

(System-)Leichtbau für die Luftfahrt der Zukunft

Martin Wiedemann

FA-Wissenschaftstag, 6. Oktober 2022



Wissen für Morgen



Ausgangspunkte:

- **Klimawirkung des Luftverkehrs**
- **Treibstoffe der Zukunft**



Klimawirkung des Luftverkehrs

Neues konsolidiertes Verständnis der Klimaeffekte des Luftverkehrs Lee et al., 2021

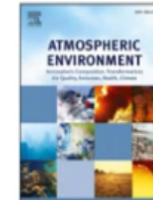
Atmospheric Environment 244 (2021) 117834



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Atmospheric Environment

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>



The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018

D.S. Lee^{a,*}, D.W. Fahey^b, A. Skowron^a, M.R. Allen^{c,n}, U. Burkhardt^d, Q. Chen^e, S.J. Doherty^f, S. Freeman^a, P.M. Forster^g, J. Fuglestedt^h, A. Gettelmanⁱ, R.R. De León^a, L.L. Lim^a, M. T. Lund^h, R.J. Millar^{c,o}, B. Owen^a, J.E. Penner^j, G. Pitari^l, M.J. Prather^k, R. Sausen^d, L. J. Wilcox^m

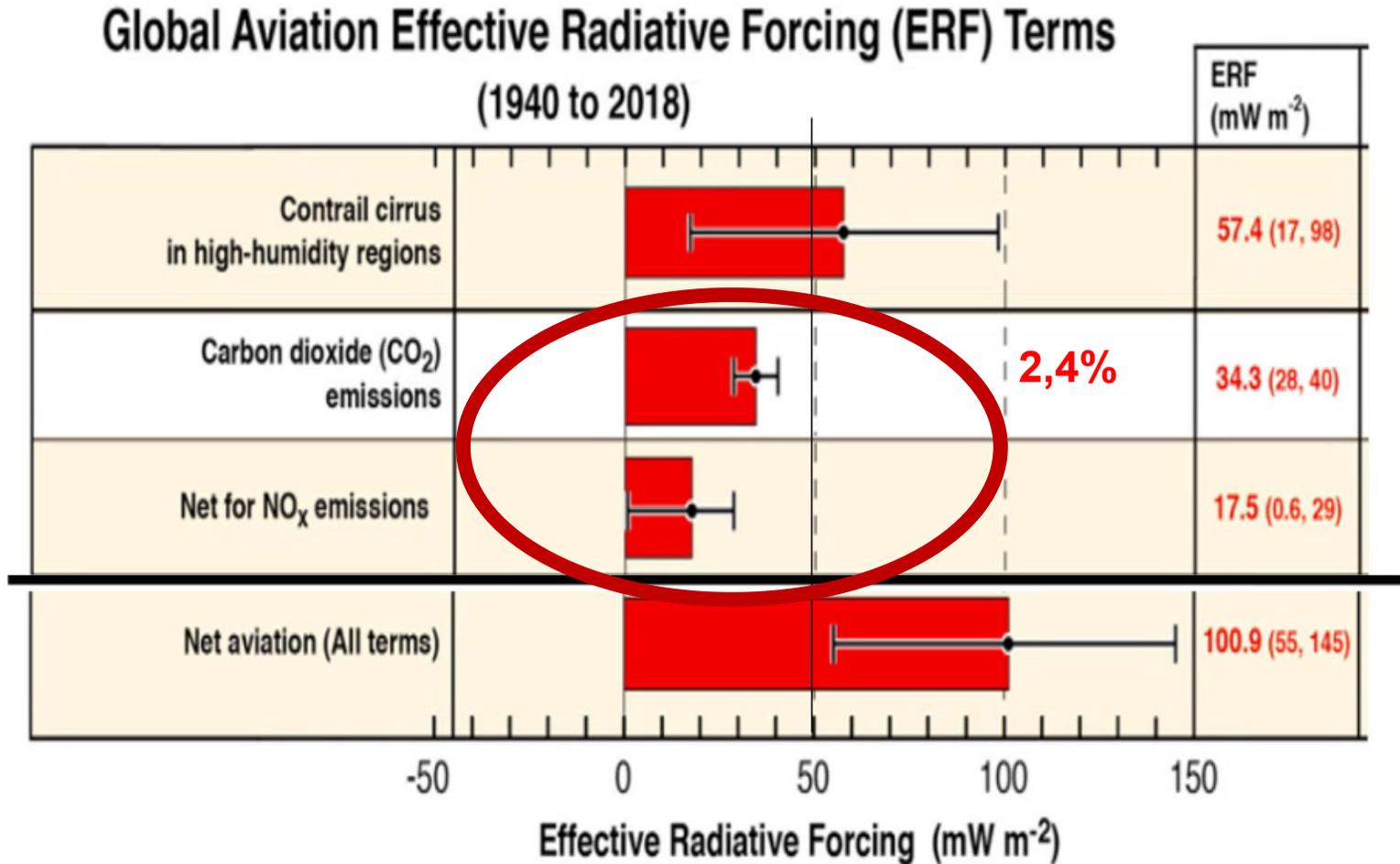
→ **Große Fortschritte** seit IPCC1999 und Lee et al., 2009 (ERF statt RF, neu ERF für Kondensstreifen)

→ **Emissionen des Luftverkehrs** führen zu einer **Energiedeposition** in der Atmosphäre, und damit zu einem positiven Strahlungsantrieb und zur **Erwärmung**. Der **LV** trägt mit **3.5%** zum **globalen Strahlungsantrieb** bei.

Lee, ... **Burkhardt, Sausen** et al., Atmos Env., 2021

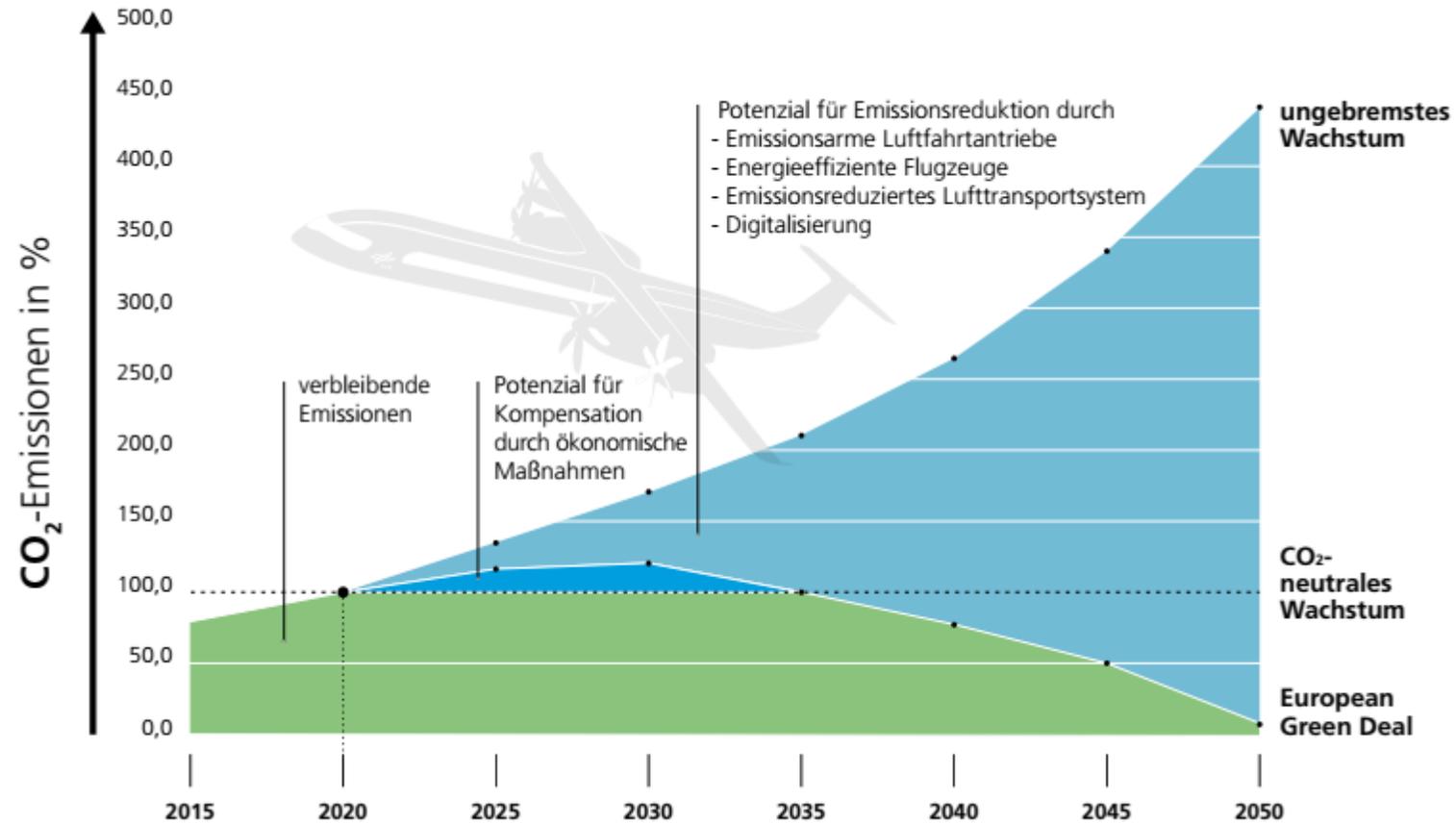


Klimawirkung des Luftverkehrs



from Lee. ... Burkhardt. Sausen et al.. Atmos Env.. 2021

Die Sache mit dem Wachstum



Grafik: AUF DEM WEG ZU EINER EMISSIONSFREIEN LUFTFAHRT - Strategie der DLR-Luftfahrtforschung zur Unterstützung des European Green Deal 2050, 2021



Welche Flugzeugklassen erzeugen wieviel CO₂?

Regionalflugzeuge (RF):
< 1000km

7%

Mittelstrecken-Flugzeuge (Narrow Body: NB)
1000 km – 5000 km

51%

Langstrecken-Flugzeuge (Wide-Body, WB):
> 5000 km

41%

ICCT-Statistik für das Jahr 2019



Mögliche künftige Energieträger

	vol. E-Dichte	grav. E-Dichte	Kosten 2020	Kosten 2030	Kosten 2050	E-Aufwand
	[kWh/l]	[kWh/kg]	[ct/kWh]			In/Out
Kerosin (incl. EUA)	9,7	11,9	5,7	7,4	10	
SAF (e-Fuel)	9,7	11,9	40	35	28	2-5
Wasserstoff (flüssig)	2,36	33,3	22	19	16	1,35-2
Methan (flüssig)	4,42	10,8	29	29	23	1,72
Ammoniak (flüssig)	4,25	6,25	14-22	17-28	15-23	1,6-2
Lithium Batt. (Ziel)	0,35	0,5	7-11	5-8		1

Mögliche Energieträger der Luftfahrt; Kosten Kerosin, SAF, LH2, Methan [1], Kosten Ammoniak [2], Primärenergieeinsatz [3,4] [4], Batterie vol. E-Dichte [5], Batterie grav. E-Dichte [6,7], Batterie Stromgestehungskosten [7]

Konsequenzen im Vergleich zu Kerosin

- **E-Fuel benötigt zur Herstellung bis zum 5-fachen der nutzbaren Energie**
- **Flüssiger Wasserstoff benötigt etwa das 4-fache Tankvolumen bei 1/3 des Gewichts (aber zusammen mit Tank- und Systemen etwa gleiches Gewicht wie Kerosin)**
- **Flüssiges Methan benötigt etwa das 2-fache Tankvolumen und etwa gleiches Gewicht**

[1] Prognos AG, "Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie," [retrieved 30 March 2021].

[2] Öko-Institut e.V., "Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe: Eine Überblicksuntersuchung," URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe.pdf> [retrieved 8 April 2021].

[3] Umwelt Bundesamt, "Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess," URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf [retrieved 31 March 2021].

[4] BMWi, "Strom 2030: Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre," URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/strom-2030-ergebnispapier.pdf?__blob=publicationFile&v=32 [retrieved 8 April 2021].

[5] Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL, "Faktenmaterial Elektrisches Fliegen," URL: https://www.bazl.admin.ch/dam/bazl/de/dokumente/Politik/Umwelt/faktenblatt_elektrisches_fliegen.pdf.download.pdf/Faktenmaterial%20Elektrisches%20Fliegen.pdf [retrieved 8 April 2021].

[6] Bauhaus Luftfahrt, "Die Grenzen der Batterietechnologie," URL: <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/de/forschung/energietechnologien-antriebssysteme/die-grenzen-der-batterietechnologie/> [retrieved 8 April 2021].

[7] Kost C. and Schlegl, T., "Stromgestehungskosten erneuerbare Energien," URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf [retrieved 8 April 2021].

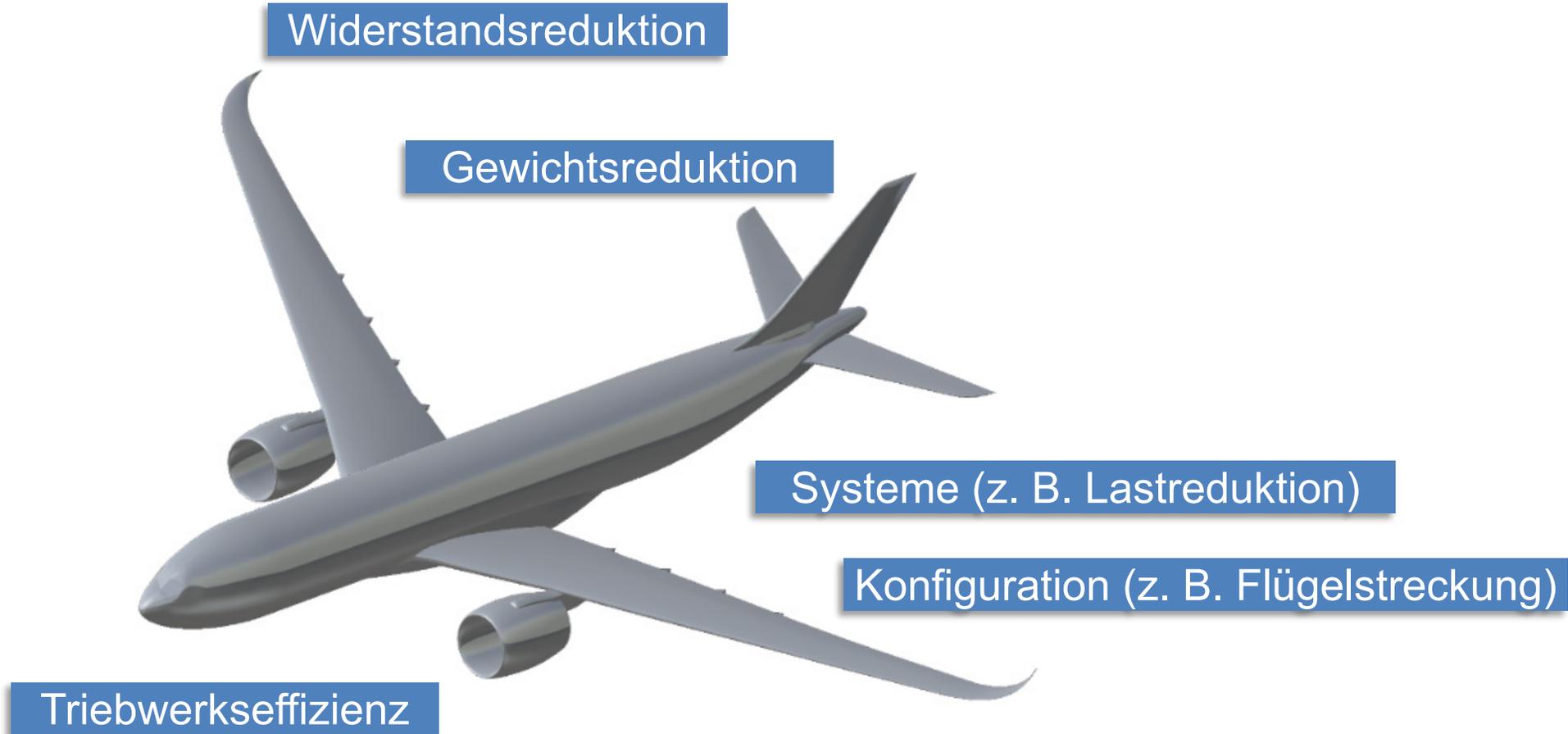


Abschätzung:

- **Bestehendes Energiesparpotential bei Verkehrsflugzeugen gegenüber Stand der Technik**



Wie kann ein Flugzeug Energie sparen?



*Basierend auf Quelle: N. Beck, T. Landa, A. Seitz, L. Boermans, Y. Liu, R. Radespiel: „Drag Reduction by Laminar Flow Control“, Energies 2018, 11, 252.



Treibstoffverbrauch im Reiseflug

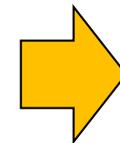
Brequet*):

$$R = E \cdot \frac{v}{b_F \cdot g} \cdot \ln \left(\frac{m_0 + m_t}{m_0} \right)$$

Die Reichweite R eines Flugzeuges ist abhängig von der Gleitzahl E, der Geschwindigkeit v und dem Kehrwert des spez. Treibstoffverbrauchs b_F sowie dem natürlichen Logarithmus von Start- zu Landegewicht (m_0).
 m_t ist das Gewicht des verbrauchten Treibstoffs.

Mit $A = \frac{R \cdot b_F \cdot g}{E \cdot v}$ folgt $m_t = m_0 \cdot (e^A - 1)$

Typischer Narrow-Body (NB)		
E	17,7	Gleitzahl in 10.700 m Höhe
v	230,1 [m/s]	Geschwindigkeit in 10.700 m Höhe
b_F	0,0144 [g/s/N]	Kerosinverbrauch in 10.700 m Höhe
g	9,81 [m/s ²]	
m_0	63.600 [kg]	Leergewicht+Fracht+Reservesprit
R	3.704 [km]	Reichweite (2000 nautische Meilen)



$$m_t = 8.720 \text{ kg}^{**})$$

(Entspricht 1,74 ltr. / Passagier / 100 km)

*) Mehr zu Brequet unter https://de.wikipedia.org/wiki/Breguet'sche_Reichweitenformel

***) Verbrauch im Reiseflug. Start- und Landephase gleichen sich hinsichtlich Kraftstoffverbrauch in etwa aus.



Wieviel Energie spart eine Gewichtsreduktion von 1 Tonne für ein NB?

Mittelstreckenflugzeug (NB), 170 PAX, 2000 nm			- 1 Tonne OWE
Leergewicht (OWE)	[kg]	44.000	43.000
170 PAX	[kg]	17.100	17.100
Reservesprit	[kg]	2.500	2.500
Reichweite R	[km]	3.704	3.704
m_t	[kg]	8.720	8.582
Δm_t	[kg]		-138
$\Delta m_t / m_t$	%		-1,57
1 kg Kerosin = 3,15 kg CO ₂			
ΔCO_2	[kg]		-430
1 kg Kerosin = 1,2 € ₂₀₅₀			
$\Delta \text{€}$	€		-164
1 kg SAF (e-Fuel) = 3,33 € ₂₀₅₀			
$\Delta \text{€}$	€		-456

Ein Mittelstreckenflugzeug fliegt etwa 60.000 mal in seinem Leben (60.000 Flight Cycle)



Wieviel Energie spart eine Gleitzahlerhöhung um 5% für ein NB?

Mittelstreckenflugzeug (NB), 170 PAX, 2000 nm			+5% E
Landegewicht m_0	[kg]	63.600	63.600
Gleitzahl E		17,7	18,6
Reichweite R	[km]	3.704	3.704
m_t	[kg]	8.720	8.280
Δm_t	[kg]		-440
$\Delta m_t / m_t$	%		-5

$$\begin{aligned}
 \text{Gleitzahl: } E &= \text{Auftriebsbeiwert} / \text{Widerstandsbeiwert} = c_A / c_W \\
 \text{Widerstandsbeiwert: } c_W &= \text{Nullwiderstand} + \text{Auftriebswiderstand} = c_{W,A=0} + c_{W,A}
 \end{aligned}$$

Der Nullwiderstand $c_{W,A=0}$ besteht vorwiegend aus Reibungswiderstand -> **Ziel: Reibung reduzieren**

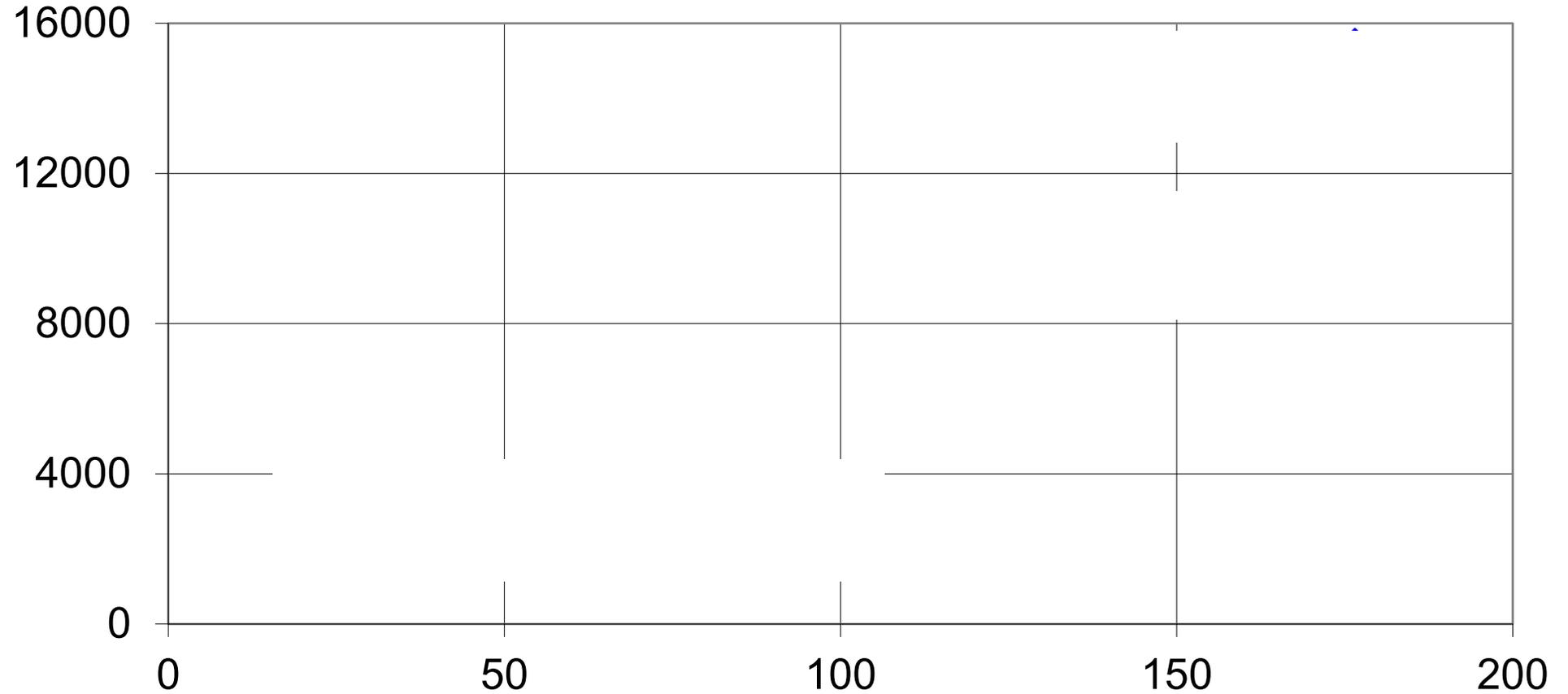


Systemleichtbau

(Faserverbund-) Leichtbau und Funktionsintegration



Grundlage des Systemleichtbaus: Ein schwarzer Werkstoff



Carbonfaserverstärkter Kunststoff CFK:

- **Sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit**
- **Möglichkeit der Verformungskopplung**
- **Möglichkeit der Funktionsintegration**
 - **Vollintegrale Bauweisen**
 - **Keine Korrosion**
 - **Fast keine Ermüdung**



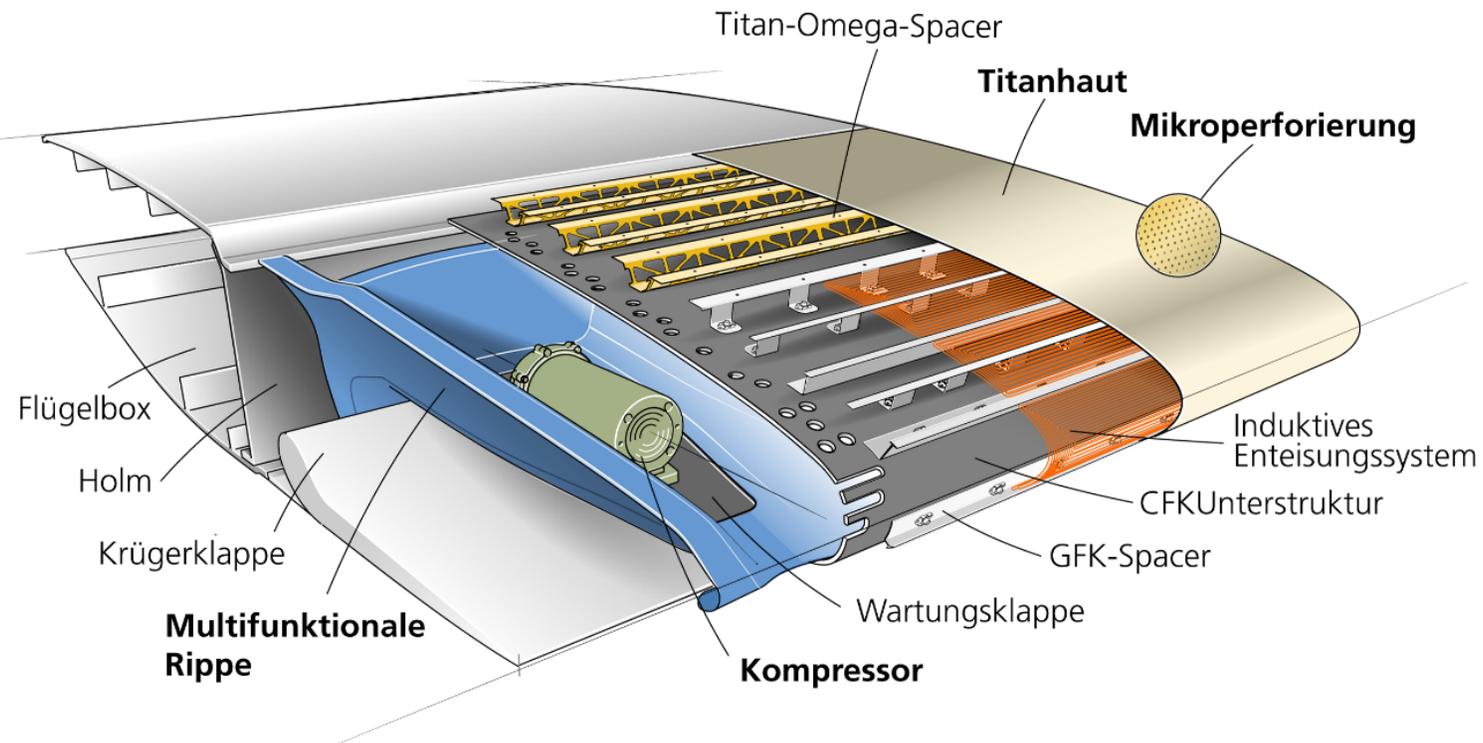
Systemleichtbau mit Integration aktiver Funktionen

- **Strukturen für hybride Laminarhaltung**
 - **Formvariabilität**
 - **Schwingungsbeeinflussung**
- **Structural Health Monitoring – SHM**
 - **Strukturtragende Batterien**



Strukturen für hybride Laminarhaltung

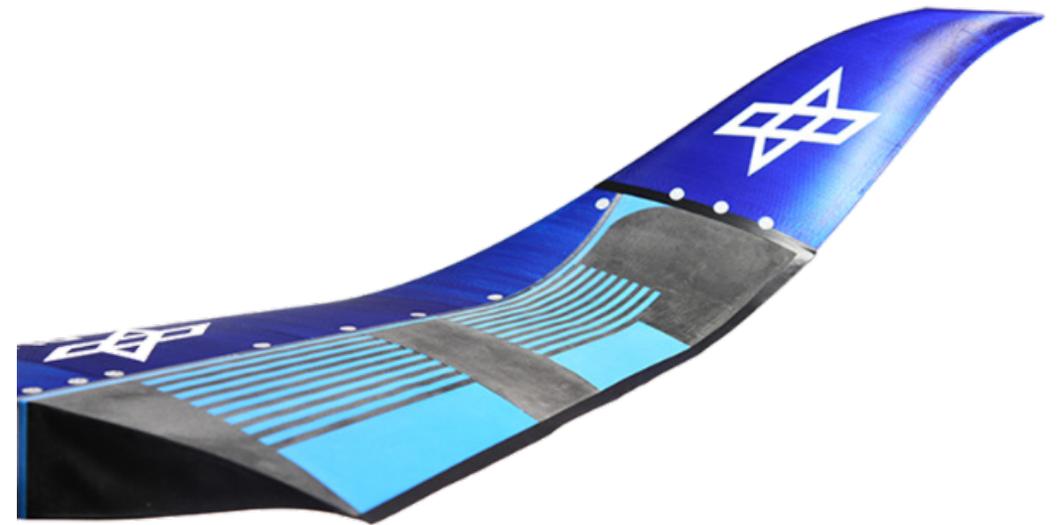
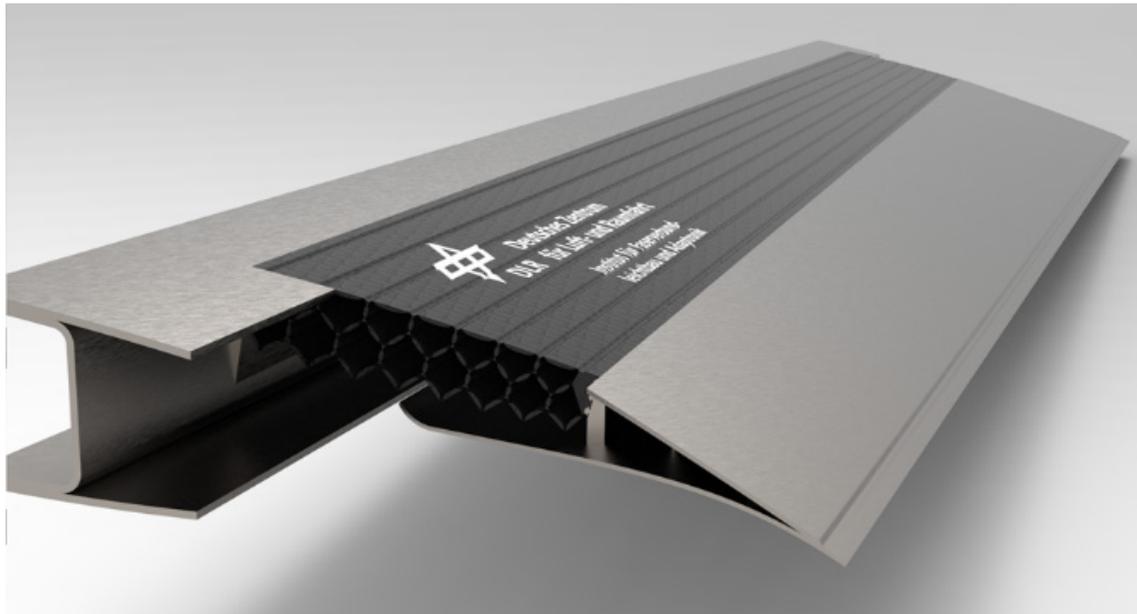
Die systematische und multidisziplinäre Entwicklung eines HLFC-Systems wurde im Clean Sky II Projekt ECHO für das A350 Höhenleitwerk (HTP) prototypisch durchgeführt. Basierend auf einer neuen HLFC-Vorderkanten Bauweise konnte ein Potential von 5% Treibstoffersparnis ermittelt werden.



Haase T, Ropte S, van Kamp de B, Pohya AA, Kleineberg M, Schröder A, Pauly J-L, Kilian T, Wild J, Herrmann U Next generation wings for long range aircraft: hybrid laminar flow control technology drivers. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress, Bd 2020

Formvariabilität

Für ein Flügelprofil wurde durch eine PACS-Auslegung eine Hinterkantenabsenkung um 15° und damit eine theoretische Erhöhung des Auftriebs um den Faktor 3 demonstriert. Ein formvariables Winglet mit strukturkonformer Aktuierung wurde im Rahmen des EU-Projekts NOVEMORE entwickelt und im Windkanal erprobt.



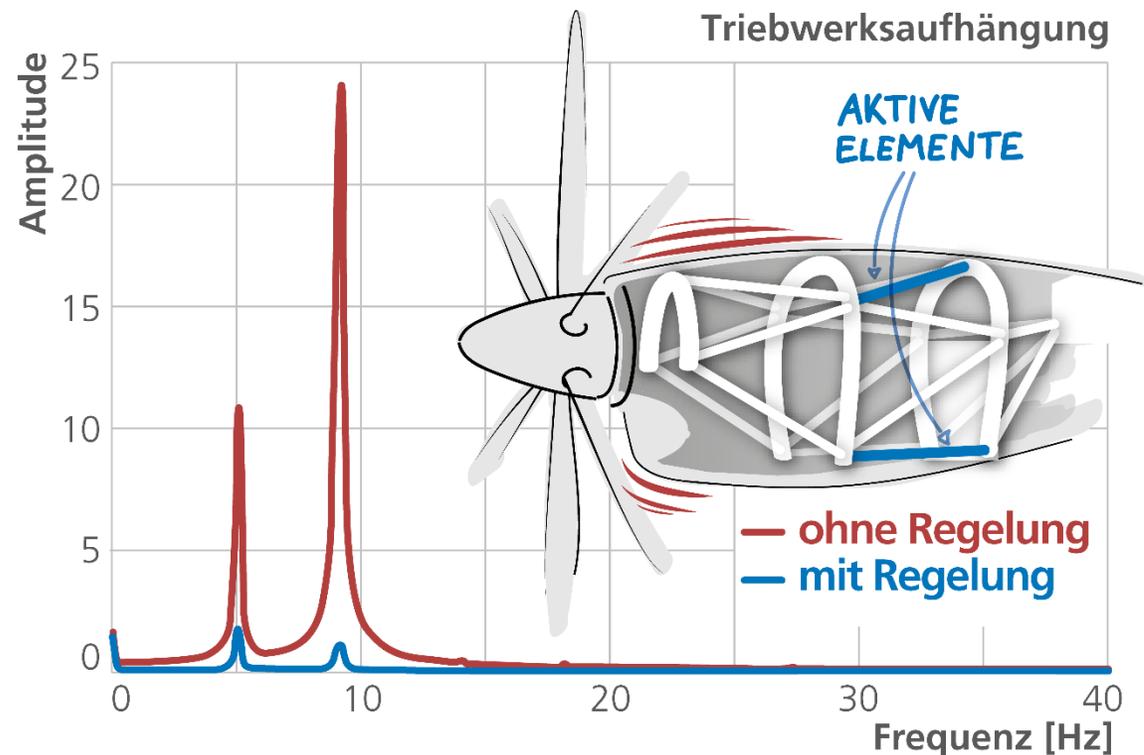
Gramüller B (2016) On Pressure-Actuated Cellular Structures.
Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig

Vasista S, Riemenschneider J, Mendrock T, Monner HP Pressure-Driven Morphing Devices for 3D Shape Changes With Multiple Degrees-of-Freedom. ASME Conference 2018



Schwingungsbeeinflussung

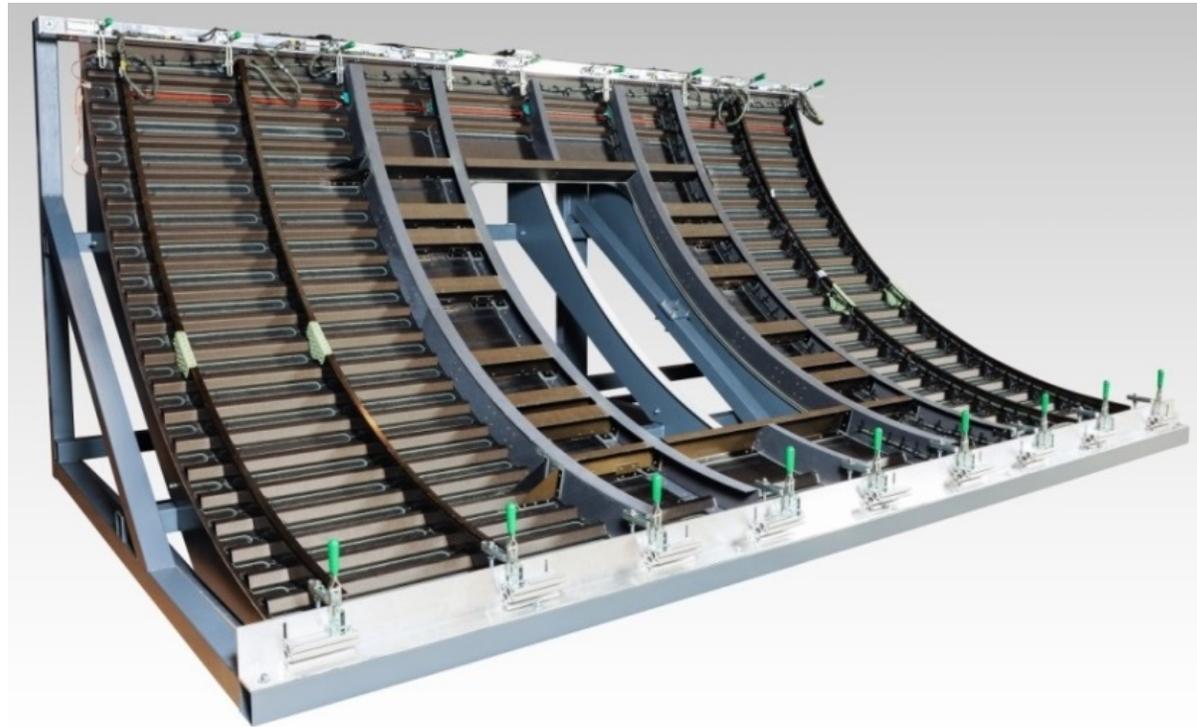
Zwei CFK-Stäbe mit integriertem Piezo-Stapelaktuator in einer Fachwerkstruktur, angesteuert mit einem adaptiven Regler, reduzieren die Amplituden um 40 dB. In einem einer Triebwerksaufhängung ähnlichen Fachwerk wird die Schwingungsübertragung eines Propellers auf die Tragstruktur um 80% bis 90% reduziert.



Schuetze R, Goetting HC, Breitbach E, Grützmaier T (1998) Lightweight engine mounting based on adaptive CFRP struts for active vibration suppression. Aerospace Science and Technology 2(6):381–390. doi:10.1016/S1270-9638(99)80026-1

Structural Health Monitoring

An einer CFK-Türrahmenschale konnten mit einem Netzwerk aus 584 Piezo-Elementen optisch kaum erkennbare Delaminationen (BVID: Barely Visible Impact Damages) von 310 mm² bis 2311 mm² auf 5 mm bis 85 mm genau lokalisiert werden.

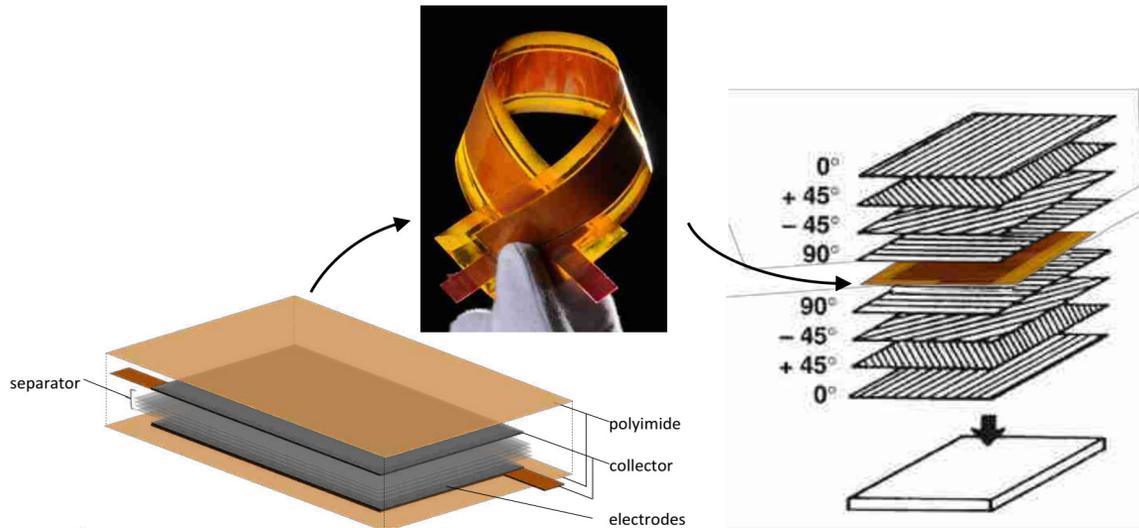


Moix-Bonet M, Schmidt D, Wierach P (2018) Structural Health Monitoring on the SARISTU Full Scale Door Surround Structure. Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites. doi:10.1007/978-3-319-49715-0

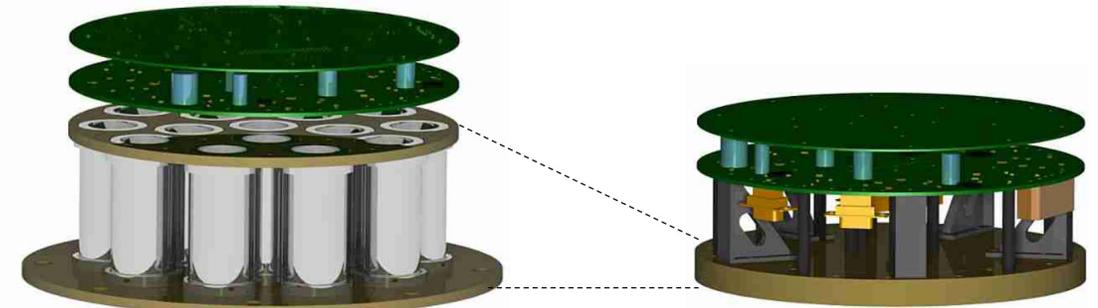


Strukturintegrierte Batterien

Ein strukturintegrierter kapazitiver Speicher in einer Raumfahrtanwendung für die Energiespeicherung aus dem Abbremsen rotierender Massen konnte um 73% leichter und um 78% kleiner gebaut werden als die klassische Vergleichsstruktur mit reinen Batterien. Die mechanische Belastbarkeit blieb dabei zu 80% erhalten.



- Mass reduction 73%
- Reduction in volume 78%
- Comparable electric performance to commercial supercapacitors
- Mechanical strength of 80% compared to non energy saving structure



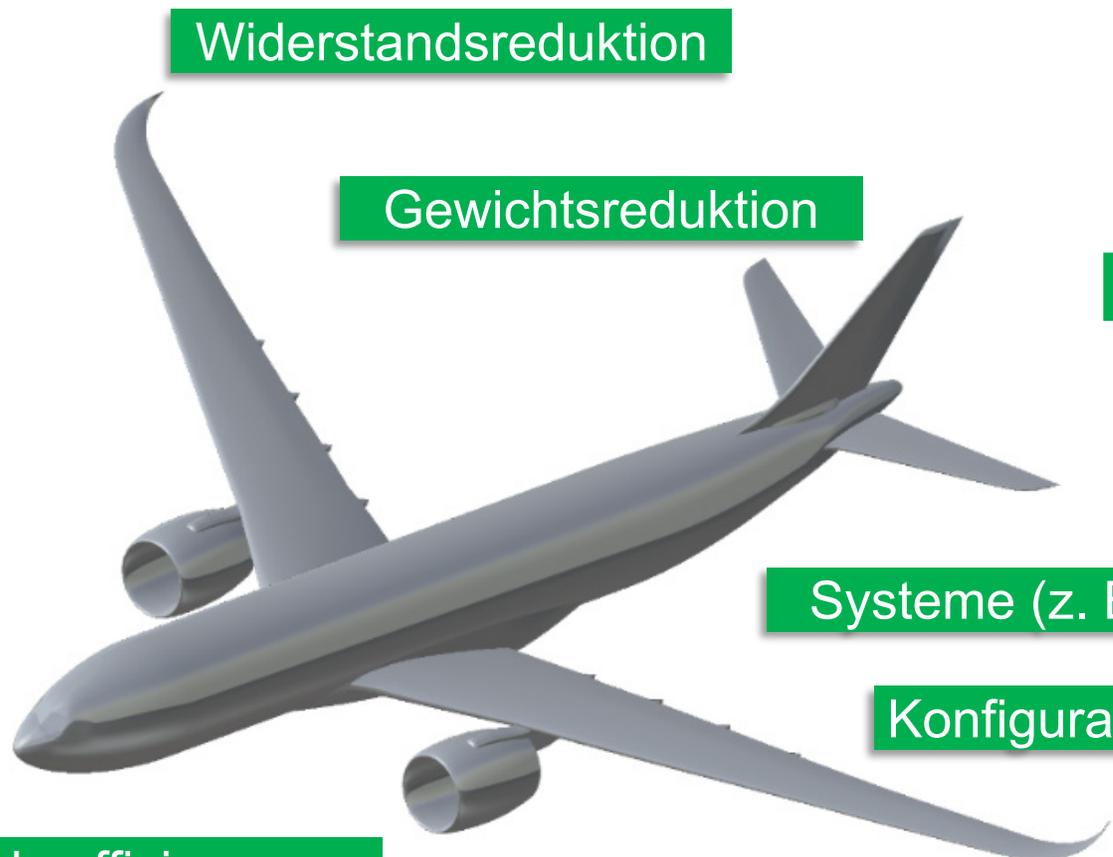
Classical approach

Structural power

Petersen J, Geier S, Wierach P (2021) Integrated thin film Supercapacitor as multifunctional Sensor System. ASME Conference 2021



Was geht noch gegenüber Stand der Technik?



Widerstandsreduktion

Gewichtsreduktion

Systeme (z. B. Lastreduktion)

Konfiguration (z. B. Flügelstreckung)

Triebwerkseffizienz

> 50 %
Energieeinsparung



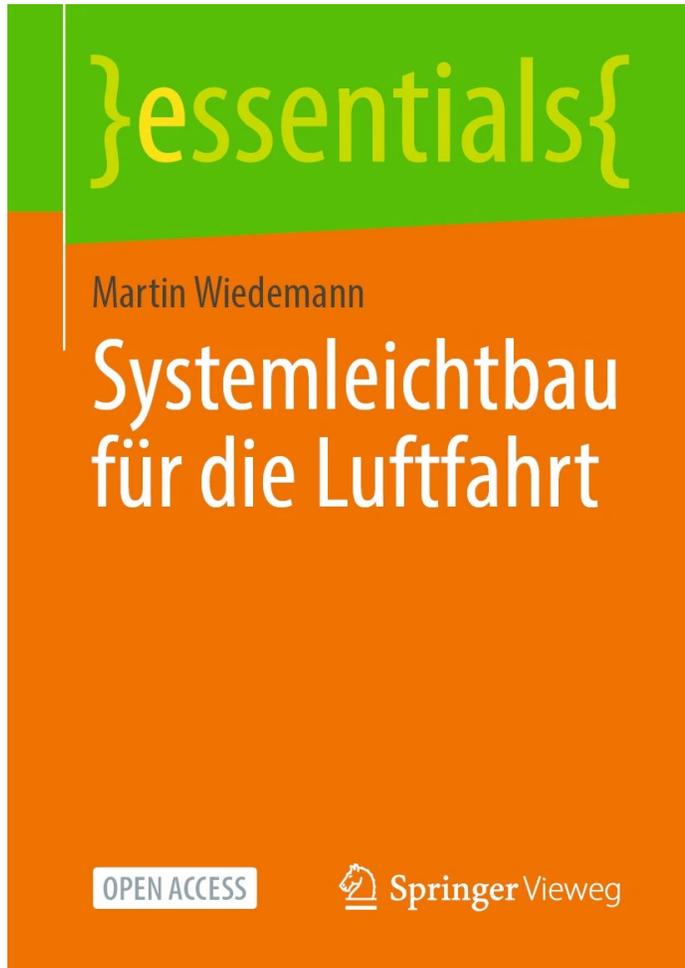
Zukünftige Flugzeuge verbrauchen 50% weniger Energie.

Energieeinsparungen werden unterstützt durch

**Systemleichtbau =
(Faserverbund-) Leichtbau und Funktionsintegration**



Und wer es genauer wissen will:



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Was wiegt eigentlich ein Mittelstreckenflugzeug (NB)?

