

Inhaltsverzeichnis

1	ABSCHÄTZUNG SCHLEPPDROHNE.....	1
1.1	Abkürzungen:.....	1
1.2	Geschichte und Bilder zum Flugzeugschlepp.....	2
1.3	Schubverlauf mit der Geschwindigkeit.....	3
1.4	Steigraten eines Schleppzuges.....	4
1.4.1	Polaren von Schleppflugzeug und Segelflugzeug.....	4
2	ABSCHÄTZUNG DER WIRKUNGSRADE VERSCHIEDENER STARTARTEN.....	6
3	FALL-UNTERSUCHUNGEN.....	7
3.1	Gleiche Polare bei Schleppflugzeug und Schleppdrohne.....	7
3.2	Polare Schleppdrohne besser als die des Schleppflugzeuges.....	8
3.3	Gleitzahl $SD=20$ und Standschub = 1200 N statt 1000 N.....	9
4	ZUSAMMENFASSUNG.....	10
4.1	Möglicher Aufbau einer Schleppdrohne.....	10
4.1.1	Schleppdrohne als UAV.....	10
4.1.2	Schleppdrohne als 120kg UL.....	11
4.1.3	Einfacher Aufbau UL-Schleppdrohne.....	11
4.2	Startverfahren.....	12
4.3	Ausblick.....	12
5	LITERATUR.....	13
5.1	Flugzeugschlepp und Segelflug.....	13
5.2	Bilder.....	13
5.3	Exceldatei.....	13

1 Abschätzung Schleppdrohne

1.1 Abkürzungen:

- Flug - Fluggeschwindigkeit
- FES - Front Electric sustainer
- SF - Schleppflugzeug
- SZ - Schleppzug
- Seg. - Segelflugzeug

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

1.2 Geschichte und Bilder zum Flugzeugschlepp

Spätestens seit den 1930er Jahren ist der F-Schlepp eine übliche Startart für Segelflugzeuge geworden. Die sehr ausführliche Geschichte des Flugzeugschlepps bis 1980 findet sich in Peter (1981).



Abbildung 1.1: Flugzeugschleppstart an der Weper - Südniedersachsen 1941

Fotoquelle: Hans-Ulrich Renner (Halle/Saale) sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Der Flugzeugschlepp – z.B. Schlepp eines Segelflugzeuges durch ein Motorflugzeug - wurde seit den 1920er Jahren in Kassel Waldau zur Anwendungsreife entwickelt. So beschreiben Antonius Raab und Kurt Katzenstein in DE 491 456 1927 eine „Anschlußvorrichtung für Flugzeugzüge“.

Die ersten Flugzeug-Schlepps wurden bereits Anfang der 1920er Jahre durch Antony Fokker in den Niederlanden und durch Glenn Curtiss in den USA - Manhasset Bay - sowohl mit Booten als auch mit einer Schleppmaschine durchgeführt.

<https://localhistory.pwpl.org/tag/manhasset-bay/>

Dies wird in US-1418 783 (1921) als „Towing Connection For Flying Machines“ bezeichnet und beschrieben.

Die Verbindung zwischen Schleppflugzeug und geschlepptem Flugzeug erfolgte zwischen den Schwerpunkten der Maschinen - und nicht wie heute in der Regel zwischen Sporn des Schleppflugzeuges und Bug des geschleppten Flugzeuges.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

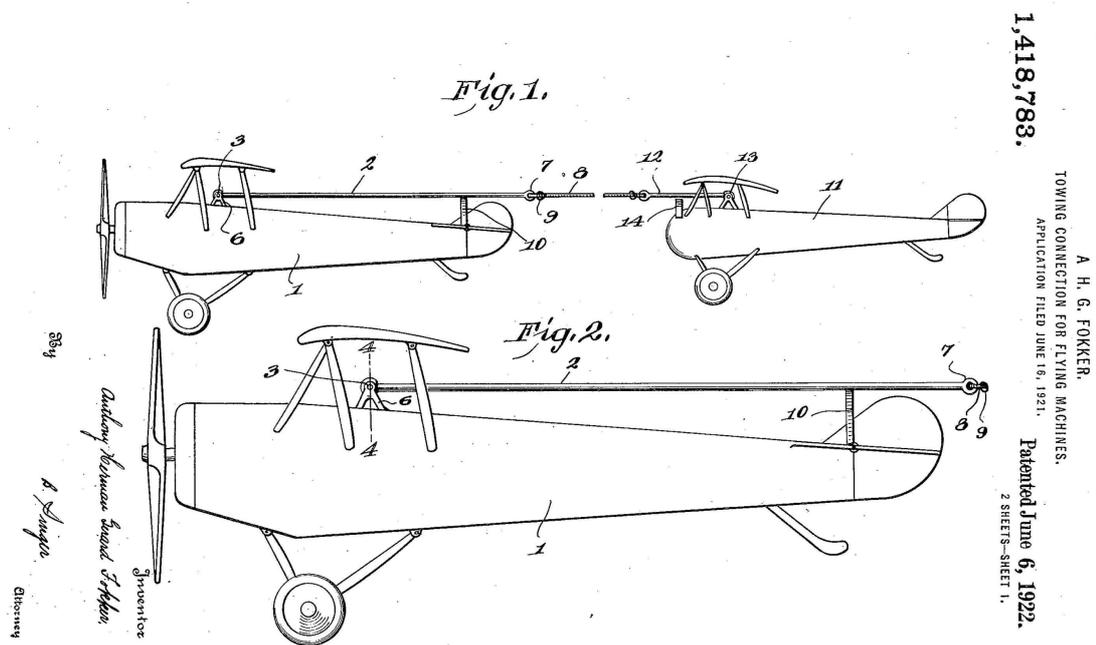


Abbildung 1.2: Patentschrift US-1418 783 von Anthony Fokker,

Wurden in der Privatfliegerei bis in die 1980er Jahre hauptsächlich mit Echo-Klasse Fliegern geschleppt, so setzten sich u.a. aus Kostengründen seit den 1990er Jahren auch UL-Flugzeuge dafür durch, Bildquelle:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Fschlepp.jpg>.



Abbildung 1.3: Schlepp einer ASK-13 durch eine FK-9

1.3 Schubverlauf mit der Geschwindigkeit

Für die Abschätzung der Steigrate eines Schleppzuges sind Masse, Aerodynamik und der Schub des Schleppflugzeuges bei der jeweiligen Geschwindigkeit wesentlich.

Es stehen Messungen für a) Modellflugmotoren und Propeller und b) Standschubwerte für die Rans S7 der FFG Göttingen zur Verfügung. Diese sind:

a) 250 N für 26" x 14" Zoll Luftschrauben bei ca. 6300 rot/min und 20 ° C.

b) 1800 N für die Rans S7 bei 10° C.

Es wird davon ausgegangen -und es wurde gemessen - , dass diese Schübe sich bis zur Geschwindigkeit des besten Gleitens des Schleppflugzeuges ($v_{E_{max}} = 90 \text{ km/h}$) halbieren, und dass diese Abnahme linear erfolgt.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

1.4 Steigraten eines Schleppzuges

Die Differenz zwischen tatsächlichem Schub und dem notwendigen Schwebeschub kann in Steigen umgesetzt werden. Man kann dies auch als Leistung ausdrücken, indem man die Schubkraft bzw. die dagegen wirkende Widerstandskraft mit der Fluggeschwindigkeit multipliziert. Bei einem Schleppzug wirken zwei Widerstandskräfte gegen die Schubkraft, die des Schleppflugzeuges und die des geschleppten Segelflugzeuges. Interferenzeffekte werden hier vernachlässigt.

$$L_{\text{Steig}} = m \cdot g \cdot w$$

$$L_{\text{Schub}} = F_{\text{Schub}} \cdot u_{\text{Flug}}$$

$$L_{\text{Schwebe-Schub}} = F_{\text{Schweb}} \cdot u_{\text{Flug}} = -W_{\text{Schweb}} \cdot u_{\text{Flug}}$$

wenn $L_{\text{Schub}} > L_{\text{Schwebe-Schub}} \Rightarrow$ Steigen

$$\Rightarrow L_{\text{Steig}} = L_{\text{Schub}} - L_{\text{Schweb}} = (F_{\text{Schub}} - F_{\text{Schweb}}) \cdot u_{\text{Flug}}$$

$$\Rightarrow L_{\text{Steig}} = L_{\text{Schub}} - W \cdot u_{\text{Flug}} = L_{\text{Schub}} - (W_{\text{SF}} + W_{\text{Segler}}) \cdot u_{\text{Flug}}$$

$$W_{\text{Schleppzug}} =: W_{\text{SF}} + W_{\text{Segler}}$$

$$w = \frac{(F_{\text{Schub}} - W_{\text{Schleppzug}}) \cdot u_{\text{Flug}}}{(m_{\text{SF}} + m_{\text{Segler}}) \cdot g}$$

Formel 1: Steiggeschwindigkeit w und Widerstand des Schleppzugs

Wenn wir den Widerstand des Schleppzuges und den Schub bei der jeweiligen Geschwindigkeit kennen, können wir mittels Formel 1 das Steigen des Schleppzuges berechnen. Den für diese Rechnung notwendigen Widerstand des Schleppzuges können wir über die Polaren von Schleppflugzeug, bzw. Schleppdrohne und Segelflugzeug ermitteln. Den Schub können wir aus Messungen im Windkanal bestimmen oder aus Standschubmessungen extrapolieren.

In erster Näherung betrachte ich nicht die Veränderung des Widerstandes durch die Erhöhung des Auftriebes und dadurch eine mögliche Anstellwinkelveränderung beim Steigen. Dieser Effekt könnte die Schleppdrohne noch effizienter machen.

1.4.1 Polaren von Schleppflugzeug und Segelflugzeug

Die Widerstände bei den jeweiligen Geschwindigkeiten von Segler und Schleppflugzeug, SF, können wir aus bekannten bzw. approximierten Polaren bestimmen. Approximierte Polaren werden u.a. in Reichmann (1976) und in Wandinger (2011) beschrieben.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

$$w_{Sink} = a_1 \cdot \frac{1}{v_{Flug}} + b_1 \cdot v_{Flug}^3$$

$$w_{Sink} = a_2 \cdot v_{Flug}^2 + b_2 \cdot v_{Flug} + c_2$$

$$a_1 = \frac{1}{2 \cdot v_{E-opt}^2 \cdot E_{opt}}$$

$$b_1 = \frac{v_{E-opt}^2}{2 \cdot E_{opt}^2}$$

Formel 2: Approximation von Polaren

Wie man aus Formel 2 erkennt, kann mit Hilfe der Geschwindigkeit des besten Gleitens, v_{E-opt} und der besten Gleitzahl E_{opt} eine Polare (in der kubischen Formulierung) festgelegt werden¹.

Damit lassen sich über diese beiden Vorgabe-Parameter Werte für ein Schleppflugzeug und eine Schleppdrohne festlegen.

Nehmen wir eine Rans-S7 der FFG-Göttingen als Vergleichsflugzeug, dann ist eine Gleitzahl von 10 bei 90 km/h vermutlich eine gute Annäherung an die Eigenschaften dieses Flugzeuges. Ein SF-25 Motorsegler müsste mit 17 bei 95 km/h gut beschrieben werden. Für eine Schleppdrohne kann man bei vergleichbaren Flächenbelastungen auch ähnliche Geschwindigkeiten annehmen. Die Gleitzahl einer Schleppdrohne kann aber wegen des schmaleren Rumpfes und der größeren Streckung durchaus eine Größenordnung von 20 oder noch mehr erreichen.

Als Segelflugzeug wurde eine ASW-15 angenommen, deren Leistungskennwerte Reichmann (1976) samt der Parameterwerte für die Polaren entnommen werden können. Dabei ist zu beachten, dass mit diesen Parametern die Vertikalgeschwindigkeit dort in km/h berechnet wird.

Die Abschätzung von Schleppdrohne, Schleppzug mit UL und Windenstart für die verschiedenen Antriebskonzepte zeigt große Unterschiede im Wirkungsgrad.

¹ Diese kubische Polarengleichung enthält u.a. die Streckung und von der Flugzeuggeometrie abhängige Größen, so dass der hier vorgeschlagene „Polaren-Vergleich“ zwischen Schleppflugzeug und Segelflugzeug wohl das Schleppflugzeug eher überschätzt.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

2 Abschätzung der Wirkungsgrade verschiedener Startarten

In untiger Tabelle sind einfache Annahmen für den Schlepp auf 500m dargestellt. Verglichen werden F-Schlepp mit Benzinmotor und Elektromotor, Drohnenschlepp mit Elektromotor und Windenstart mit Benzinmotor und elektrisch. Beim elektrischen F-Schlepp und Windenstart werden die bekannten Spritmengen in Energien umgerechnet und aus einem angenommenen Carnot-Wirkungsgrad von 0,3 daraus die notwendige elektrische Energie abgeschätzt. Die beste Gleitzahl der Schleppdrohne ist eher zu klein, die des Schleppflugzeuges eher zu groß angesetzt.

Schlepphöhe	500	m
Masse-Segelflugzeug	300	kg
Masse-Schleppflugzeug	400	kg
Masse-Schleppdrohne	120	kg
Gleitzahl Segelflugzeug	30	
Gleitzahl-Schleppflugzeug	10	
Gleitzahl-Schleppdrohne	10	
Schleppgeschwindigkeit	110	km/h
Standschub-Rans	1800	N
Standschub-Schleppdrohne	1000	N
Schleppzeit-F-Schlepp	274,41	s
Schleppzeit-Drohnen-Schlepp	237,25	s
Steigen-F-Schlepp	1,82	m/s
Steigen-Drohnen-Schlepp	2,11	m/s
Benzinverbrauch Windenstart	1	l
Energieverbrauch Windenstart	8,25	kWh
Energieverbrauch Elektrowinde	2,48	kWh
Benzinverbrauch-F-Schlepp	4	l/Schlepp
Energieverbrauch-F-Schlepp	33	kWh
Energieverbrauch-F-Schlepp - elektrisch	9,9	kWh
Energieverbrauch-Drohnen-Schlepp	1,65	kWh
Wirkungsgrad-F-Schlepp-Benzin	1,24	%
Wirkungsgrad-F-Schlepp- Elektro	4,13	%
Wirkungsgrad-Winde-Benzin	4,95	%
Wirkungsgrad-Winde-Elektro	16,52	%
Wirkungsgrad-Schleppdrohne	24,81	%

Tabelle 1: Vergleich Startarten elektrisch und mit Verbrennungsmotor

Im folgenden werden verschiedene Szenarien von F-Schlepp und Schleppdrohne verglichen.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

3 Fall-Untersuchungen

3.1 Gleiche Polare bei Schleppflugzeug und Schleppdrohne

Es wurden 1800 N Standschub beim Schleppflugzeug und 1000 N Schub bei der Schleppdrohne angenommen.

Als Flugzeugmassen wurden angenommen:

- Masse Segler (ASW-15) 300 kg
- Masse Schleppflugzeug, Rans-S7 400 kg
- Masse Schleppdrohne 120 kg
- Gleitzahl Rans-S7 bei 90 km/h 10
- Gleitzahl SD bei 90 km/h 10

Die Exceldatei zu diesen Abschätzungen ist:

[Sponsoren-ex-Schubkonzepte Abschätzung-V19-SRU-OSTIV-06-2021-11-20](#)

in: F:\Patent-23-carrier-2021-09-10sr\AAAA-Excel-Carrier-Drohne-2021-11-19

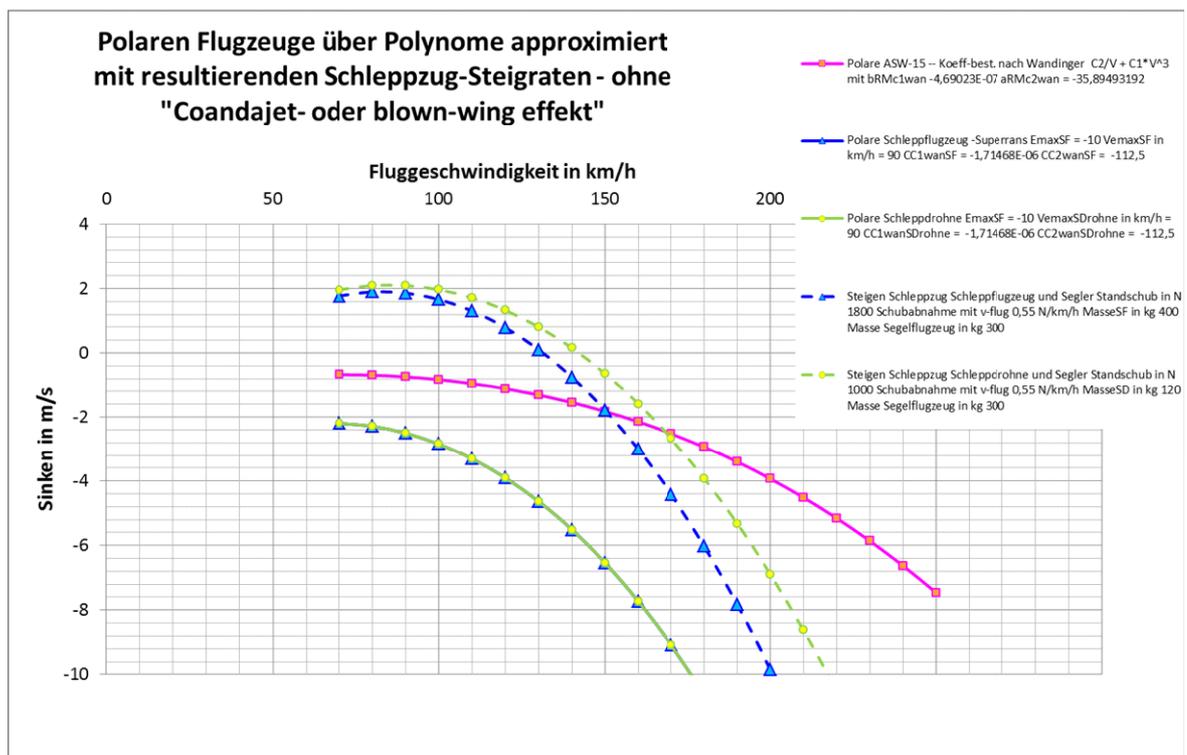


Abbildung 3.1: Polare Schleppflugzeug und Schleppdrohne identisch $E = 10$, $v_{E-opt} = 90$ km/h

Die Schleppdrohne ist bei kleinen Geschwindigkeiten dem normalen Schleppflugzeug ebenbürtig. Bei höheren Geschwindigkeiten ist die Schleppdrohne, wegen des geringeren Gewichtes dem Schleppflugzeug überlegen.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

3.2 Polare Schleppdrohne besser als die des Schleppflugzeuges

Es wurden 1800 N Standschub beim Schleppflugzeug und 1000 N Schub bei der Schleppdrohne angenommen.

Als Flugzeugmassen wurden angenommen:

- Masse Segler (ASW-15) 300 kg
- Masse Schleppflugzeug, Rans-S7 400 kg
- Masse Schleppdrohne 120 kg
- Gleitzahl Rans-S7 bei 90 km/h 10
- Gleitzahl SD bei 90 km/h 20

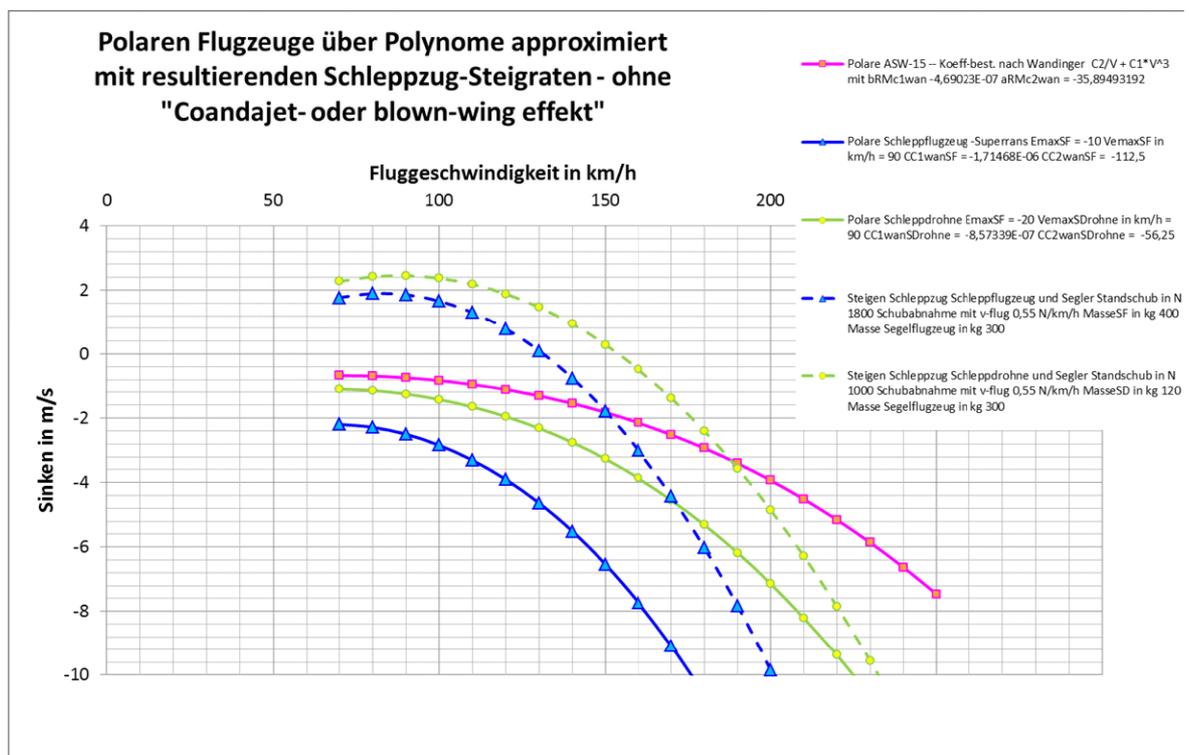


Abbildung 3.2: Gleitzahl Schleppdrohne 20, Gleitzahl Schleppflugzeug 10, $v_{E-opt} = 90$ km/h

Man erkennt, dass der Schleppzug mit Schleppdrohne in diesem Fall mit 0,5 m/s schneller steigt.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

3.3 Gleitzahl SD=20 und Standschub = 1200 N statt 1000 N

Es wurden 1800 N Standschub beim Schleppflugzeug und 1200 N Schub bei der Schleppdrohne angenommen.

Als Flugzeugmassen wurden angenommen:

- Masse Segler (ASW-15) 300 kg
- Masse Schleppflugzeug, Rans-S7 400 kg
- Masse Schleppdrohne 120 kg
- Gleitzahl Rans-S7 bei 90 km/h 10
- Gleitzahl SD bei 90 km/h 20

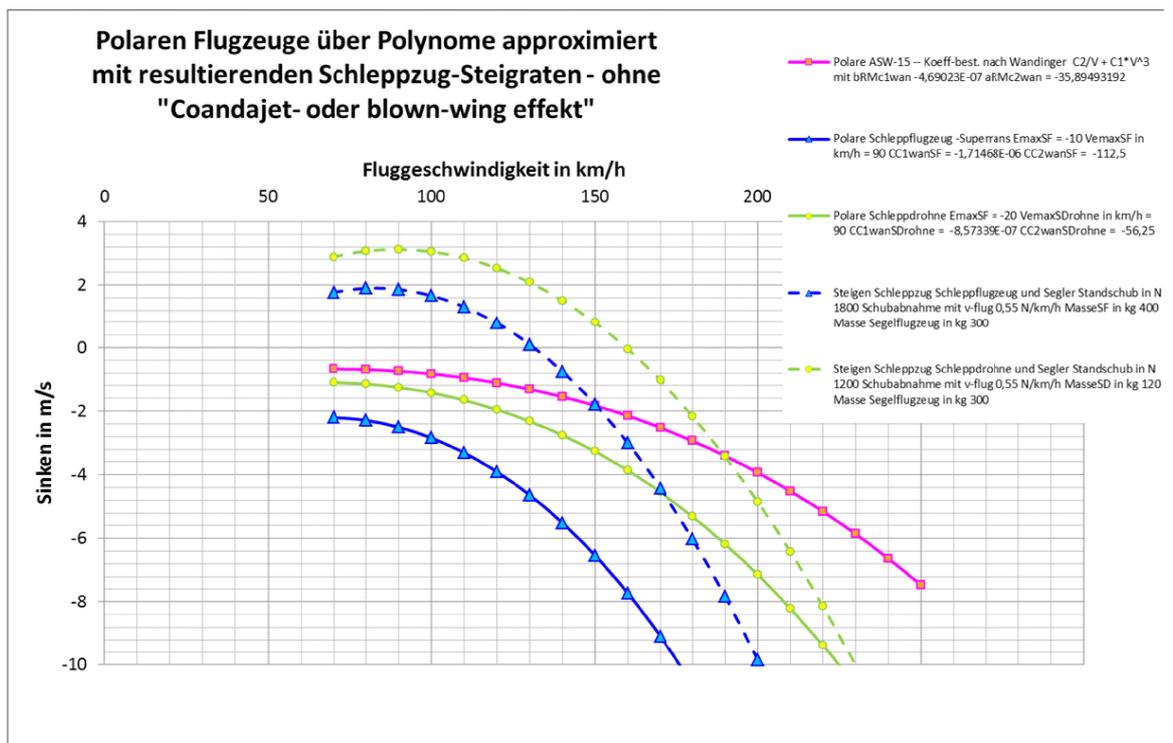


Abbildung 3.3: Gleitzahl SD=20 und auf 1200 N erhöhter Stand-Schleppschub

Die zusätzlichen 200N Schub lassen den Schleppzug mit Schleppdrohne mit gut 3 m/s Steigen.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

4 Zusammenfassung

Die energetischen Betrachtungen zeigen, dass es sehr sinnvoll, bzw. sehr energiesparend ist Schleppdrohnen anstelle von Schleppflugzeugen einzusetzen. Der Vergleich mit der Elektrowinde sollte noch durch den Verbrauch von echten Elektrowinden überprüft werden.

Da Großflugmodelle und Modellschlepp mittlerweile auch zum Stand der Technik gehören, gehört es auch zum Stand des Erlaubten und Machbaren.

4.1 Möglicher Aufbau einer Schleppdrohne

4.1.1 Schleppdrohne als UAV

Eine Schleppdrohne sollte mindestens 4 Elektromotoren mit 250 N besser 300 N Standschub aufweisen. Dies hilft das Fahrwerksdilemma großer Propeller und auch des FES zu vermeiden. Diese Motoren lassen sich in einer Linie über einer Tragfläche montieren und ermöglichen dadurch eine Erhöhung des Auftriebes der Schleppdrohne. Die Spannweite einer Schleppdrohne beträgt skaliert durch $4 \cdot 0,7$ m Propellerdurchmesser mit 0,1 m Abstand der Propellerkreise mindestens 3,2 m. Natürlich kann die Schleppdrohne auch in einer Mehrdecker-Anordnung gebaut werden, um die Flächenbelastung geringer zu halten. Die Steuerung erfolgt über Servos und Fernsteuerung.

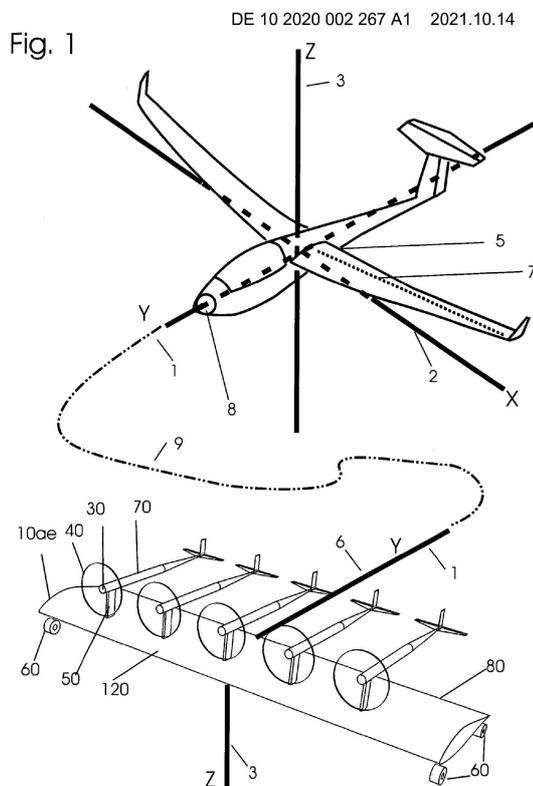


Abbildung 4.1: Schleppdrohne - DE 10 2020 002 267 , B. Rengshausen-Fischbach; G. Koppenwallner (2020)

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

Das Gewicht sollte zwischen 100 – 150 kg liegen. Die Hälfte des Strukturgewichtes ist für die Batterien reserviert. Dabei sind pro Schlepp mit Energiemengen von ca. 2 kWh zu rechnen, so dass selbst die robusten LiFePo4 Akkus mit ihrer relativ geringen Energiedichte von 100Wh/kg ausreichen für mehrere Schlepps.

Es ist aber vernünftiger also schonender für die Batterien, dass die Schleppdrohne zumindest nach jedem 2. Schlepp geladen wird.

4.1.2 Schleppdrohne als 120kg UL

Um die bürokratischen Ängste zu minimieren, kann man die Schleppdrohne natürlich auch als 120 kg UL mit direkter Ansteuerung der Ruder durch den Schlepppiloten konzipieren. Das Gewicht läge dann bei 120 kg + Masse Pilot + Masse Batterien. Also ca. 250 kg. Die energetischen Vorteile würden schrumpfen gegenüber dem derzeitigen Schleppverfahren aber ebenso die mentalen Vorbehalte gegenüber der Schleppdrohne.

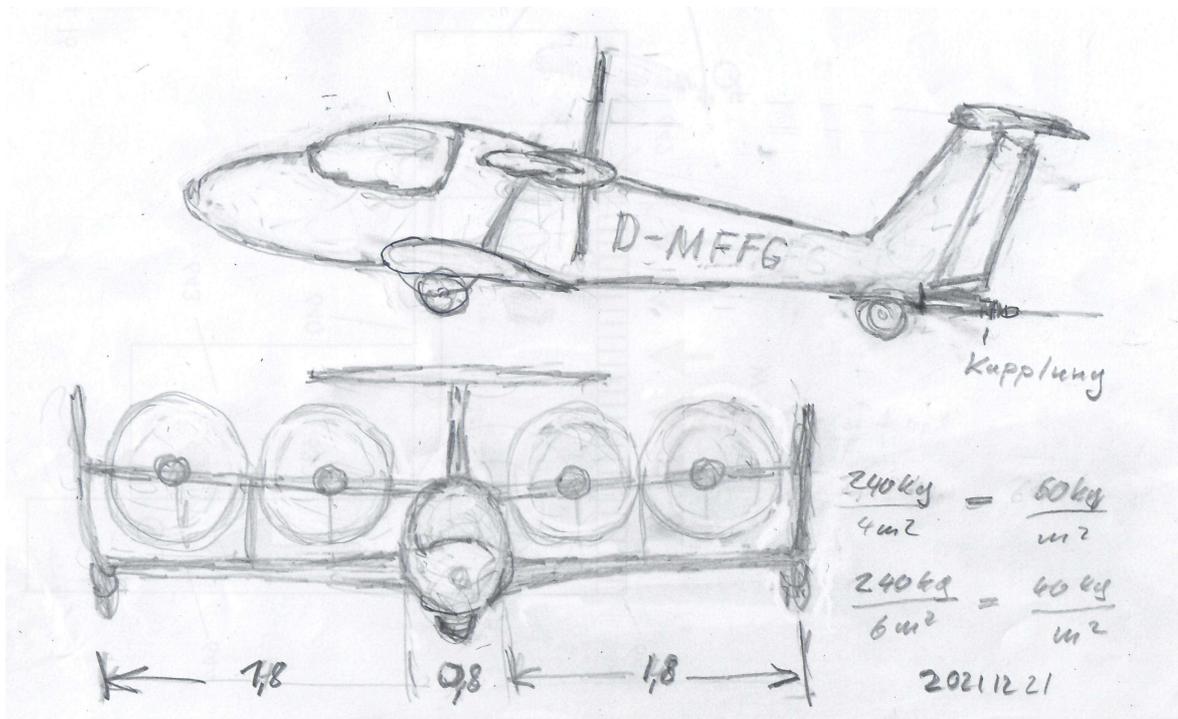


Abbildung 4.2: Skizze Schleppdrohne-UL

4.1.3 Einfacher Aufbau UL-Schleppdrohne

Das Flugzeug wird als Mehrdecker (z.B. 1,5 Decker) ausgeführt mit den Propellern über der Fläche und die Motorentürme in einer schmalen Tragfläche auf Höhe der Motorgondeln verbunden, Abbildung 4.2. Die Strahlflächenbelastung wird bei der Verwendung von 4 32 Zoll ≈ 80 cm Propellern so groß wie bei einem 1,6 m Propeller. Die Spannweite erhöht sich gegenüber einer reinen Schleppdrohne auf $4 * 0.9 \text{ m} + 0,8 \text{ m Rumpf} = 4,4 \text{ m}$. Die Flächenbelastung läge bei 240kg Abfluggewicht und 6 m^2 Flügelfläche bei $60\text{kg}/\text{m}^2$. Bei dieser „schweren“ Ausführung wäre die Berücksichtigung des „blown-wing“ oder „Coanda-Jet“-Effekts sehr sinnvoll.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

4.2 Startverfahren

Mittlerweile gehören autonome Drohnen zum Stand der Technik. Aus zulassungstechnischen Gründen kann jedoch auch eine Schleppdrohne über einen Schlepppiloten verfügen, nur dass dieser im Gegensatz zu früher auf dem Boden mit einer Fernsteuerung steht.

Die Erfahrungen des Mistel-Schlepps zeigen, dass ein Pilot durchaus zwei Flugzeuge steuern kann. Es ist für den geschleppten Segelflugpiloten durchaus denkbar die Schleppdrohne wie den Schlepppiloten durch den Funkverkehr zu leiten.

Das Startverfahren für Uls ist ja bekannt.

4.3 Ausblick

Wir kommen in die Aero-Ära, in der der Gedanke des sparsamen Energieeinsatzes unser Handeln bestimmt. Elektrische Flugantriebe und Schleppdrohnen, die außer Seglern auch motorisierte Flugzeuge schleppen können, sind eine Möglichkeit dafür.

Carrier-Drohne oder Schleppdrohne

5 Literatur

5.1 Flugzeugschlepp und Segelflug

Peter, Ernst; 1981, Der Flugzeugschlepp von den Anfängen bis Heute, Motorbuch Verlag, Stuttgart

Reichmann, Helmut; 1976, Zum Problem der Fahrtoptimierung im *Streckenflug*, Diss. Uni Saarbrücken.

Staudigl, Luitpold; pdf: Verfahren zur Darstellung von Segelflugpolaren, https://streckenflug.at/download/verfahren_zur_darstellung_von_segelflugpolaren.pdf

Wandinger, J; 2011, Ein einfacher Approximationsansatz für die Geschwindigkeitsplare eines Segelflugzeugs, pdf: <https://wandinger.userweb.mwn.de/Person/Publikationen/polare.pdf>

5.2 Bilder

Privatfoto von:

F-Schlepp

<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Fschlepp.jpg>

F-Schlepp Weper historisch

Von: Hans-Ulrich Renner <rennerhansulrich@gmail.com>

Gesendet: Montag, 20. September 2021 14:52

F-Schlepp mit Boot

https://www.vanderbiltcupraces.com/blog/article/historic_events_at_manhasset_bay_seaplane_terminals

<https://localhistory.pwpl.org/tag/manhasset-bay/>

5.3 Exceldatei

Schleppdrohne-Abschätzung-001-2021-12-14