gegenüberstellung der CO₂-Emissionen für verschiedene Optionen.

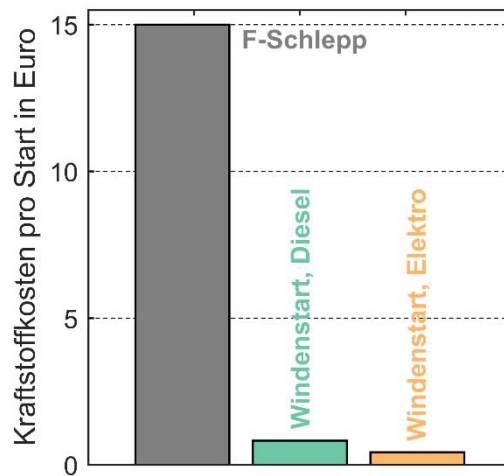


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Kraftstoff-/Energiekosten für verschiedene Optionen.

erwähnt, ist davon auszugehen, dass die Wartungskosten für die elektrische Winde deutlich geringer ausfallen und sich die Differenz in den Betriebskosten weiter zu Gunsten der elektrischen Winde verschiebt.

Zusätzlich zur Analyse des Effekts einer Umstellung auf den elektrischen Windenbetrieb kann festgehalten werden, dass auf den F-Schlepp immer dann verzichtet werden sollte, wenn das Motorflugzeug nur für den Start des Segelflugzeugs abhebt. Der Windenstart bietet deutliche Vorteile in Bezug auf die Energieeffizienz sowie auch auf die CO₂-Emissionen.

4. Zusammenfassung

Der vorliegende Leitfaden soll interessierten Luftsportvereinen als Hilfestellung bei der Reduktion der CO₂-Emissionen dienen. Er beinhaltet notwendige Maßnahmen für eine Bestandsaufnahme sowie eine Schritt-für-Schritt Anleitung für die Umstellung auf einen elektrischen Flugbetrieb.

Die hier beispielhaft an einem Verein durchgeführte Bestandsaufnahme zeigt, dass im Bereich des Segelflugs aber vor allem beim Motorflug eine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen möglich ist, da letzterer im hier betrachteten Beispiel mehr als 97% der Emissionen ausmacht.

Bereits kurzfristig lässt sich eine Reduktion im Bereich des Segelflugs erreichen. In einem ersten Schritt sollte daher die Umstellung auf elektrischen Windenbetrieb erfolgen. Bei Verwendung eines Grünstromtarifs können im hier betrachteten Beispiel nahezu 2 Tonnen CO₂ eingespart werden. Zudem ist durch den effizienteren Betrieb eine deutliche Reduktion der Betriebskosten zu erreichen.

Die Umstellung auf einen elektrischen Motorflug ist mittelfristig eine sehr gute Möglichkeit zur deutlichen Reduktion der Emissionen in den Luftsportvereinen. Die Betrachtung des Beispiel-Vereins zeigt, dass das Ersetzen von vier konventionellen Flugzeugen durch Elektroflugzeuge die Emissionen deutlich reduzieren kann. Mit Abschluss eines Grünstromtarifs ist eine Reduktion auf nur noch rund 3% des ursprünglichen Ausstoßes möglich. Da der Abschluss eines entsprechenden Vertrages eine vergleichsweise leicht durchzuführende Maßnahme darstellt, sollte dieser Schritt mit der Umstellung auf einen elektrischen Betrieb einhergehen. Trotz der höheren Anschaffungskosten und der benötigten Infrastruktur ist durch die stark gesenkten Betriebskosten um bis zu 78% auch hier ebenfalls ein Umstieg aus

ökonomischer Sicht zu empfehlen. Die Preise einer Flugstunde können im Schnitt um 19 € reduziert werden.

Zudem zeigt die beispielhafte Analyse anhand eines einjährigen Flugprofils, dass auch unter Berücksichtigung der längeren Ladedauer eines Elektroflugzeugs im Vergleich zum konventionellen Flugzeug keine Einschränkungen im Flugbetrieb zu erwarten sind.

Sie interessieren sich ebenfalls für die Möglichkeiten zur Reduktion von CO₂ im Flugbetrieb Ihres Vereins?

Gehen Sie gern auf den DAeC e.V. zu. Die Geschäftsstelle stellt bei Interesse einen Kontakt zum Institut für elektrische Energiesysteme her, das Sie bei der Anwendung des Leitfadens berät und Ihnen die ökologischen und ökonomischen Einsparpotentiale konkret für Ihren Verein aufzeigt.

Literatur

[1] Flightpath 2050. Europe's Vision for Aviation (2011). Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-79-19724-6. DOI 10.2777/50266

[2]. Klimaschutz im Sport. Deutscher Olympischer Sportbund Geschäftsbereich Sportentwicklung.
<https://klimaschutz.dosb.de/>
Zuletzt abgerufen am 03.02.2019

[3] Institut Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH (LBST) (2016). Hintergrund-Papier „Power-to-Liquids Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel“, http://www.lbst.de/news/2016_docs/161005_u_ba_hintergrund_ptl_barrierefrei.pdf

- [4] Institut Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH (LBST) (2016). „Nachhaltige Biokraftstoffe“.
http://www.lbst.de/ressources/docs2011/LBST_Broschuere_NachhaltigeBioenergie.pdf
- [5] Wasserstoff und Brennstoffzelle – mobile Anwendung in der Luftfahrt. Kapitel 5. In: Wasserstoff und Brennstoffzelle. Springer Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-662-53360-4_5
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2018). Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf. Zuletzt abgerufen am 22.02.2019.
- [7] The Cessna Aircraft Company: Flughandbuch Cessna Modell 172R (1997)
- [8] Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. Fahrradportal.
<https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/aktuell/nachrichten/marktanteil-von-elektrofahrraedern-waechst-auf-19>. Zuletzt abgerufen am 22.02.2019.
- [9] Global electric aircraft developments continue rapid upward trend. Mai 2018. Roland Berger.
<https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/Electric-propulsion-is-finally-on-the-map.html> Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [10] The Mobility House GmbH: Ladesäule.
https://www.mobilityhouse.com/de_de/abl-emc2-2p4403.html. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [11] Umweltbundesamt (2018). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2017.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_climate-change_11-2018_strommix-2018_0.pdf. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [12] TÜV SÜD AG. Ökostrom-Zertifizierung für Stromanbieter. <https://www.tuev-sued.de/anlagen-bau-industrietechnik/technikfelder/umwelttechnik/energie-zertifizierung/oekostrom-zertifizierung>. Zuletzt abgerufen am 03.02.2019.
- [13] Umweltbundesamt (2017). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-10-26_climate-change_23-2017_emissionsbilanz-ee-2016.pdf. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [14] Bundesnetzagentur (2018).
https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html;jsessionid=B3D800B58FA10CF177F4CD79D379EE44. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [15] Kost, Christian; Shammugam, Shivenes; et al. (2018); Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE (Hrsg.): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien.
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [16] Slylaunch (2018).
<http://www.skylaunch.de/elektrowinde.html>. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.
- [17] Ulbrich Industrieelektronik GmbH (2018).
<http://www.startwinde.de/>. Zuletzt abgerufen am 22.03.2019.

Gefördert von



**INNOVATIONS
FONDS**

Dieses Projekt wird unterstützt durch
den Innovationsfonds des DOSB.