

# Zukunft der Luftfahrt?

Martin Wiedemann



SE2A

Wissen für Morgen



## Ausgangspunkt:

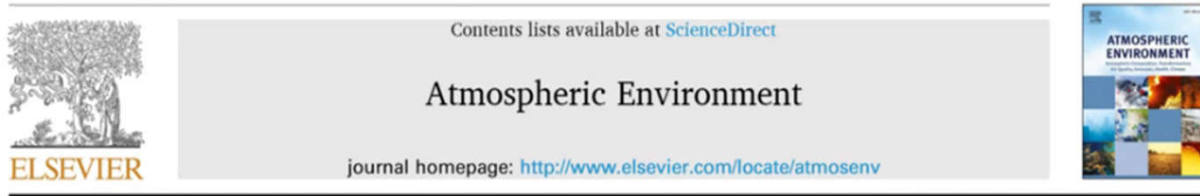
- **Klimawirkung des Luftverkehrs**
  - **Treibstoffe**
- **Treibstoffverbrauch eines Flugzeugs**



## Klimawirkung des Luftverkehrs

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

Atmospheric Environment 244 (2021) 117834



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

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



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

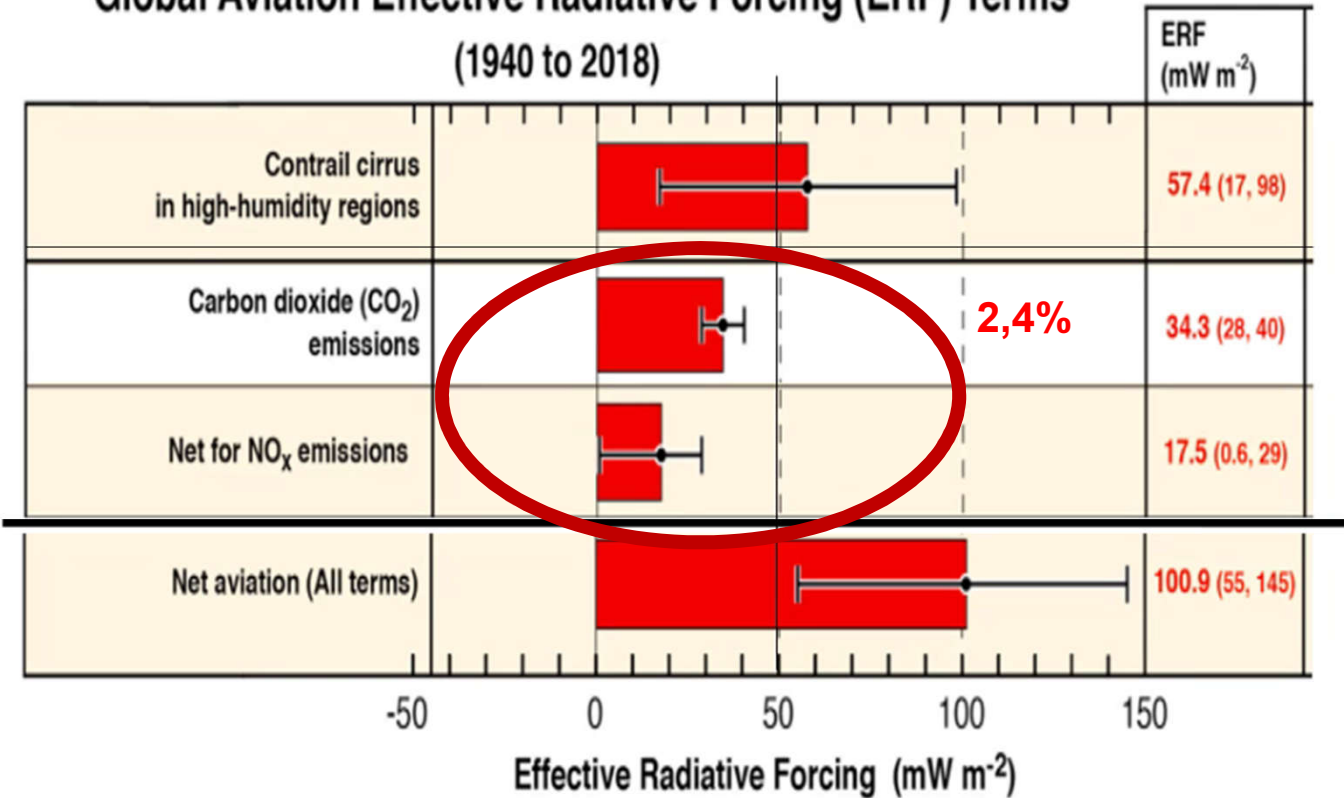
→ **Emissionen des Luftverkehrs** führen zu einer **Energiedeposition** in der Atmosphäre, und damit zu einem positiven Strahlungsantrieb und zur **Erwärmung**. Der **LV** trägt mit **3.5% zum globalen Strahlungsantrieb** bei.

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



# Klimawirkung des Luftverkehrs

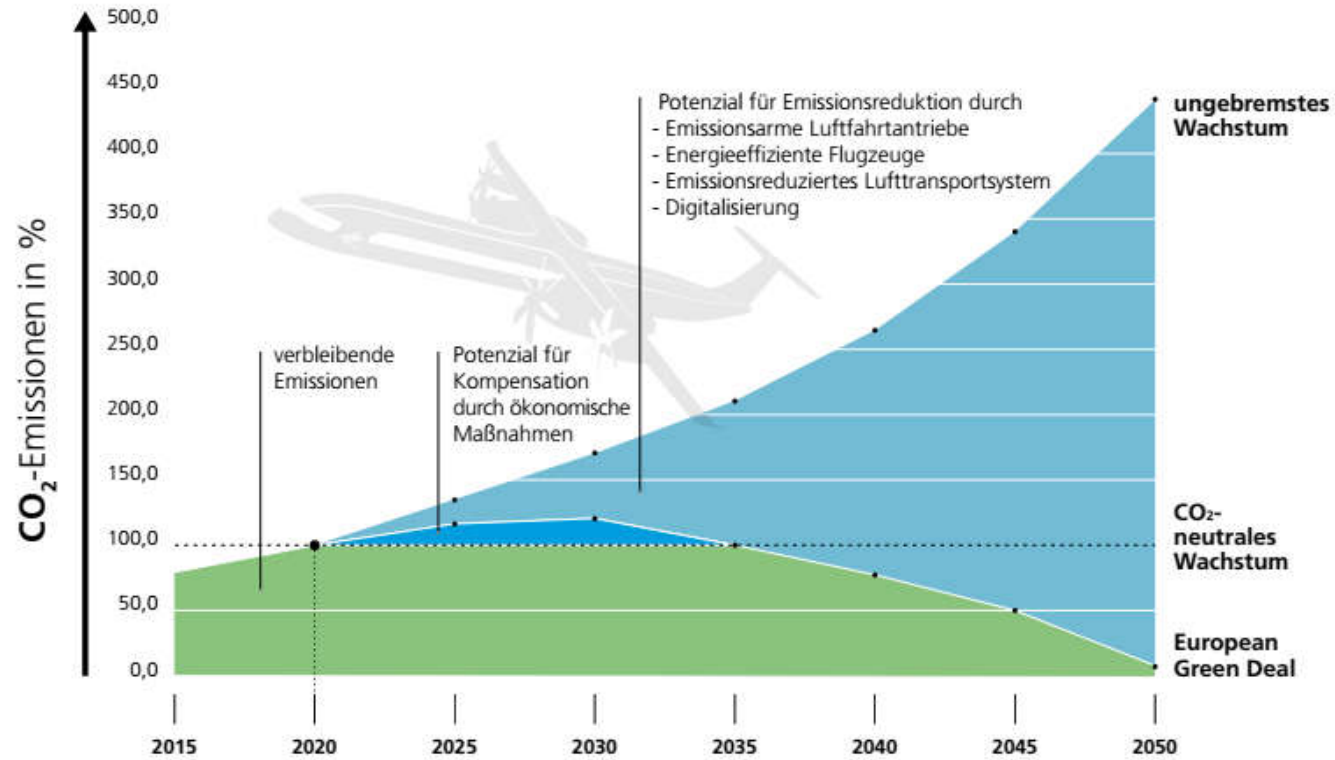
## Global Aviation Effective Radiative Forcing (ERF) Terms (1940 to 2018)



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 CO<sub>2</sub>?

<b>Regionalflugzeuge (RF): &lt; 1000km</b>	<b>7%</b>
<b>Kurz- und Mittelstrecken-Flugzeuge (Narrow Body: NB) 1000 km – 5000 km</b>	<b>51%</b>
<b>Langstrecken-Flugzeuge (Wide-Body, WB): &gt; 5000 km</b>	<b>41%</b>

ICCT-Statistik für das Jahr 2019



## Mögliche alternative 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 aber nur 1/3 des Gewichts (aber zusammen mit Tank- und Systemen bestenfalls 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](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](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](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](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf) [retrieved 8 April 2021].



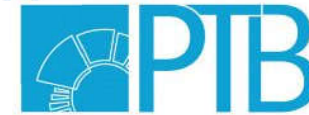


Technische  
Universität  
Braunschweig

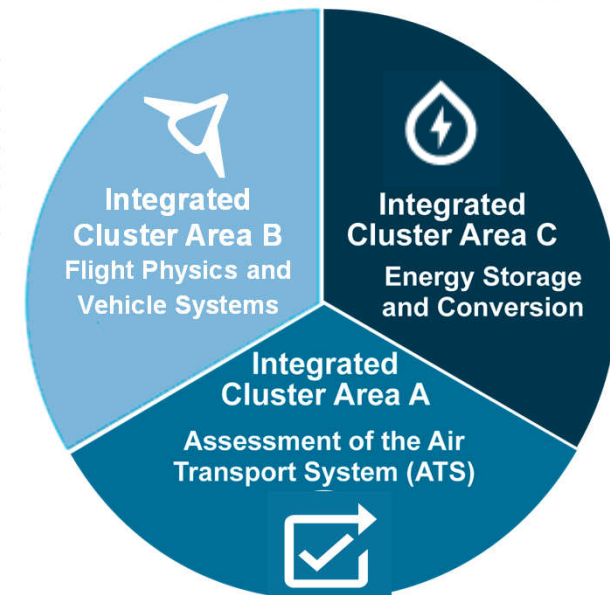


**EXC 2163 – Sustainable and Energy Efficient Aviation – SE<sup>2</sup>A**

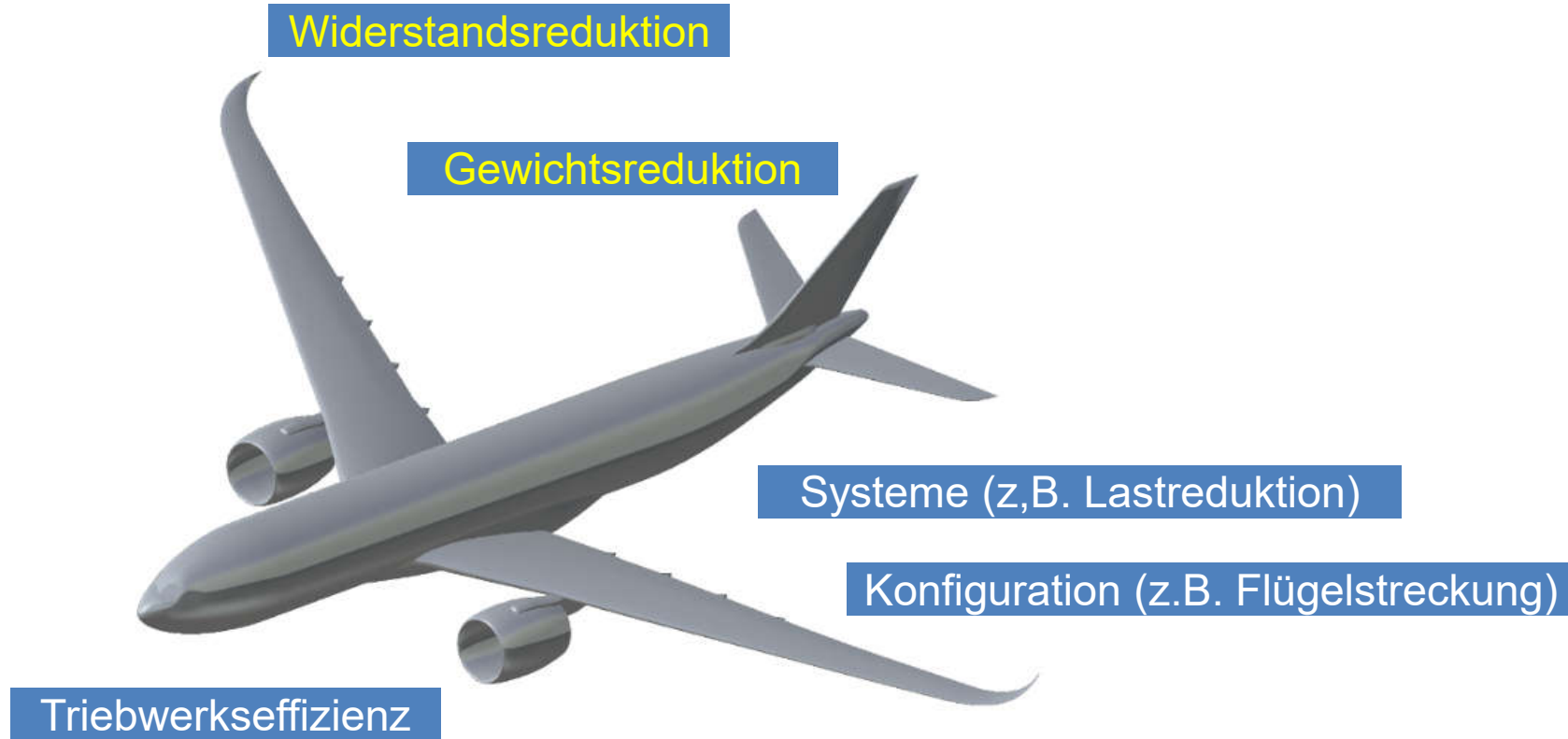
# Das Exzellenzcluster SE<sup>2</sup>A



7 Jahre Laufzeit  
63 Doktoranden  
38 Teilprojekte



## Wo können wir 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.



Achtung: Mathematik! 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 <sup>2</sup> ]	
$m_0$	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](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 Mittelstreckenflugzeug?

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	<b>8.582</b>
$\Delta m_t$	[kg]		<b>-138</b>
$\Delta m_t / m_t$	%		<b>-1,57</b>
1 kg Kerosin = 3,15 kg CO <sub>2</sub>			
$\Delta \text{CO}_2$	[kg]		<b>-430</b>
1 kg Kerosin = 1,2 € <sub>2050</sub>			
$\Delta \text{€}$	€		<b>-164</b>
1 kg SAF (e-Fuel) = 3,33 € <sub>2050</sub>			
$\Delta \text{€}$	€		<b>-456</b>

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



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

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
$\Delta m_t$	[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**



## Also was tun?

- Energie sparen
- Energieeffizienz der Flugzeuge erhöhen
  - Wie kann das gehen?



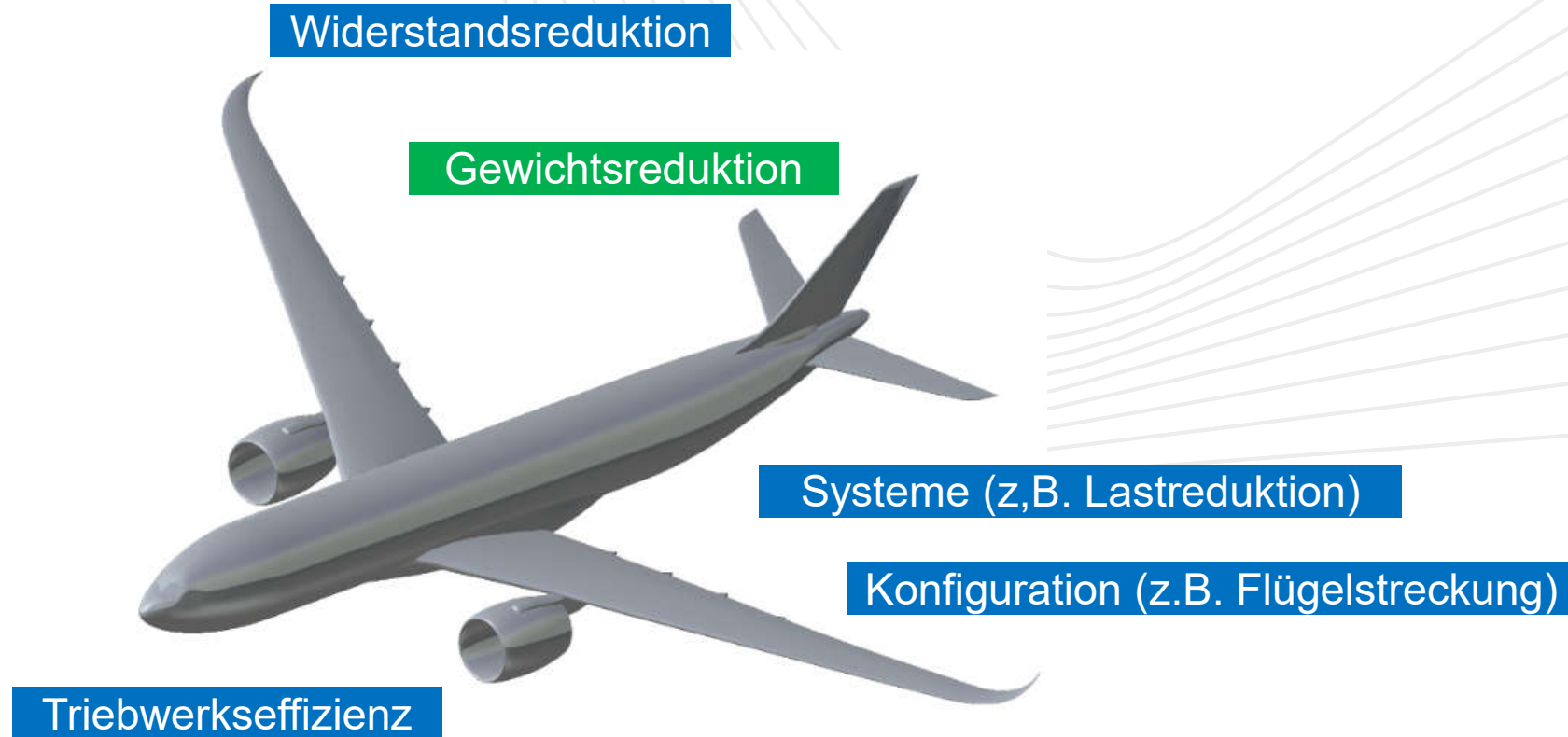
# Systemleichtbau

Leichtbau mit Funktionsintegration

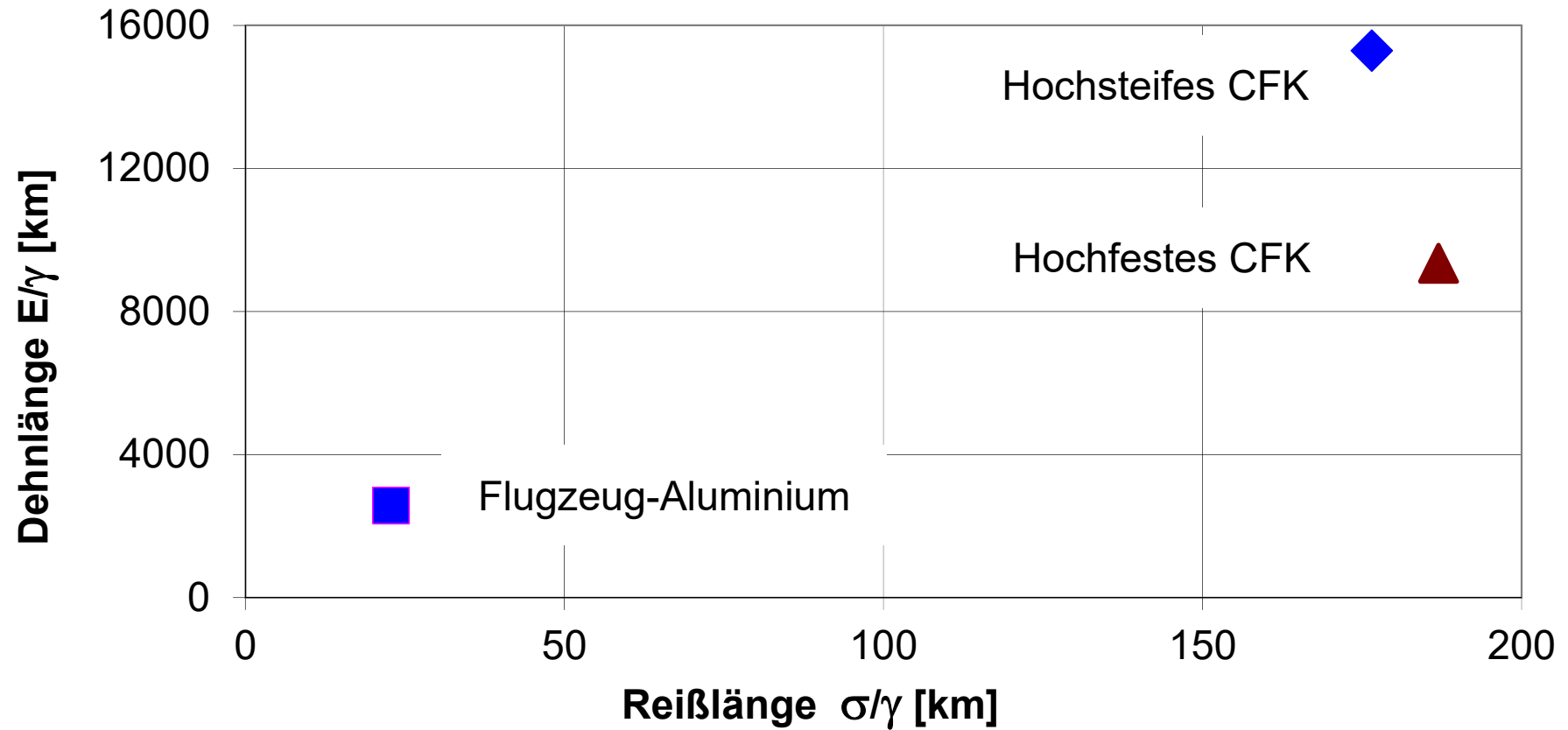
Idee / Vision:

**...alles trägt mit !**





## Ein schwarzer Werkstoff hilft grüner Luftfahrt



Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) ist ein sehr guter Leichtbauwerkstoff



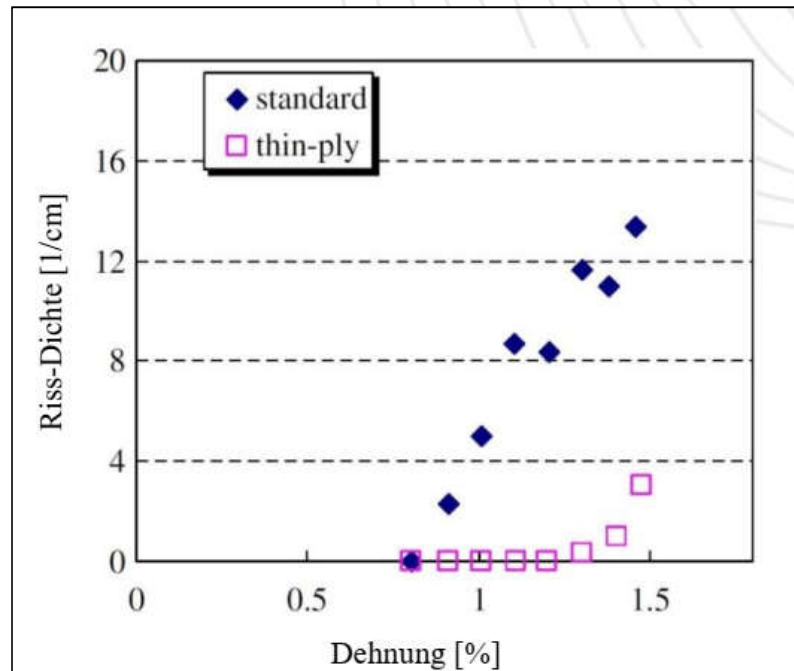
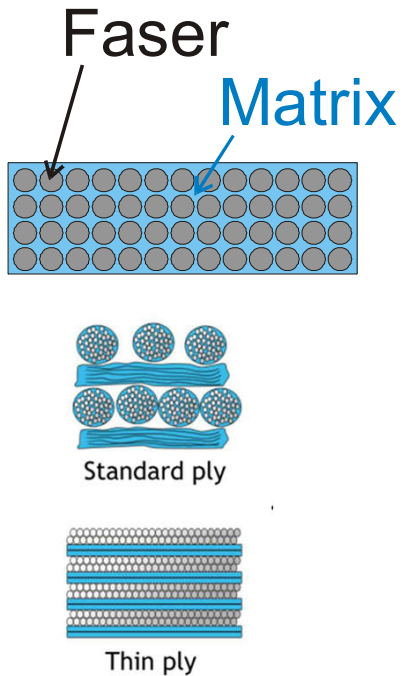
## **Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK)**

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



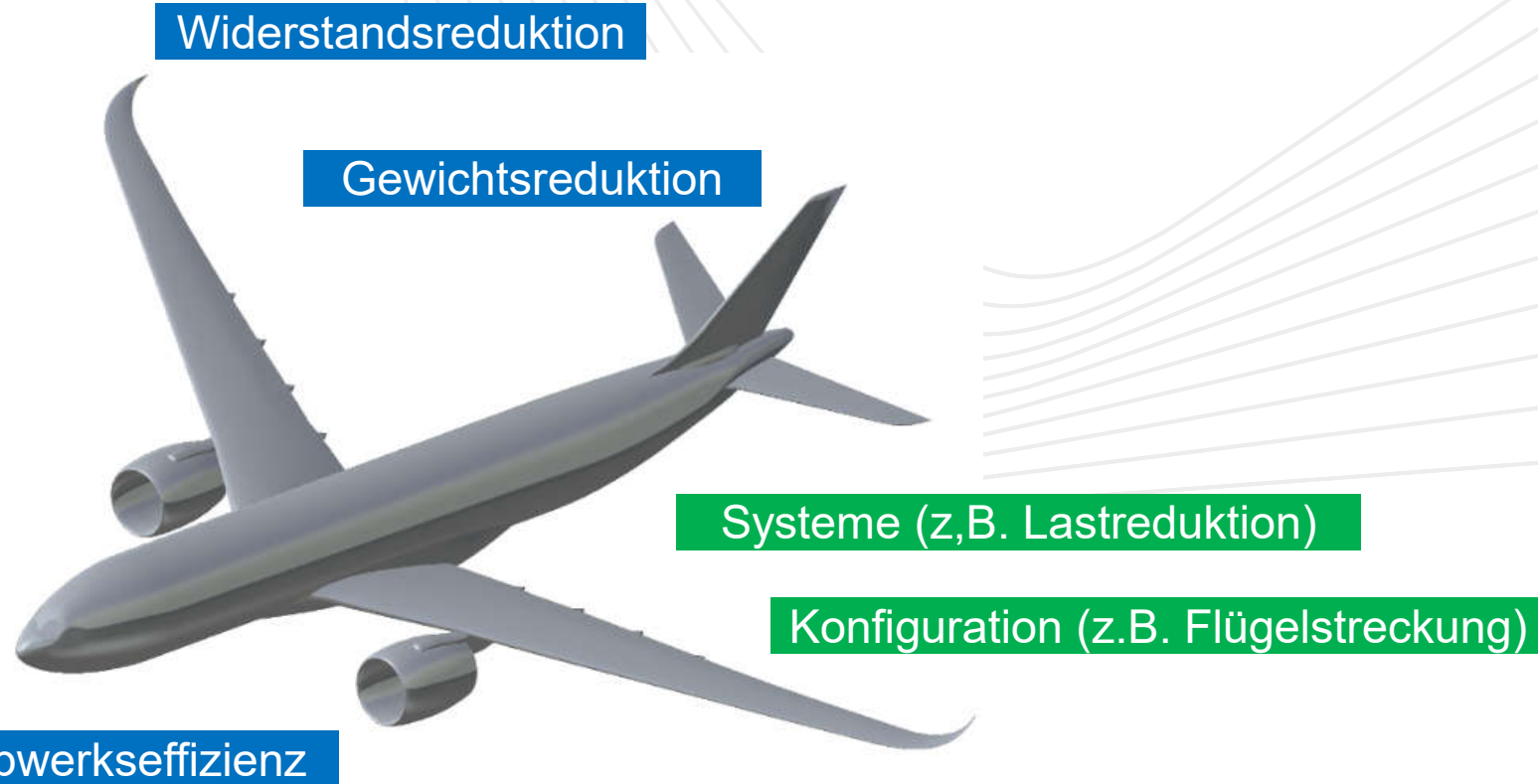
# Systemleichtbau mit neuen Materialien - Dünnschichtlaminat

ICA B: Flight Physics and Vehicle Systems; Teilprojekt B3.3



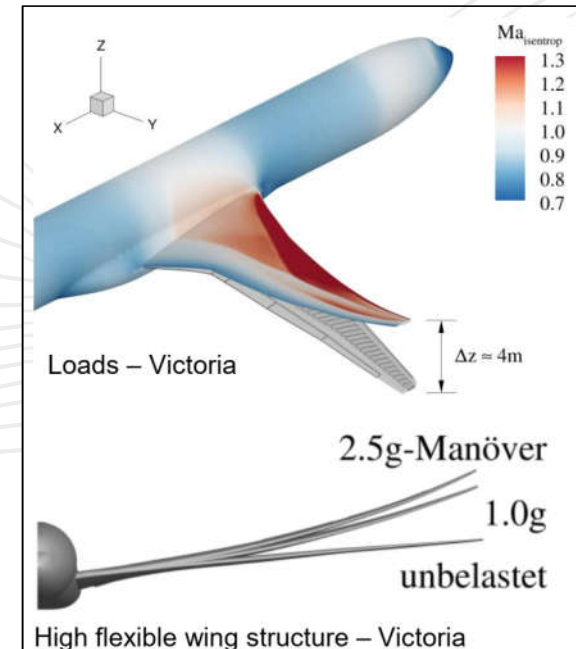
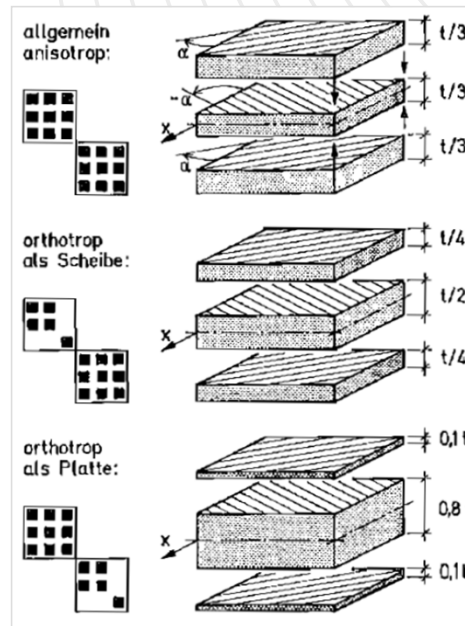
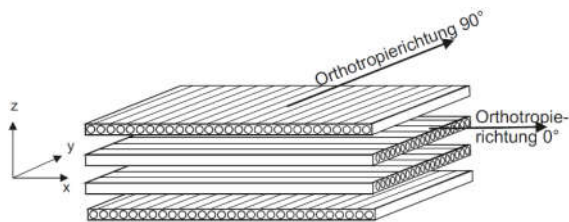
Matrix ist schwacher Partner im Verbund. Matrixbasierte Eigenschaften in Dünnschichtlaminaten von geringerer Bedeutung  
-> Kennwerte besser als in Standardlaminaten -> Gewichtseinsparungen in Primärstruktur > 10% gegenüber Standardlaminaten

# Systemleichtbau – Veränderte Flügelkonstruktion



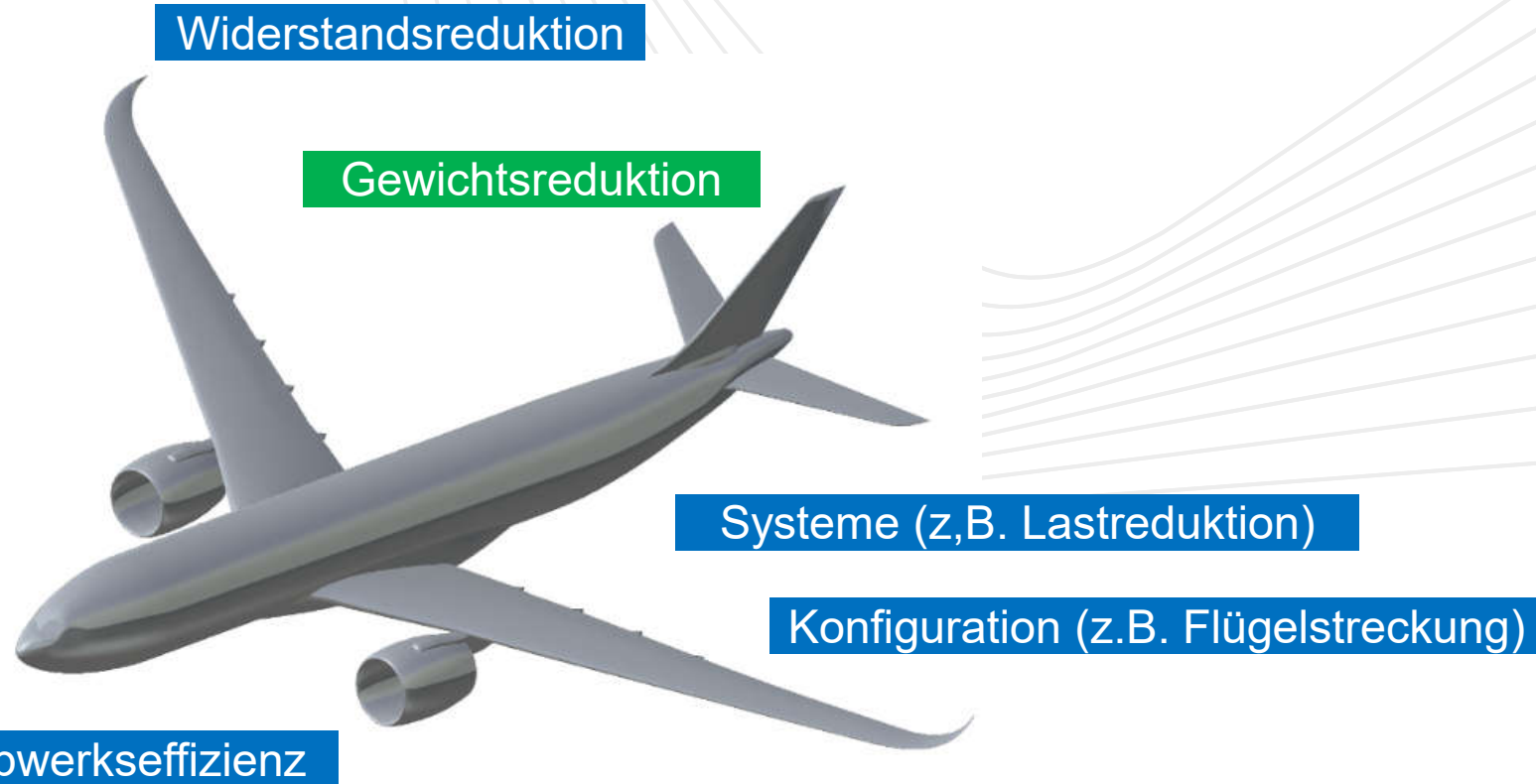
# Systemleichtbau mit neuen Bauweisen – Flexibler Flügel

ICA B: Flight Physics and Vehicle Systems; Teilprojekt B2.2



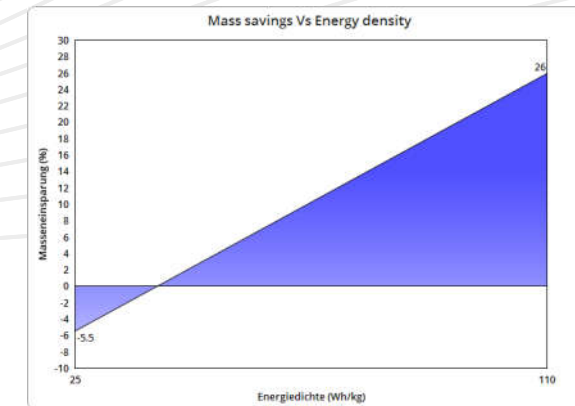
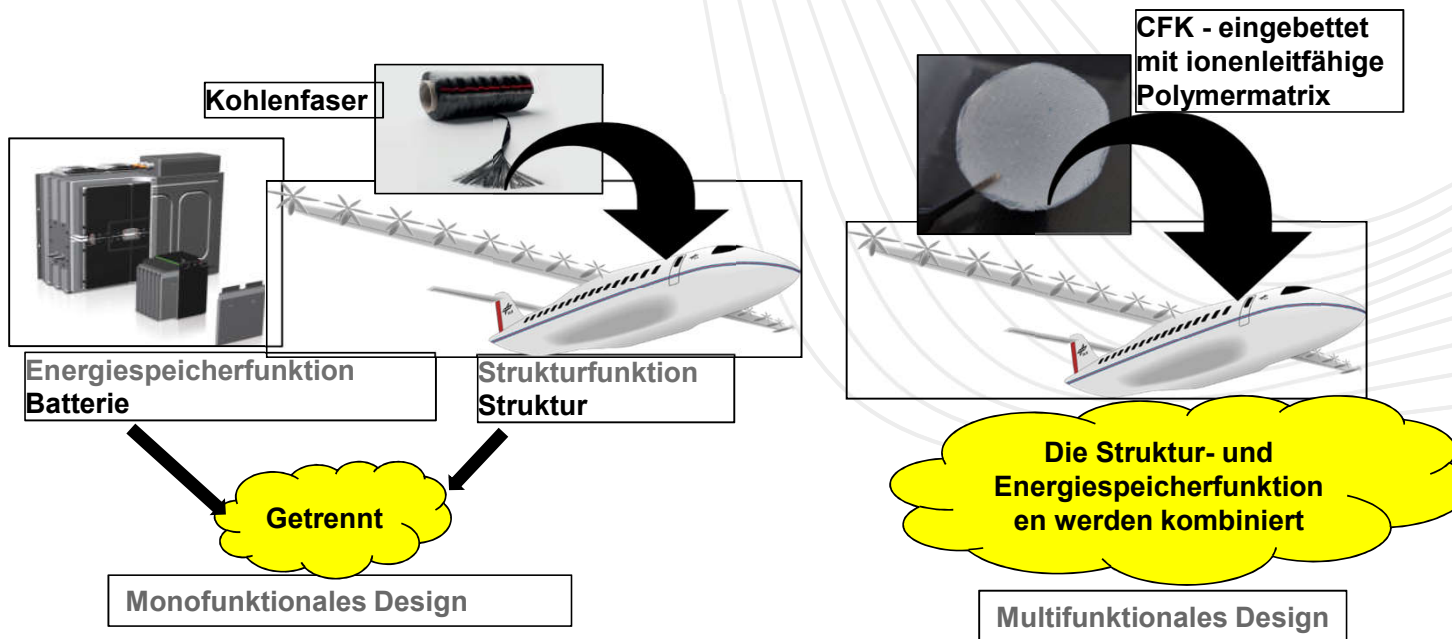
Flexibler Flügel -> Lastenreduktion durch „in-board loading“ -> geringeres Gewicht -> Flügelstreckung kann erhöht werden -> Verbesserte Gleitzahl **Energieeinsparung aus Lastreduktion und höherer Flügelstreckung ca. 3%**

# Systemleichtbau - Funktionsintegration



# Systemleichtbau – Funktionsintegration: Mittragende Batterien

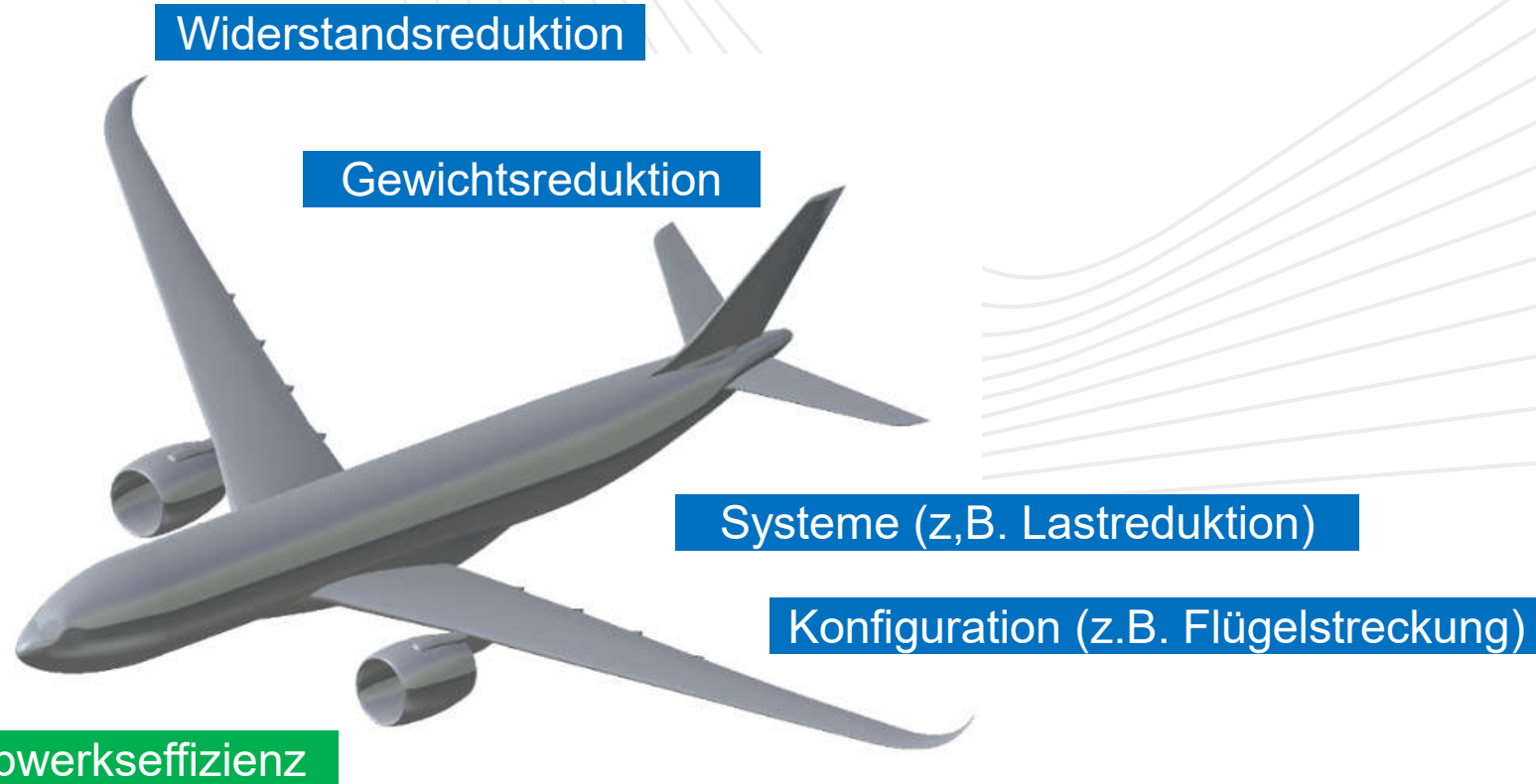
ICA C: Energy Storage and Conversion; Teilprojekt C2.2



\*Basiert auf Wilhelm Johannisson et al 2019 Multifunct. Mater. 2 035002, Model of a structural battery and its potential for system level mass savings

Masseneinsparpotenzial zukünftiger Strukturbatterie mit Energiedichte 110 Wh/Kg\*, wenn sie mitträgt: 26 %

# Systemleichtbau – Formvariabilität

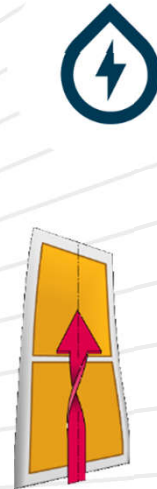
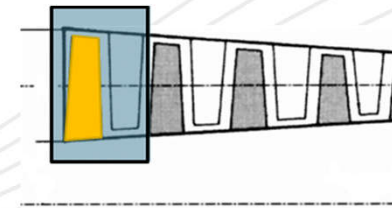
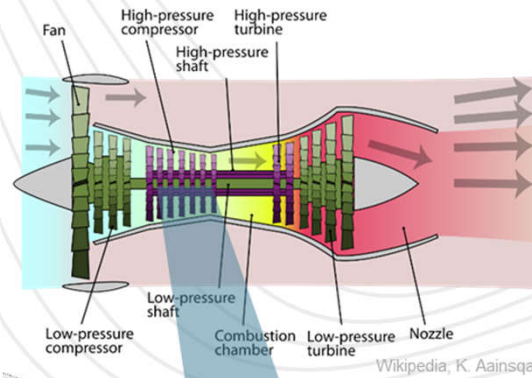
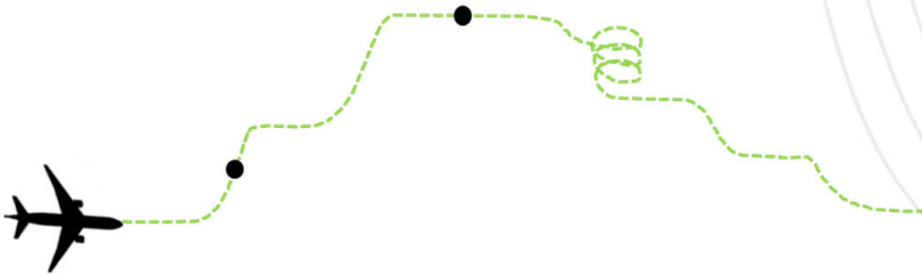


# Systemleichtbau - Adaptive Kompressorschaukeln für Triebwerke



ICA C: Energy Storage and Conversion; Teilprojekt C3.1

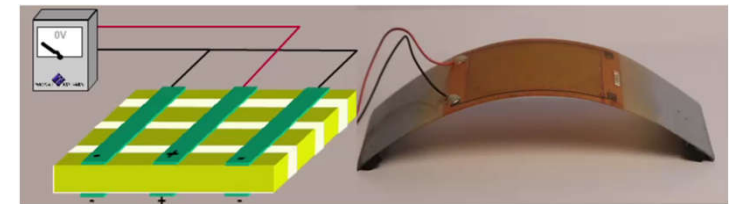
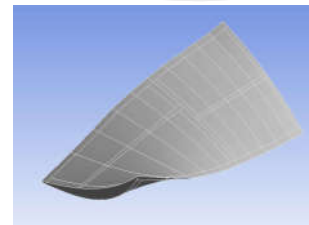
Form-Adaption der Triebwerkschaufeln für unterschiedliche Flugbedingungen



Steigerung der Effizienz

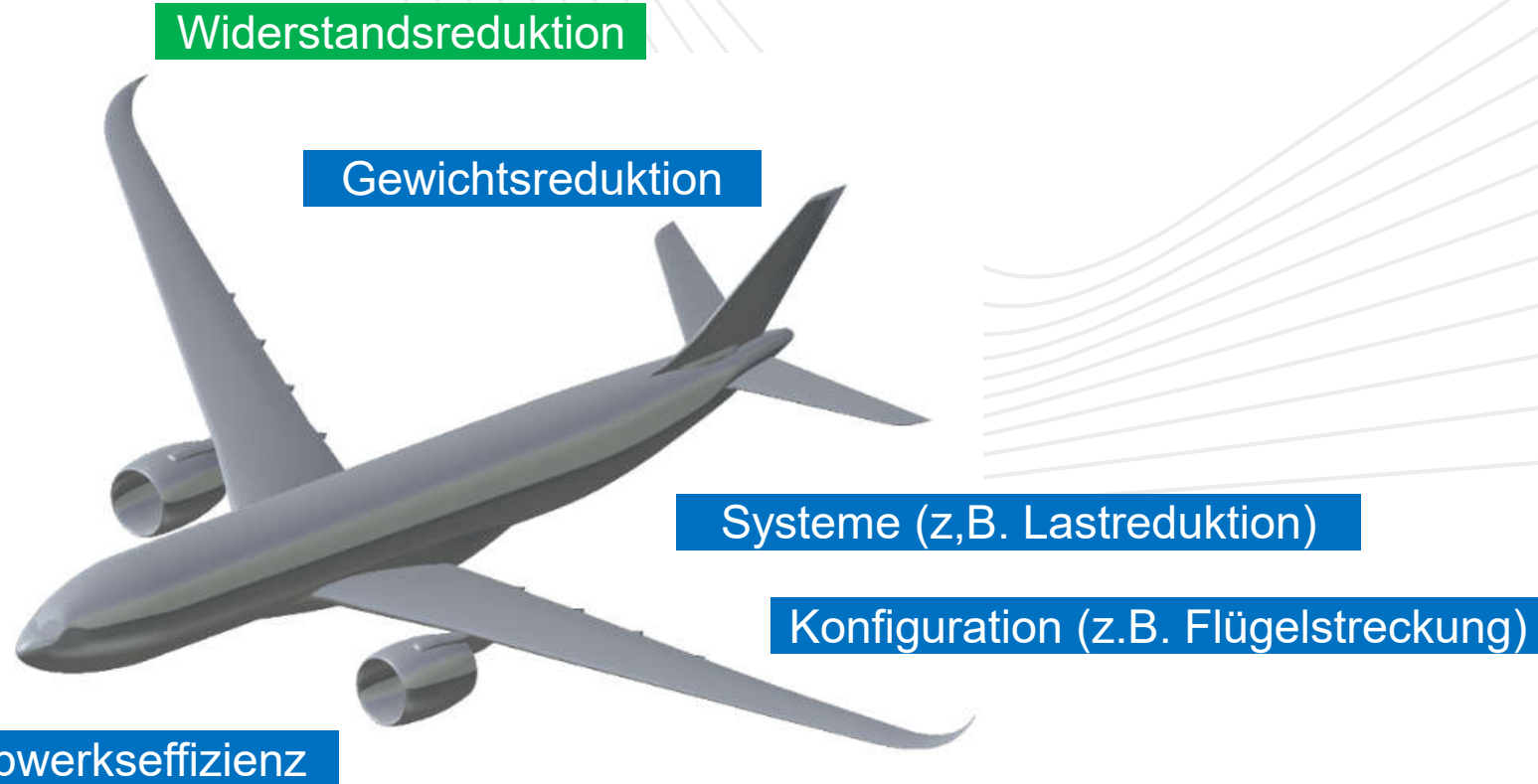
Reduzierung der Schadstoff-Emissionen

Anwendung für alternative Antrieben



2° Twist-Verformung für die Schaufelaußenspannweite entsprechen einer Massenstromverschiebung von ca. ±5%

# Systemleichtbau – Aktive Strömungsabsaugung



# Systemleichtbau mit aktiver Funktionsintegration

## Widerstandsreduktion durch aktive Absaugung



ICA B: Flight Physics and Vehicle Systems; Teilprojekt B2.2

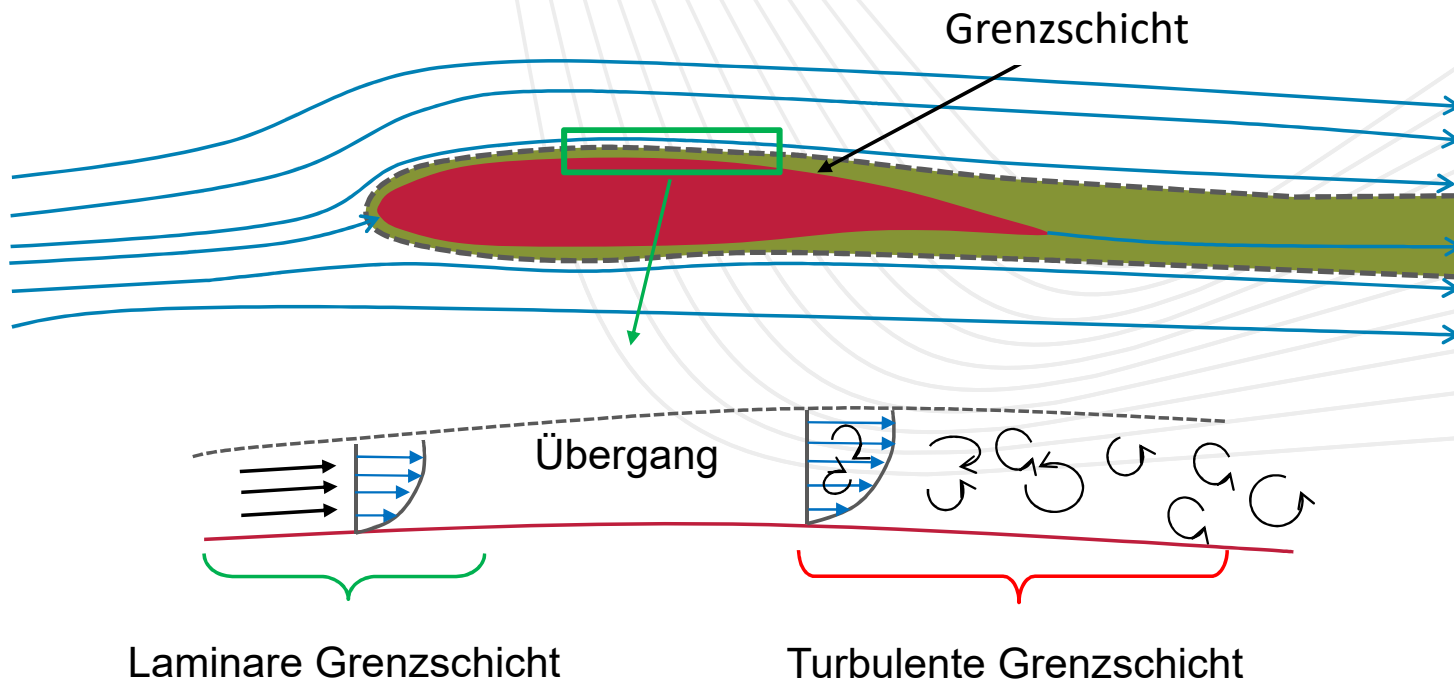


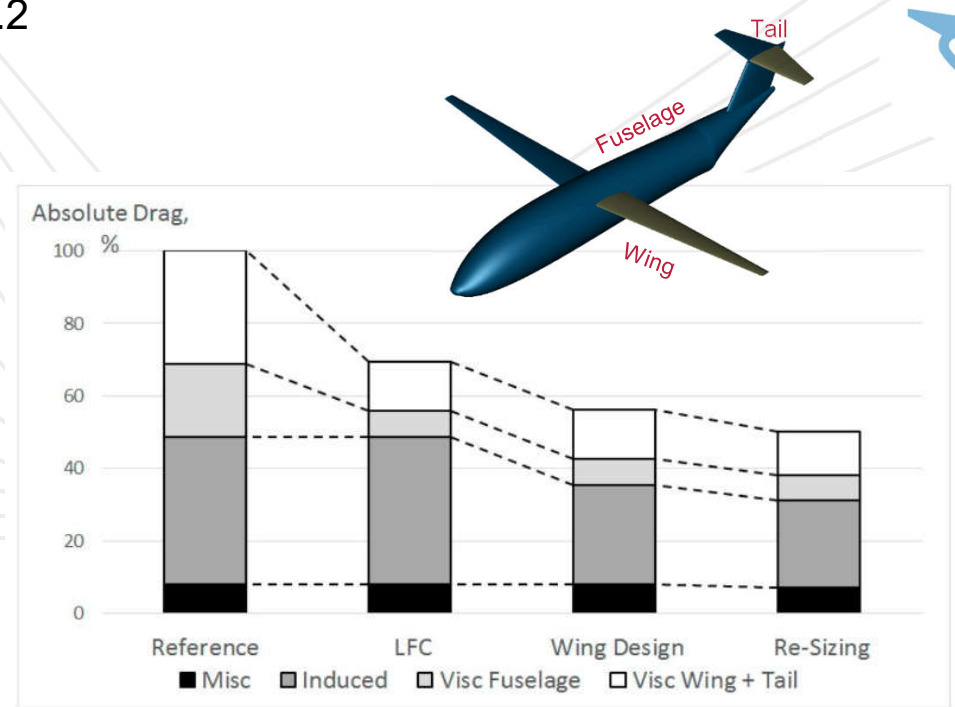
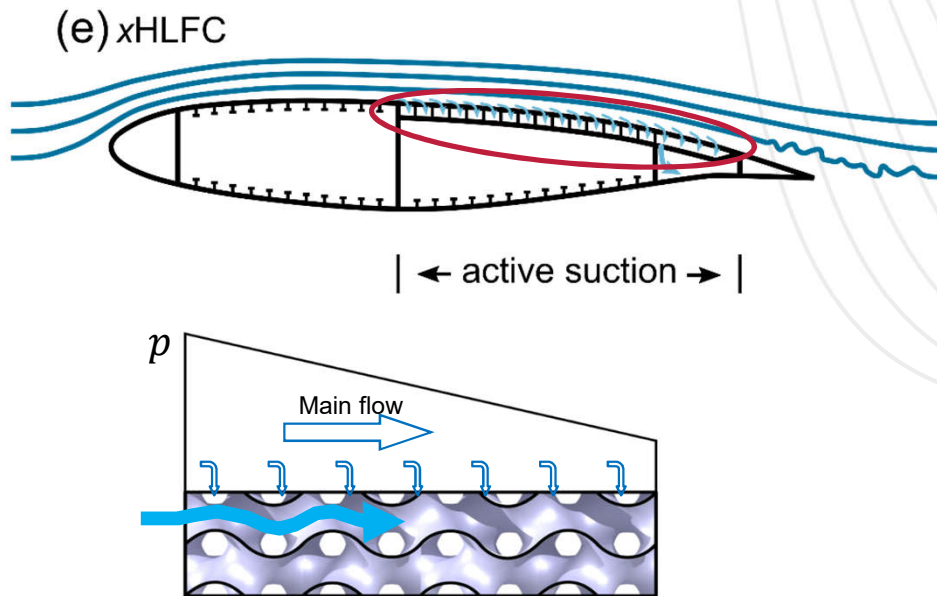
Bild mit freundlicher Genehmigung von Dr. C. Badrya

# Systemleichtbau mit aktiver Funktionsintegration

## Widerstandsreduktion durch aktive Absaugung



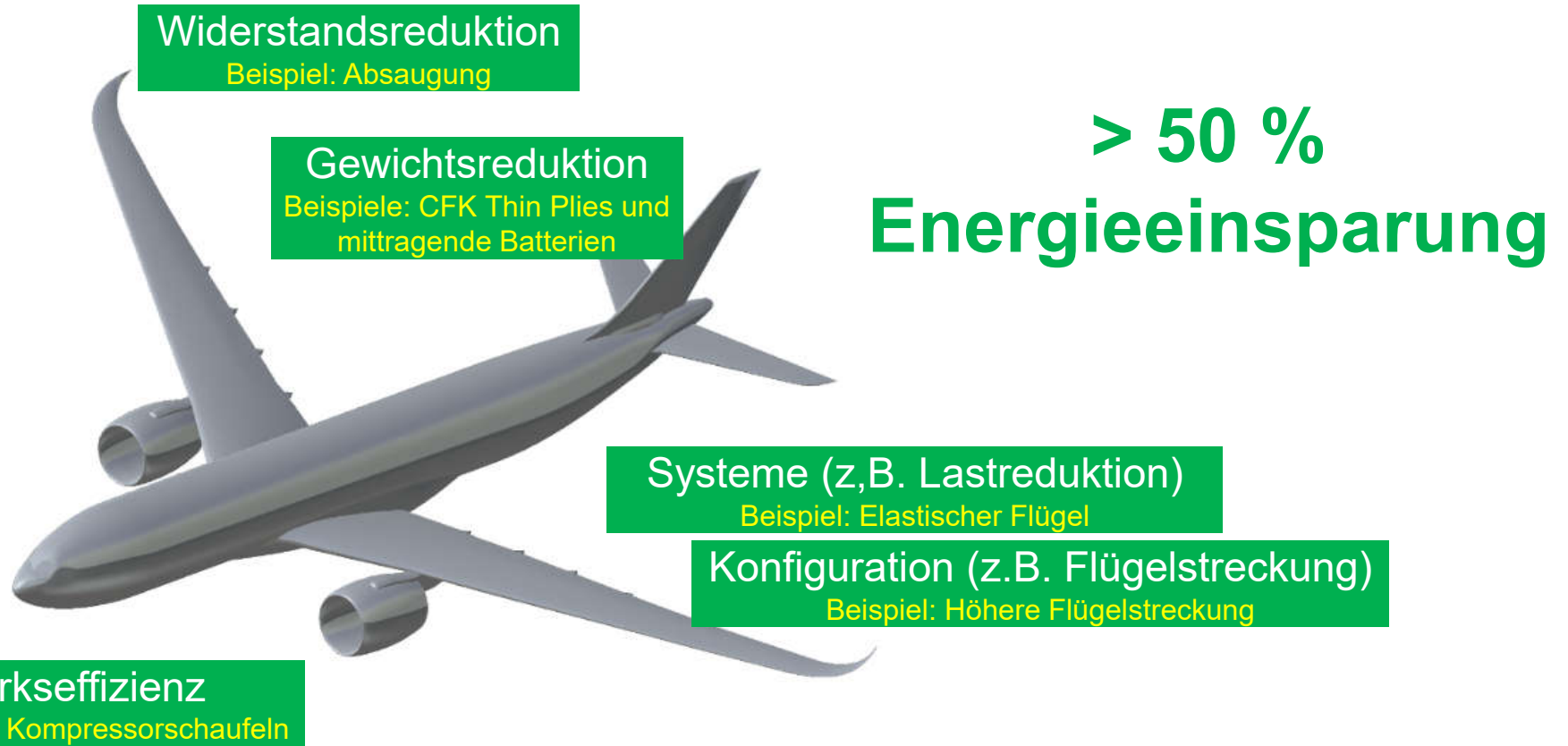
ICA B: Flight Physics and Vehicle Systems; Teilprojekt B2.2



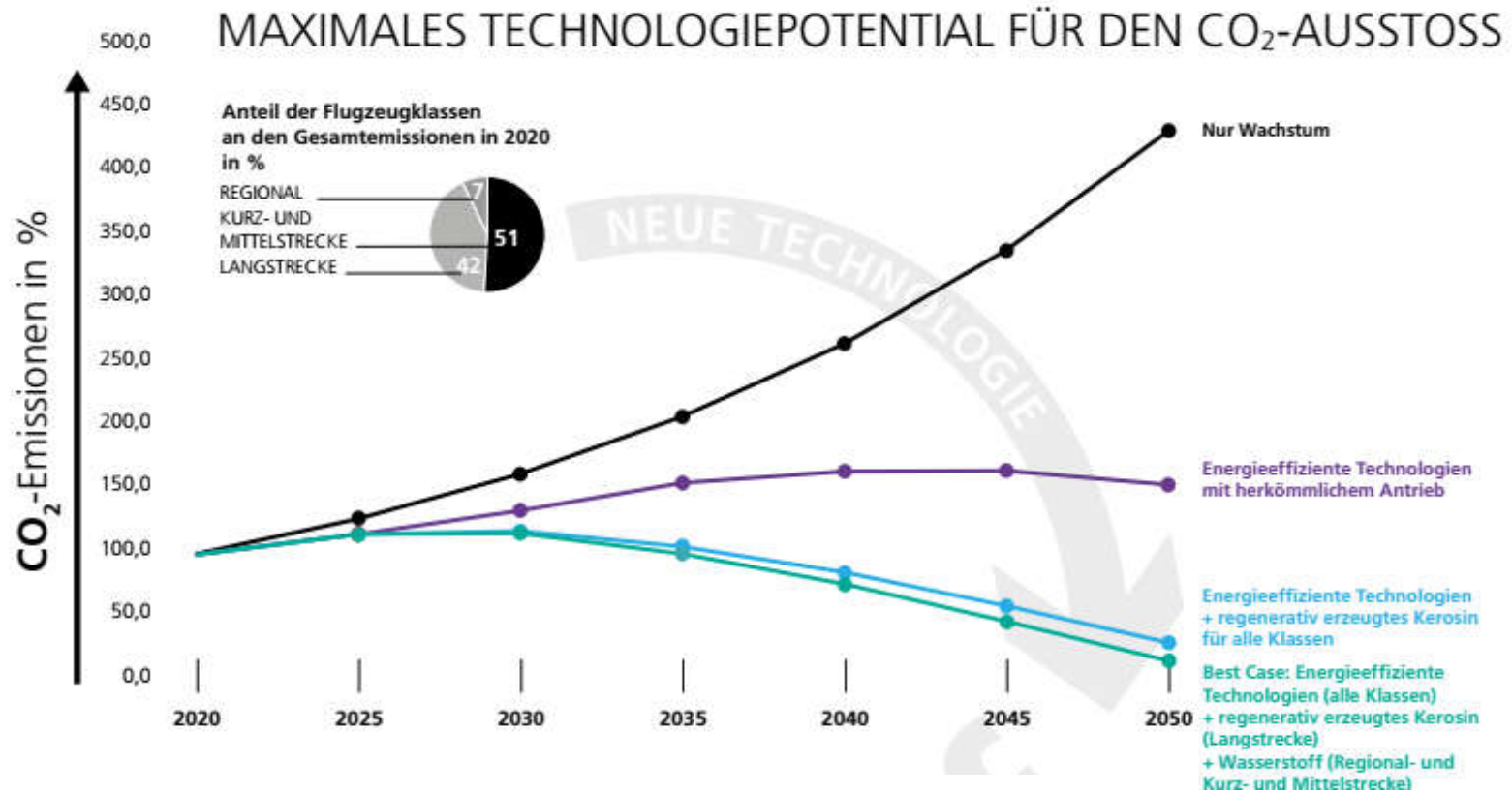
Quelle: Beck, N., Landa, T., Seitz, A., Boermans, L., Liu, Y., Radespiel, R.: Drag Reduction by Laminar Flow Control. *Energies* **11**(1), 252 (2018)

Potential für Reduktion des Reibungswiderstands bei einem Mittelstreckenflugzeug: 50%

Was können wir – gemeinsam mit allen Flugzeugdisziplinen – erreichen?



# CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale der Luftfahrt



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



**Weitgehend emissionsfreie Luftfahrt ist möglich.**

**Flugzeuge müssen energieeffizienter werden.**

**Energieeinsparungen > 50% sind möglich**

**Viele Ideen, viel Forschergeist, viel Wissen und viel Zusammenarbeit führen zur Zukunft der Luftfahrt. Machen Sie mit!**



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Forschung wird ermöglicht durch:

- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der deutschen Exzellenzstrategie – EXC 2163/1- Sustainable and Energy Efficient Aviation – Projekt-ID 390881007
- Helmholtz-Gemeinschaft (HGF ) Impuls- und Vernetzungsfonds, ExNet-0004-Phase2-3
- DLR Grundfinanzierung

