

# NEUARTIGE, STRUKTURINTEGRIERTE UND LASTTRAGENDE ESN- VERSTEIFUNGSELEMENTE

Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024

Dr. Alexander Pototzky, Dr. David Zerbst

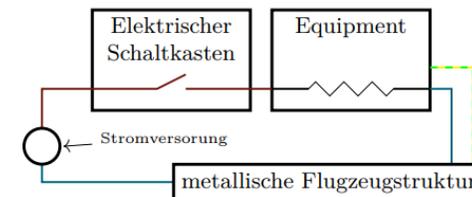
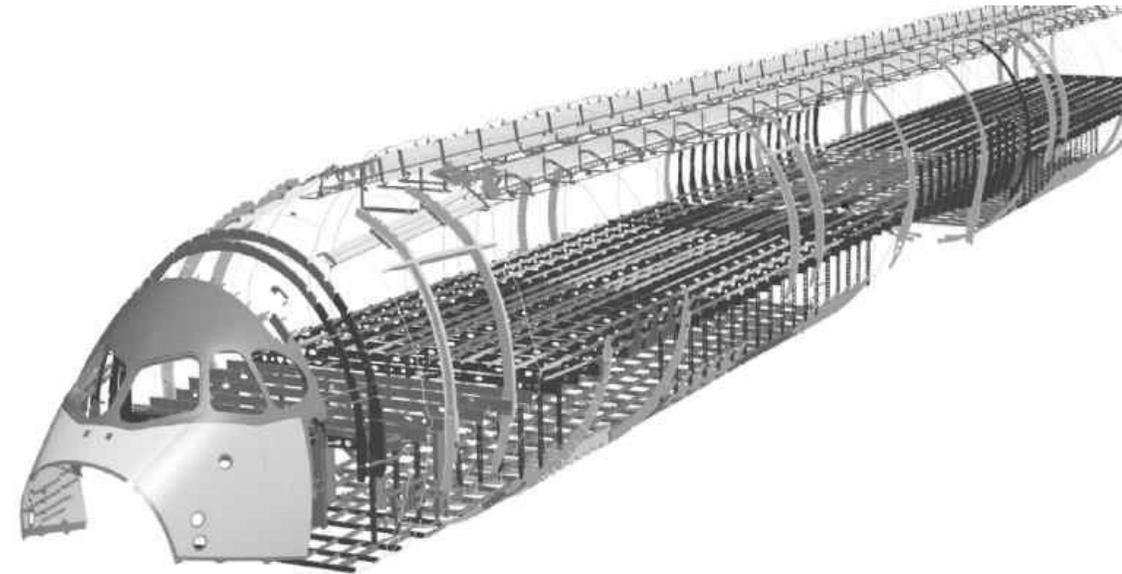
01.10.2024



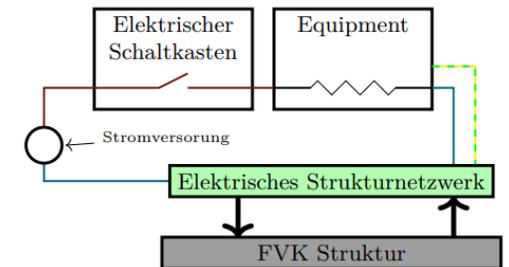
# Motivation

## Elektrische Strukturnetzwerk

- Die spezifische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern ist deutlich geringer als die einer metallischen Struktur, beispielsweise aus Aluminium 2024
- Um alle elektrischen Funktionen im CFK - Flugzeugrumpf zu erfüllen, wird das „Elektrische Strukturnetzwerk“ (ESN) zusätzlich auf der lasttragenden Struktur installiert.



(a) metallisches Luftfahrzeug

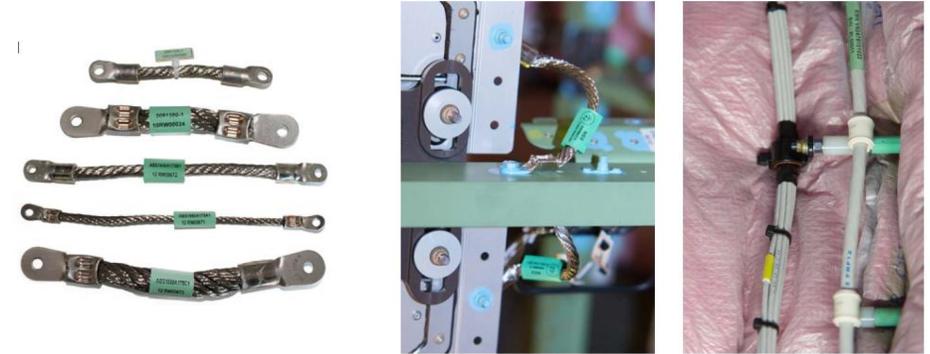


(b) Faserverbundstruktur des A350

# Motivation

## Elektrische Strukturnetzwerk

- Das ESN besteht aus drei verschiedenen Untergruppen:
  - strukturellen metallischen Elemente
  - mechanischen Verbindungsstellen und Anbauteile
  - spezifischen ESN Komponenten
- Aufwändige Fertigung in der FAL
  - Die Herstellung und Montage der Kabelbäume stellt einen hohen zeitlichen Aufwand dar.
  - Für die neuen Flugzeuggenerationen ist davon auszugehen, dass der Bedarf an Kabeln weiter steigt.



# Idee

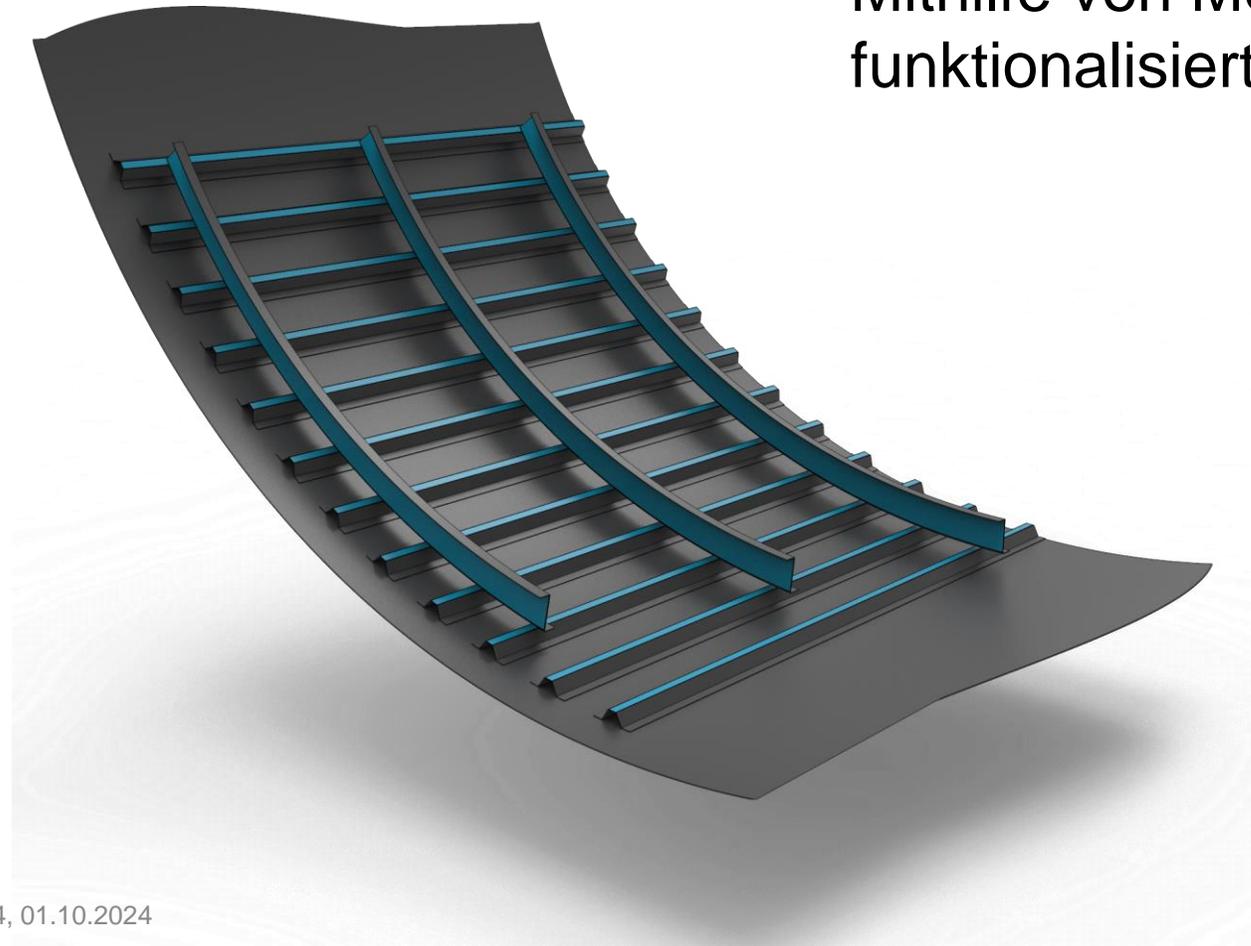
## Funktionalisieren der Versteifungsstruktur



# Idee

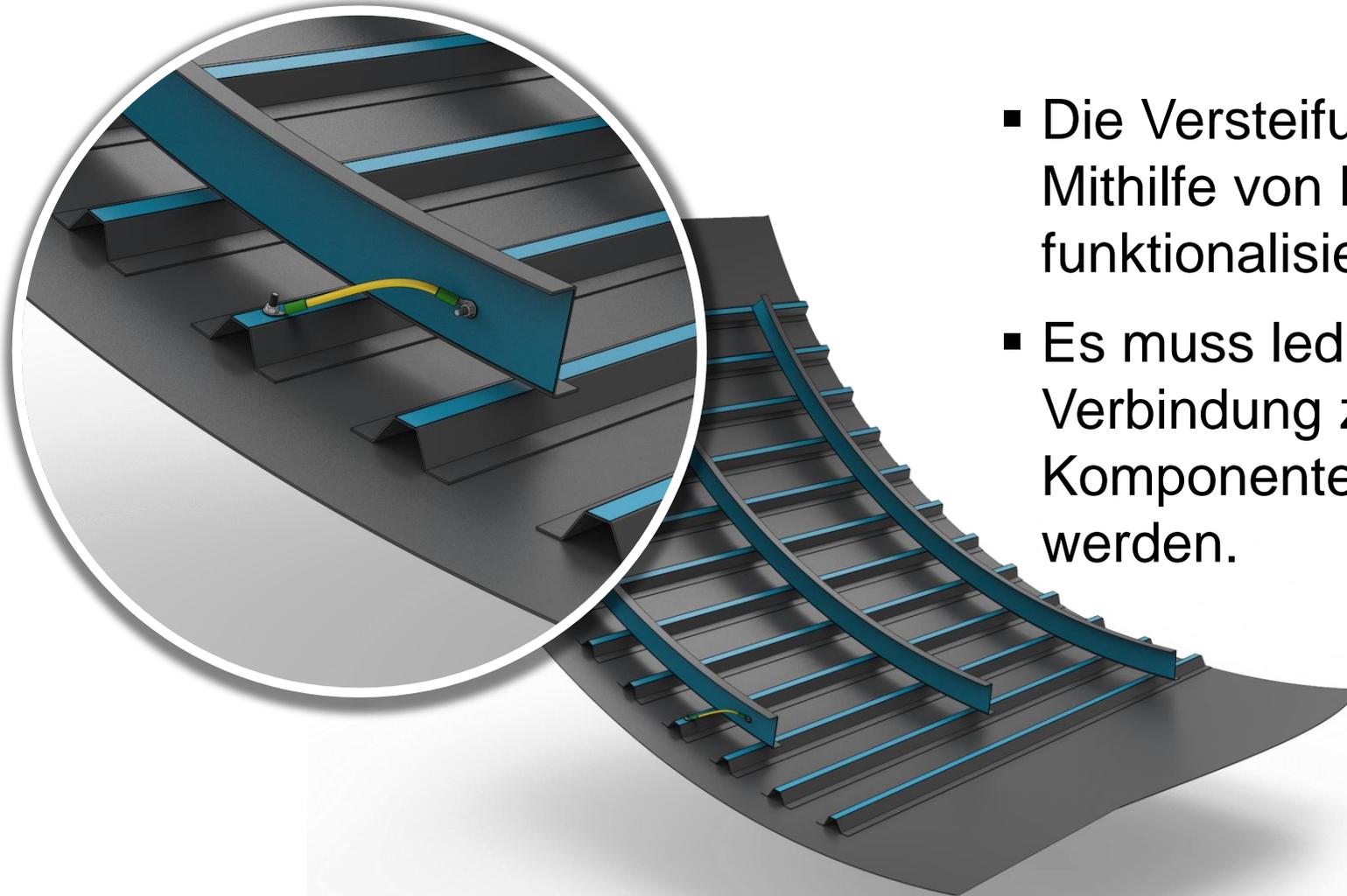
## Funktionalisieren der Versteifungsstruktur

- Die Versteifungsstruktur wird mithilfe von Metallfolien funktionalisiert.



# Idee

## Funktionalisieren der Versteifungsstruktur



- Die Versteifungsstruktur wird mithilfe von Metallfolien funktionalisiert.
- Es muss lediglich die elektrische Verbindung zwischen den Komponenten hergestellt werden.

# Verlagerung der Arbeitsschritte in die Bauteilfertigung

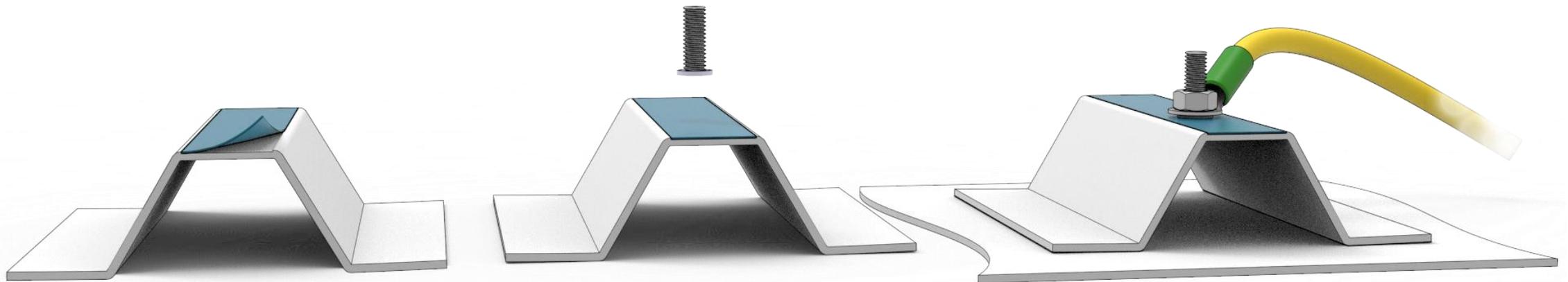
## Montageschritte der funktionalisierten ESN-Komponenten



Bauteilfertigung

Besäumen und  
Anschlüsse schweißen

Anschluss aller  
ESN Komponenten

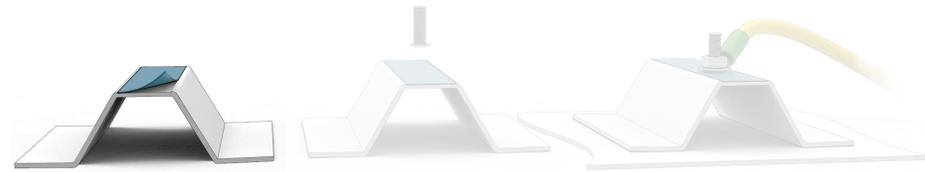


Komponentenfertigung beim Hersteller

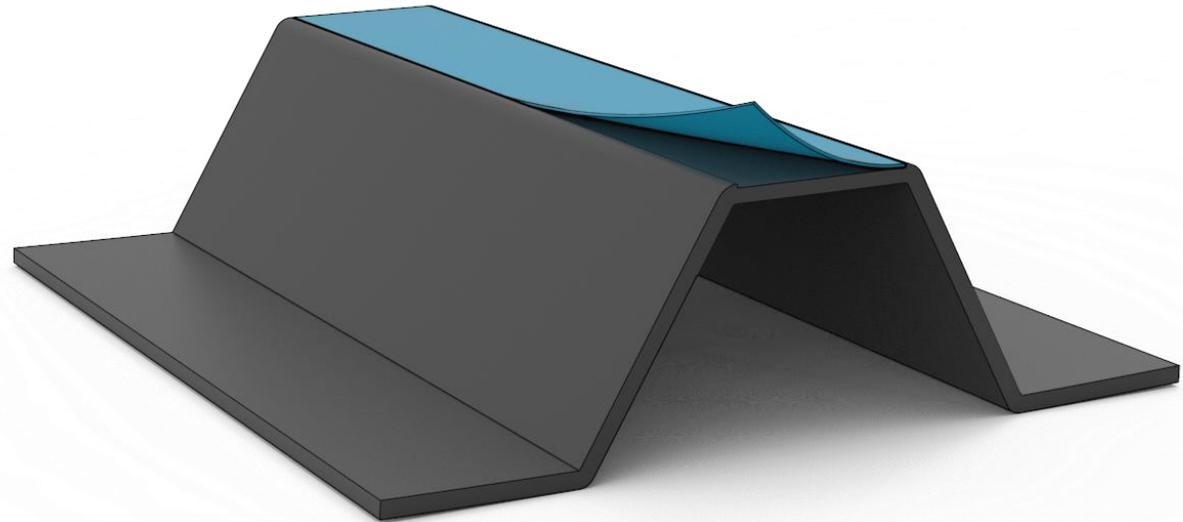
Montage in der MCA / FAL

# Integraler ESN-Stringer

Bauteilfertigung direkt beim Hersteller



- Eine integrierte Metalllage ist gleichzeitig am Lastabtrag beteiligt und gewährleistet zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit.
- Die Metallfolie kann an einer beliebigen Stelle der Versteifungsstruktur integriert werden.
- Das Material und die Dicke der Metallfolie sind frei wählbar.
- Es handelt sich um einen normalen CFK-Fertigungsprozess

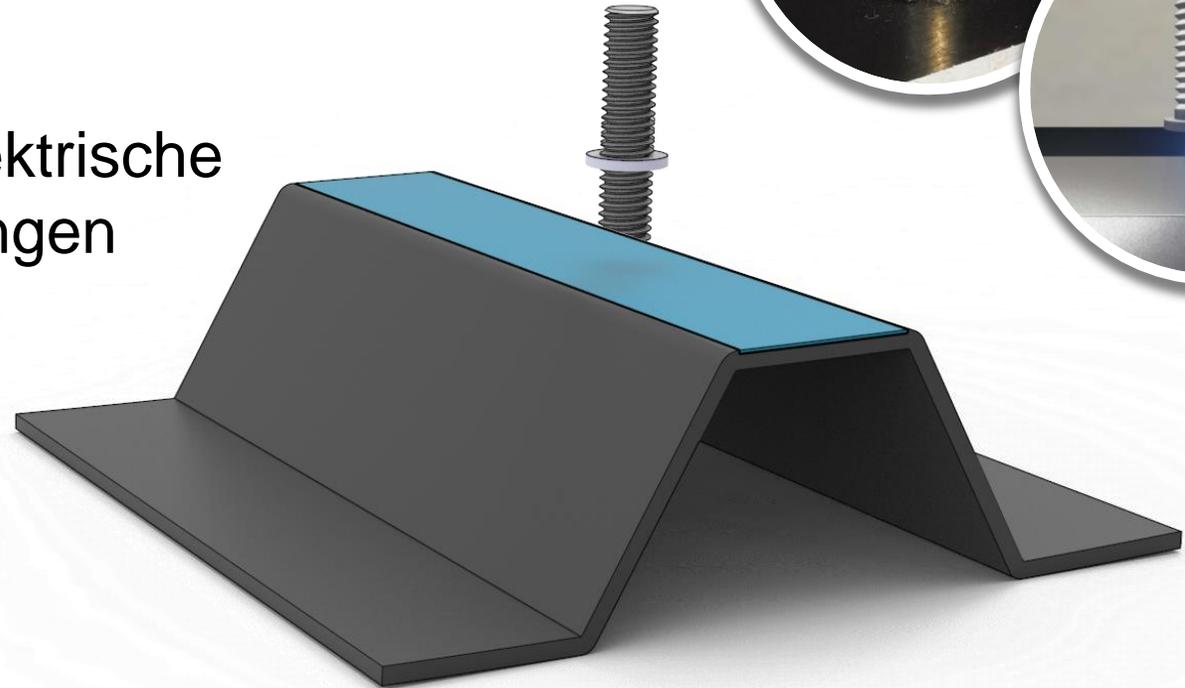
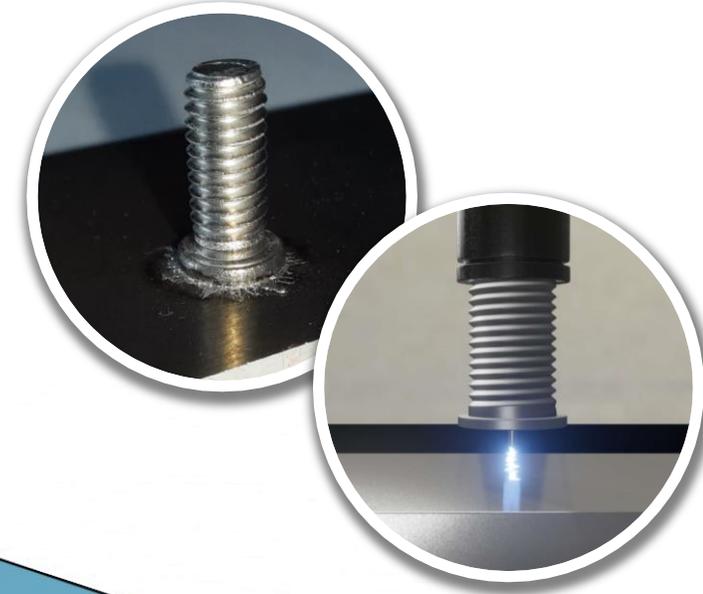


# Integraler ESN-Stringer

besäumen und Anschlüsse schweißen  
beim Lieferanten



- Nach dem Zuschneiden und Besäumen der Komponenten werden die Gewindebolzen mit dem Bolzenschweißverfahren auf die Struktur geschweißt.
- Diese Bolzen können für die elektrische und die mechanische Verbindungen verwendet werden.

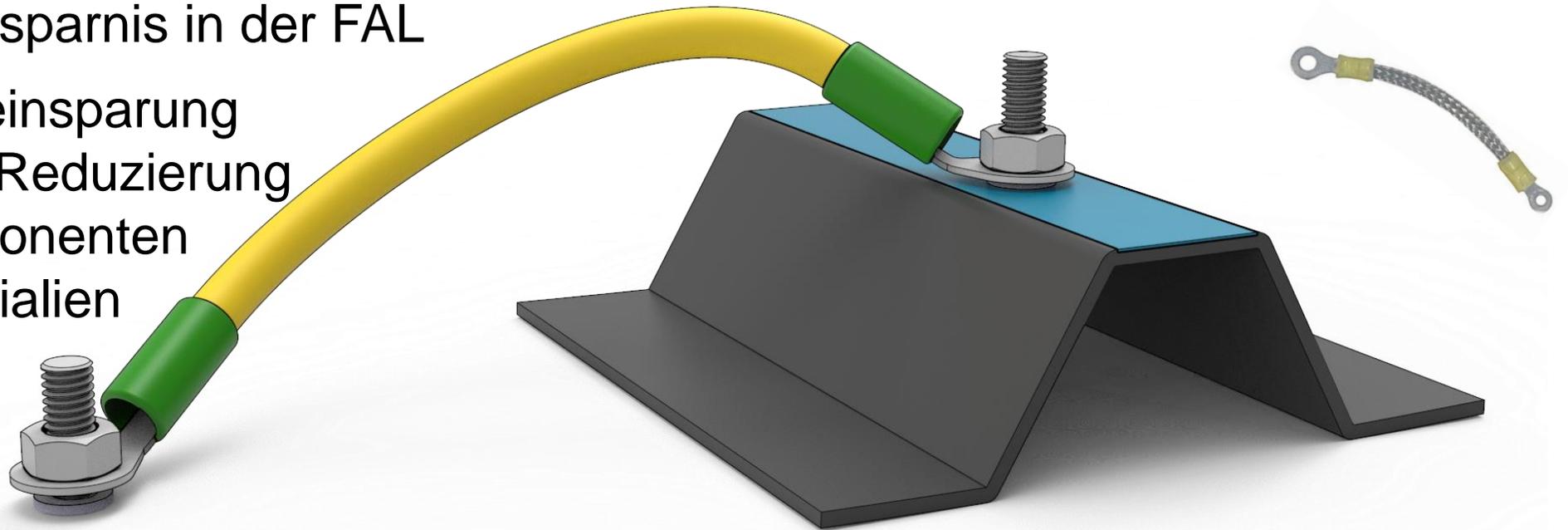


# Assembly

## Anschluss der ESN Komponenten in der FAL



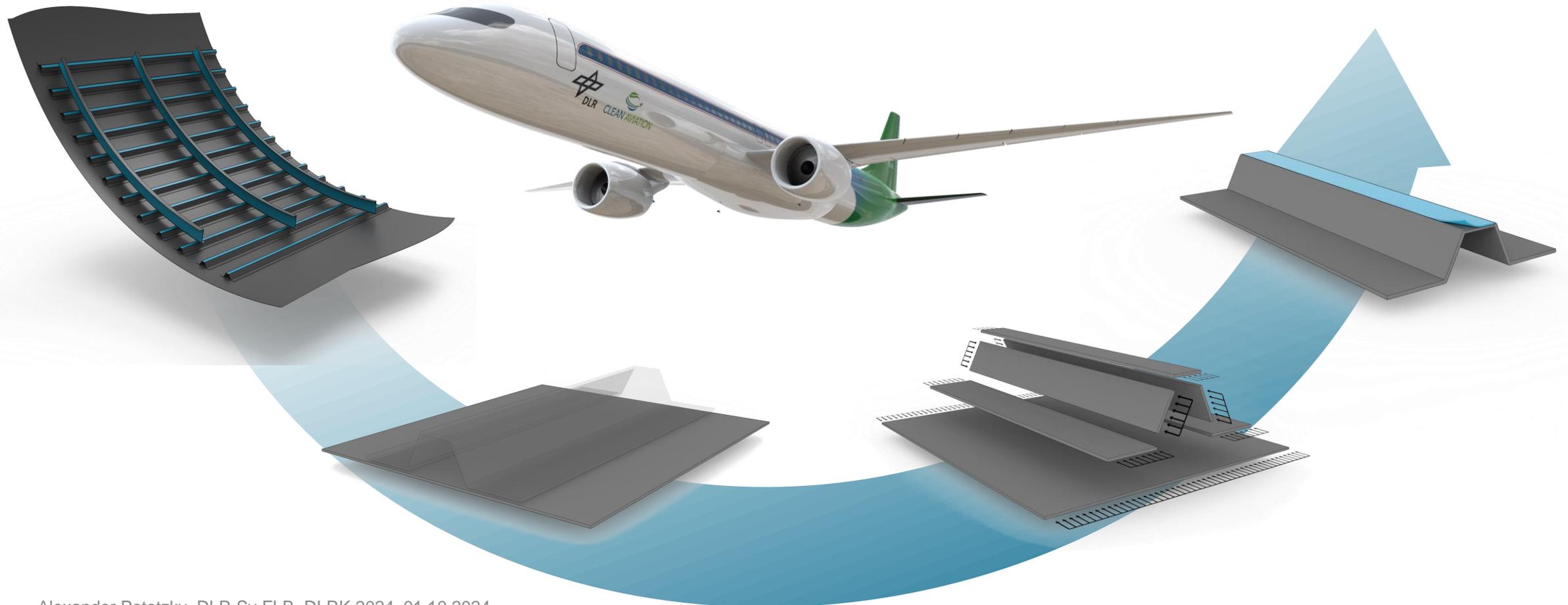
- Die elektrische Verbindung zur Struktur, zu Versteifungselementen oder zu anderen elektrischen Verbrauchern wird mithilfe flexibler Kabel hergestellt.
- Das führt zu einer massiven Kosten- und Zeitersparnis in der FAL
- Gewichtseinsparung durch die Reduzierung von Komponenten und Materialien



# Auslegung

## Designstudie und Bewertungsprozess

$$\Delta m = m_{FVK\_stringer} + m_{ESN\_system} - m_{multi\_stringer}$$

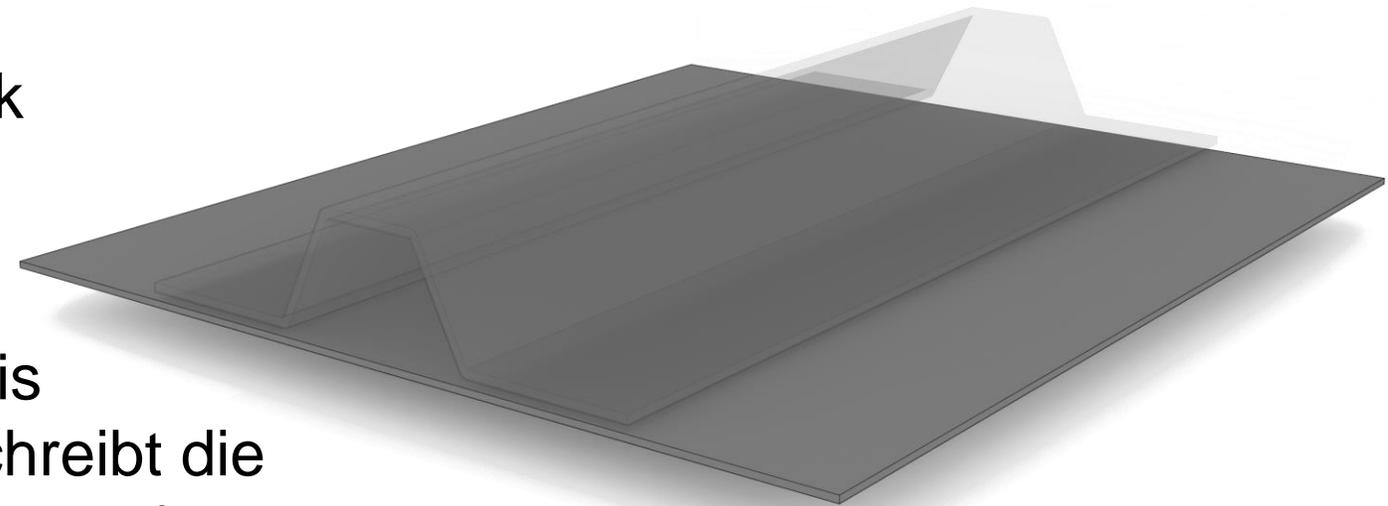


# Auslegung

## Analytisches Referenzpaneel



- Die Auslegung des Stringers erfolgt auf Basis eines Referenzpaneels mit dem Strukturoptimierungs-Framework *lightworks* [1]
- Ein analytisches Modell auf Basis klassischer Laminattheorie beschreibt die Versteifungswirkung des Stringers auf die Haut



$$\begin{pmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{Haut} + [A]_{\Omega} & [B]_{Haut} + [B]_{\Omega} \\ [B]_{Haut} + [B]_{\Omega} & [D]_{Haut} + [D]_{\Omega} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\kappa\} \end{pmatrix}$$

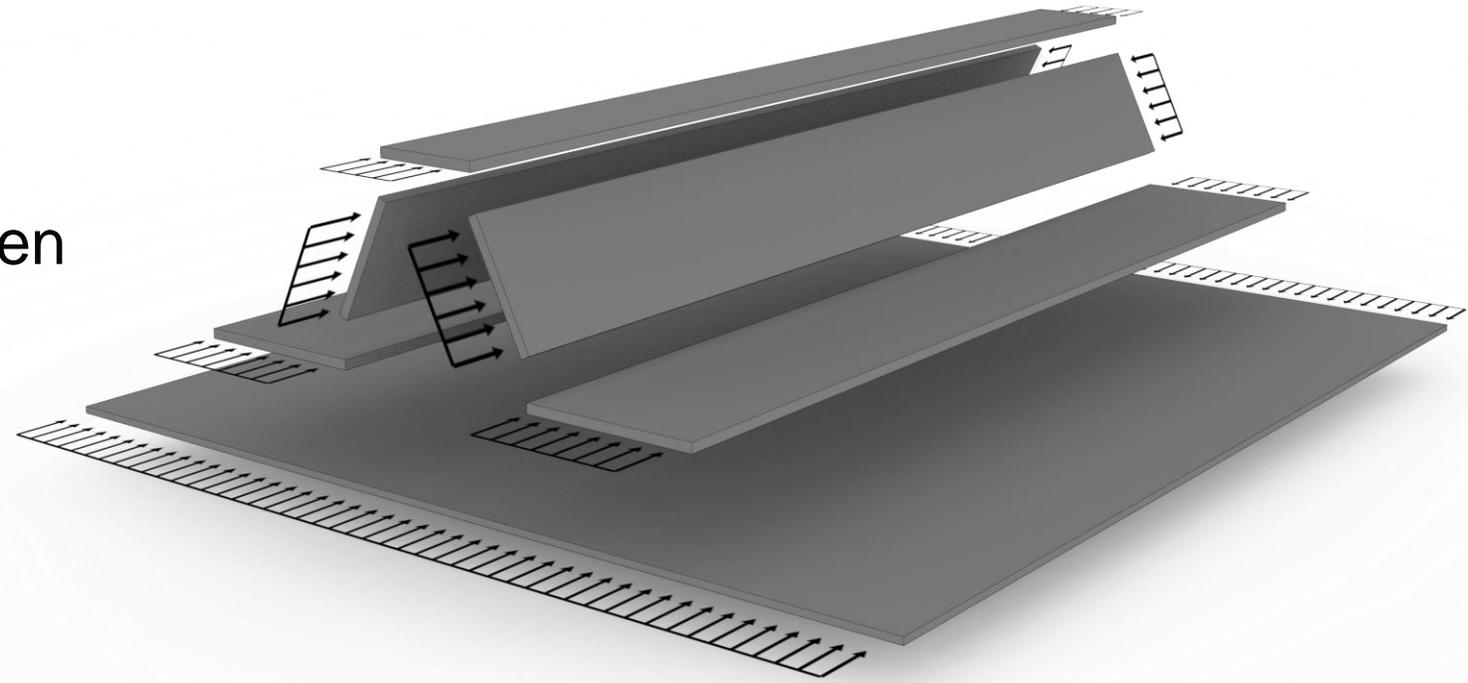
[1] Dähne et al. 2024 Lightworks, a scientific research framework for the design of stiffened composite-panel structures using gradient-based optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization 67

# Auslegung

## Referenzlasten für die Dimensionierung



- Rumpf-Referenzlastfälle nach [2] werden auf die versteifte Platte aufgebracht und an einen Optimierungsprozess übergeben



	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>N4</b>	<b>N5</b>
$N_x$ [MN/m]	0.5	0.5	0.5	0	-0.1
$N_y$ [MN/m]	1	1	-0.1	1	1
$N_{xy}$ [MN/m]	0	0.2	0.2	0.2	0.2

[2] Kappel 2022 Double-double laminates for aerospace applications — finding best laminates for given load sets. Composites Part C

# Auslegung

## Optimierungsprozess

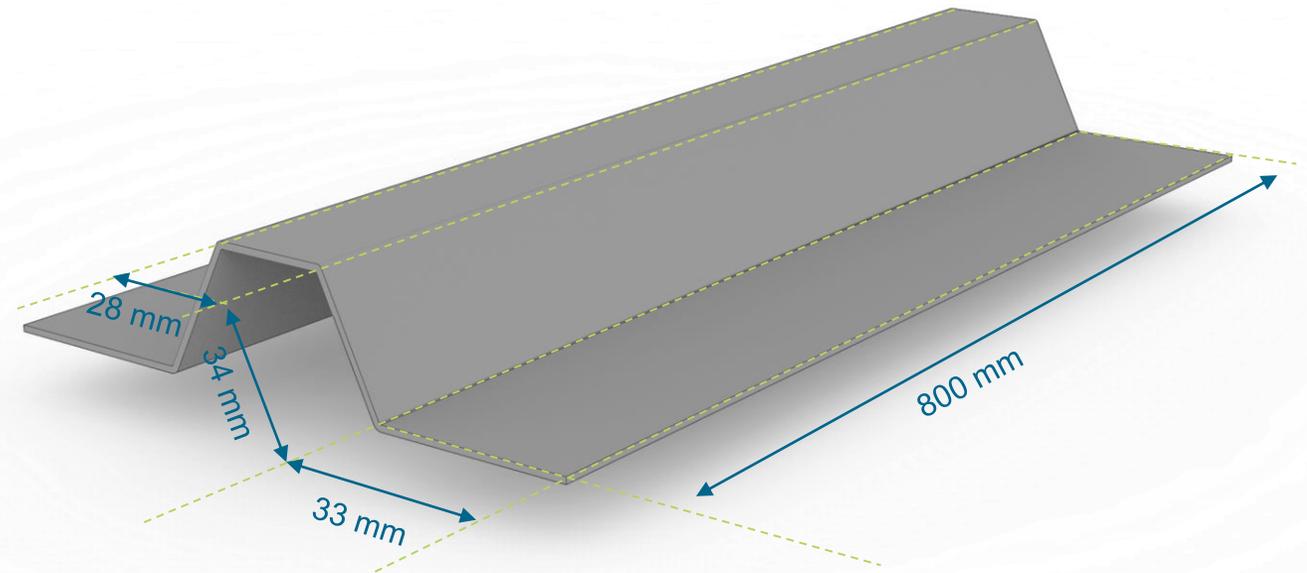


<b>Minimiere</b>	$f = \sum_i^N m(x)$	<b>Summe der Massen von Stringer-Elementen und Haut</b>
in Abhängigkeit von	$\{x\}$	Dicken jeder Einzellage auf Stringer und Haut
auf Basis von	$\{N\}, \{M\}$	Schnittlasten an den Kanten von Stringer und Haut
unter Berücksichtigung von	$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$ $g_j(\{x\}) \leq 0$	Designkriterien (Druck-Schubbeulen, Festigkeit) und Ober- und Untergrenzen
mithilfe der Analyse von	$\frac{\partial f}{\partial x_j}, \frac{\partial g_i}{\partial x_j}$	Gradienten von Zielfunktion und Restriktionen nach den Parametern

# Variierte Parameter in der Auslegung

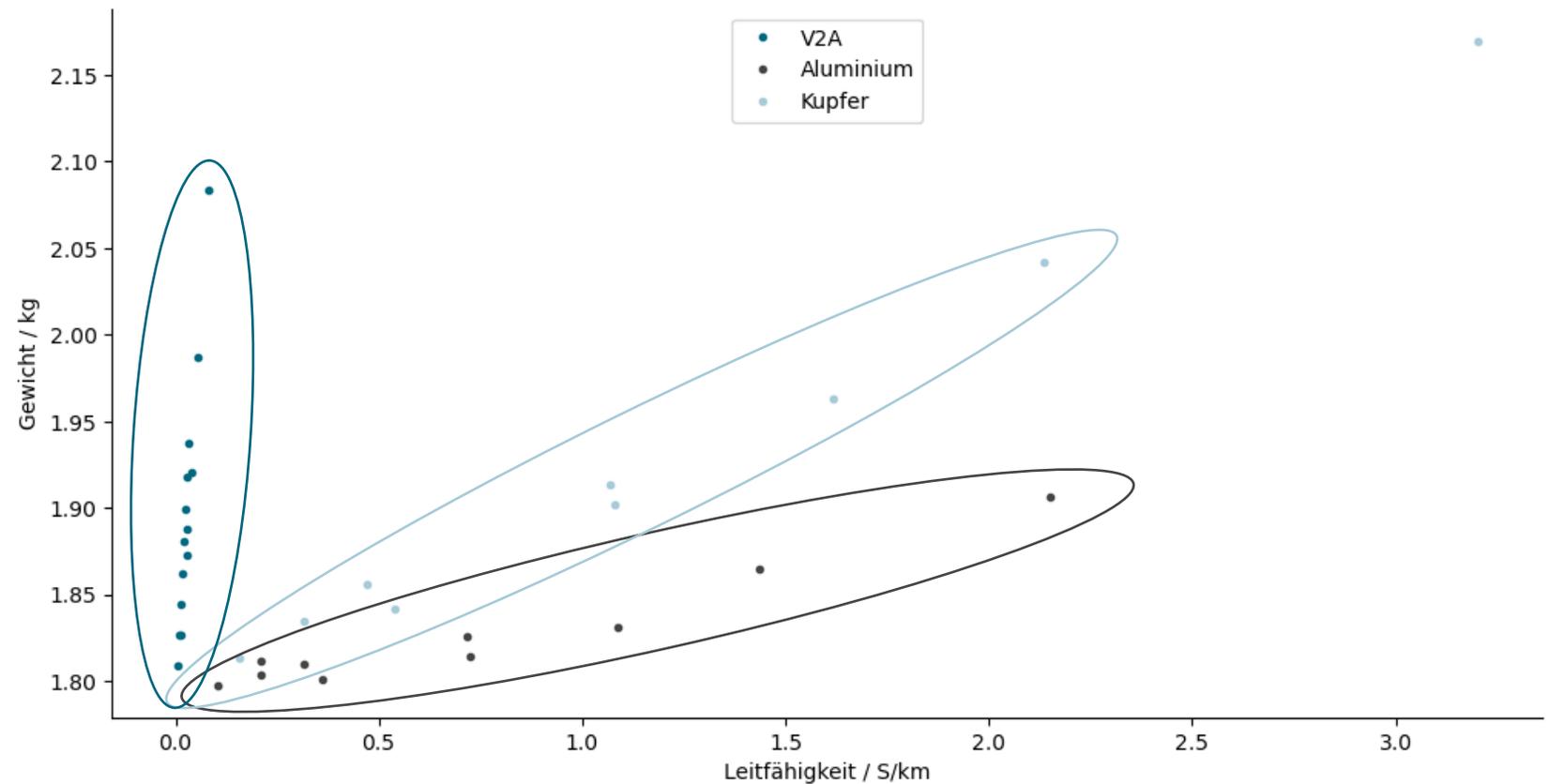


- Grundmaterial für Haut und Stringer:
  - CFK auf Basis M21E/IMA
  - Lagenaufbau von  $[\pm 45, 0]_s$
- Material für die Funktionserfüllung:
  - Aluminium, Kupfer, Edelstahl
- Referenzkabel:
  - 800 mm lang, keine Isolierung, verschiedene Querschnitte (AWG 5 – AWG 16)
- Metallfolien Anordnung auf dem Stringer:
  - Flansch
  - Flansch + Steg
  - Flansch + Steg + Fuß



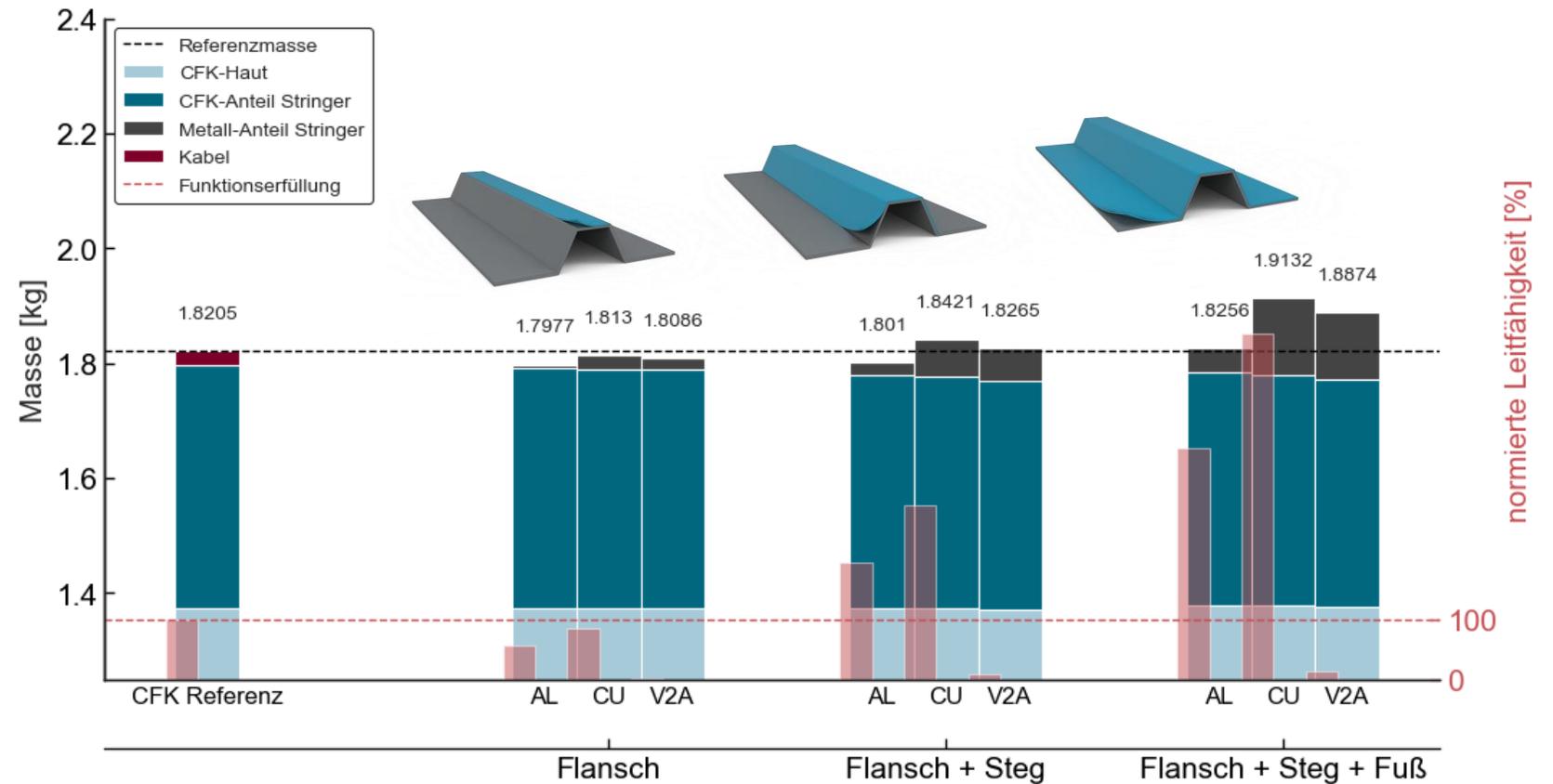
# Übersicht über die gerechneten Versionen

- Variation:
  - Materialien
  - Folienstärke
  - Anordnung auf dem Stringer

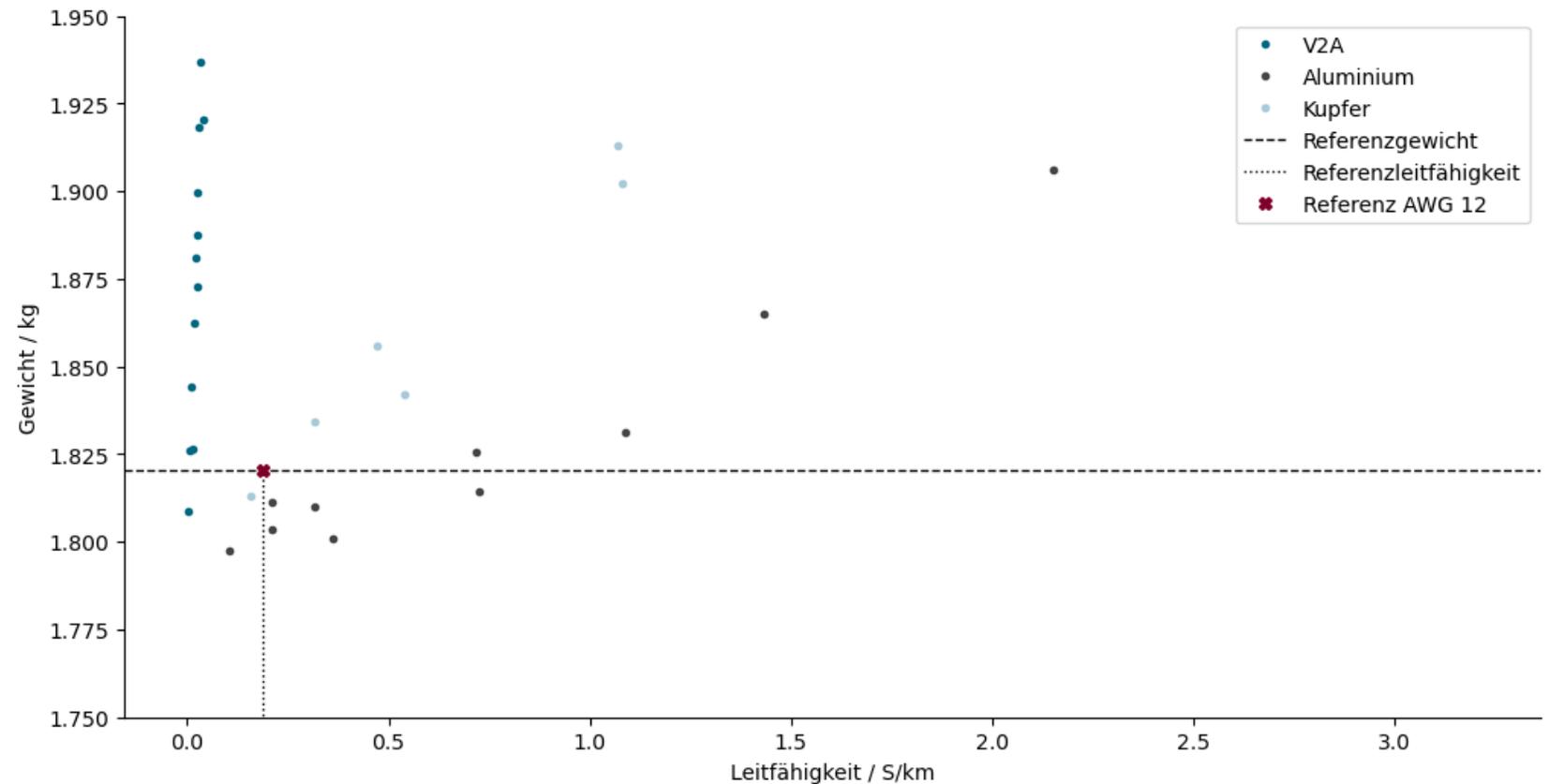


# Die Ergebnisse im Detail

- Alle Ergebnisse für eine Metallfoliendicke  $d = 0,1 \text{ mm}$
- Referenzkabel Querschnitt AWG 12

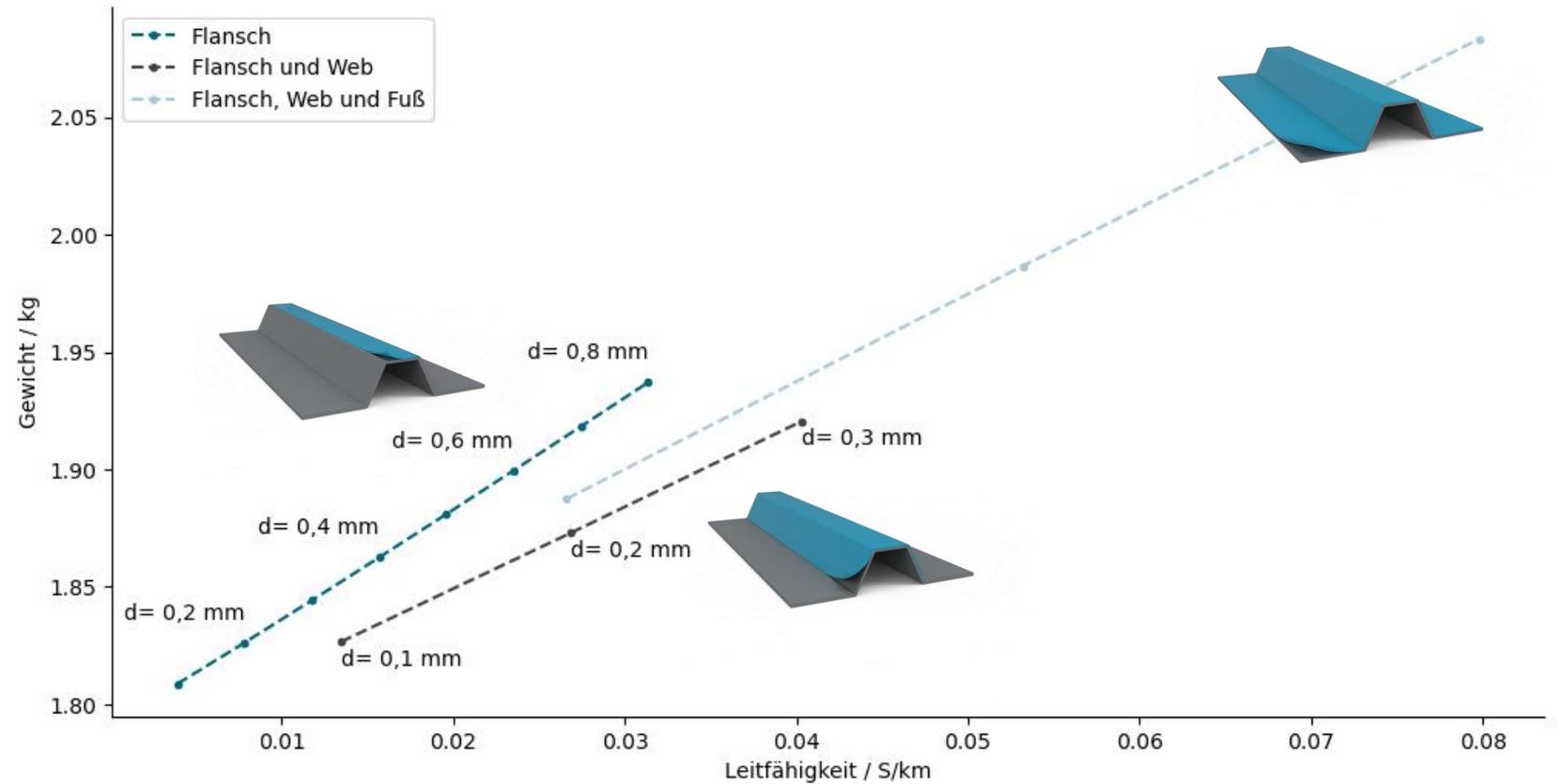


# Gültige Lösungen für verschiedene Leiterquerschnitte



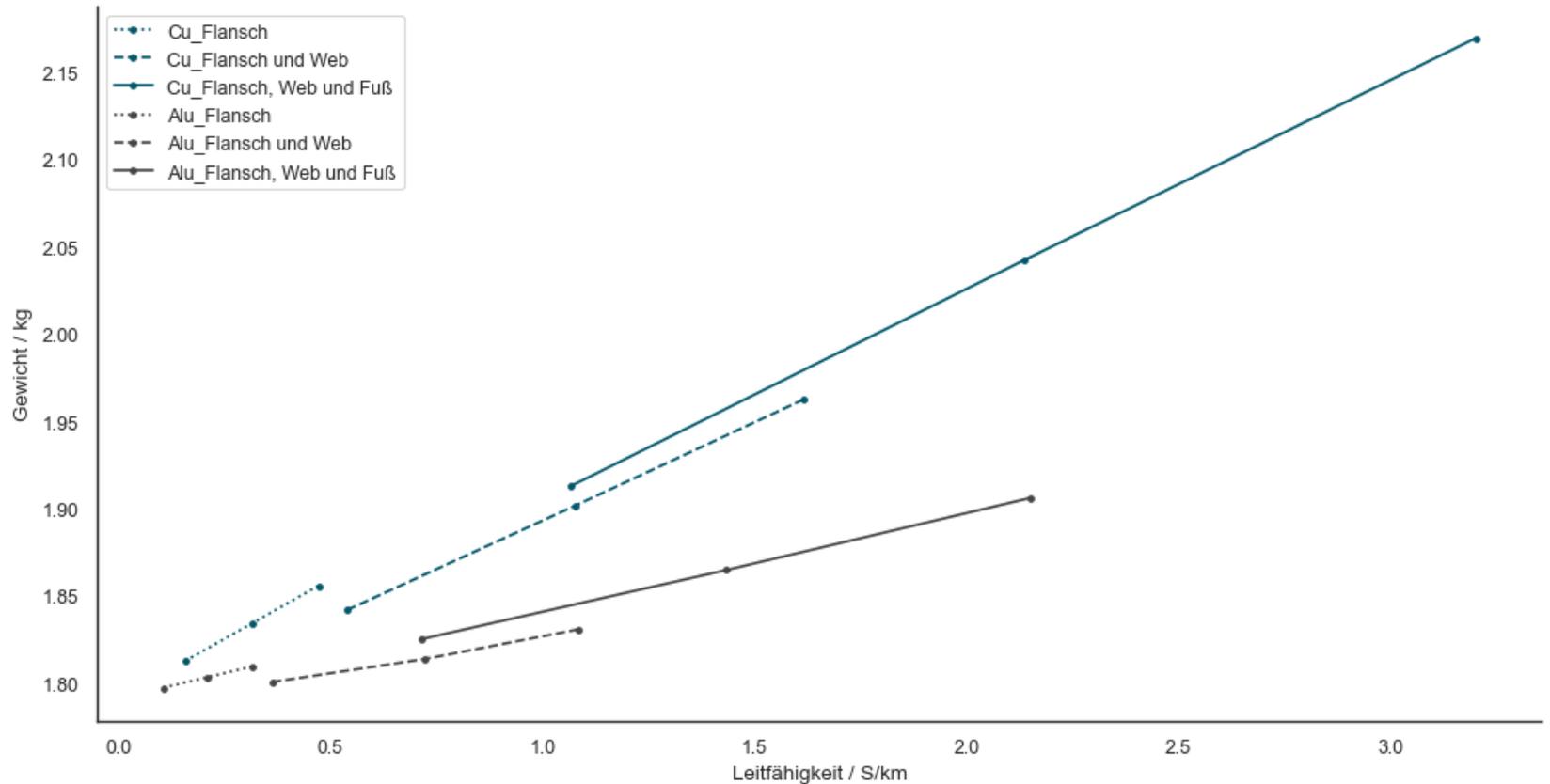
# Einfluss der Metallregionen auf die Leitfähigkeit

Material: Edelstahl



# Einfluss der Metallregionen auf die Leitfähigkeit

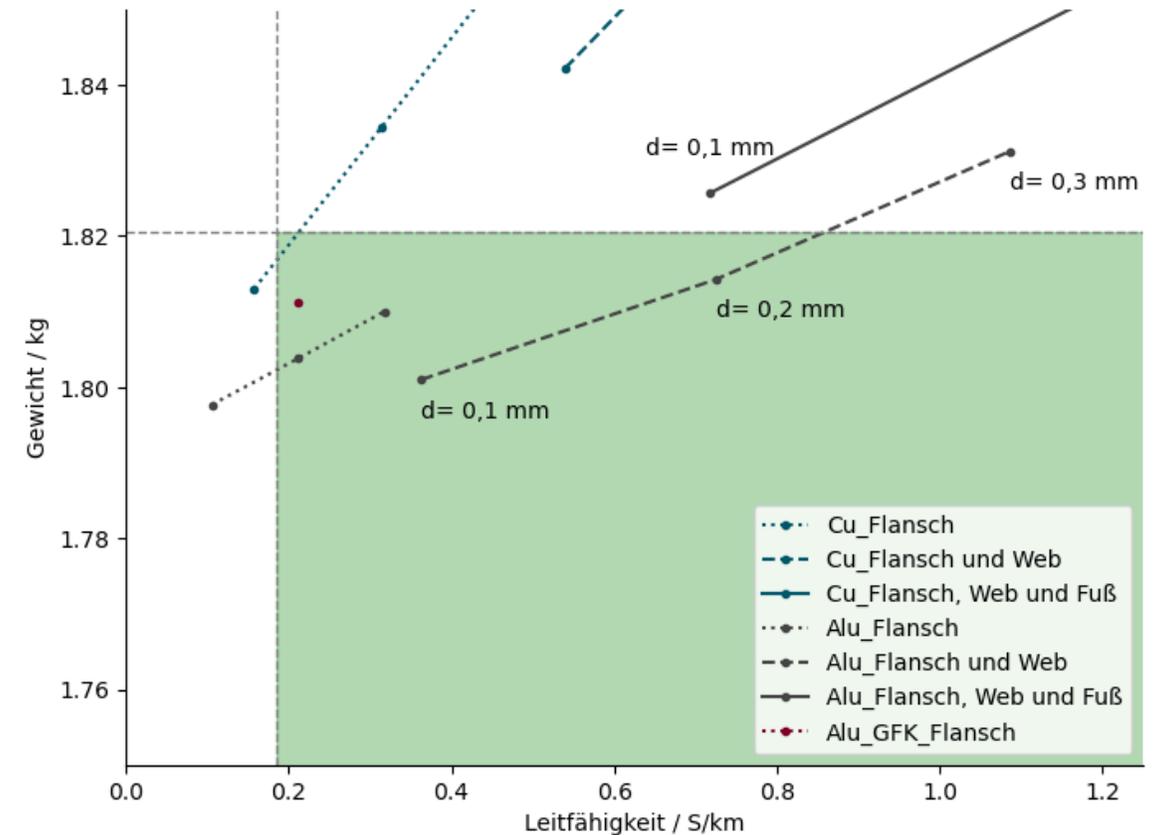
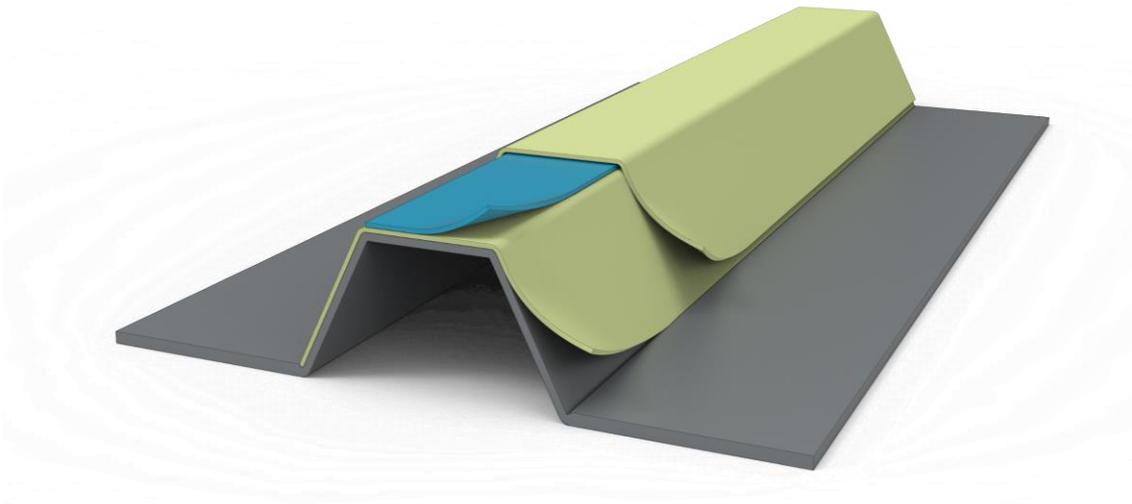
Material: Aluminium und Kupfer



# Gültige Lösungen für AWG 12

Material: Aluminium und Kupfer

- Mithilfe einer GFK Lage lässt sich die Kontaktkorrosion zwischen dem CFK und dem Aluminium verhindern



# ESN – Demonstrator

strukturintegrierter Omega Stringer



# FML – Metall Vorbehandlung mittels Vakuumsaugstrahlen



Mechanische Vorbehandlung (VSS):



Chemische Nachbehandlung (Tauchbad):



**Vakuumsaugstrahlen:**

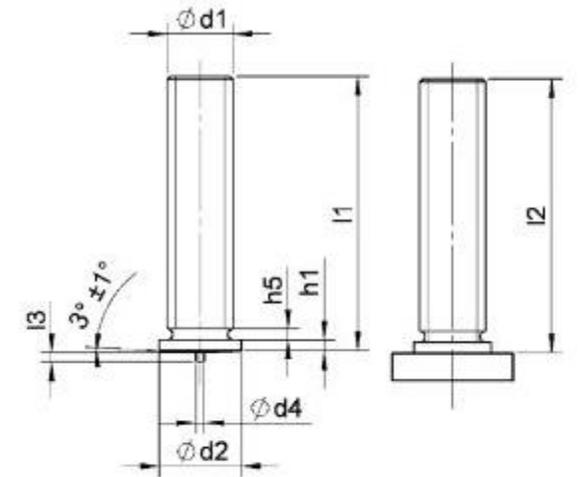
- Strahlgut wird über Unterdruck im flachen Winkel über die Metallfolien geführt
- Gleichmäßige schonende Vorbehandlung (speziell für dünne Folien)
- Kontinuierlicher Prozess

*„Ein **intrinsic Hybrid** ist ein integrales Bauteil, bei dem die Verbindung der verschiedenen Materialien im Ur- bzw. Umformprozess der metallischen oder endlosfaserverstärkten Komponente erfolgt. Somit ist kein nachgeschalteter Fügeprozess notwendig“*

# Anschlusskonzept der Leiterbahnen

## Bolzenschweißen

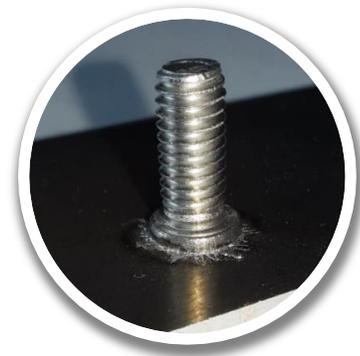
- Das Bolzenschweißgerät funktioniert mit einer Spitzenzündung. Hierbei wird der Bolzen in die Pistole eingesetzt und senkrecht auf der Oberfläche positioniert. Mit dem Auslösen des Schweißvorganges wird der Bolzen um einen definierten Abstand von der Oberfläche entfernt. Der entstehende Lichtbogen schmilzt das Material auf. Durch das Absenken des Bolzen in das Schweißbad ist der Prozess beendet und der Bolzen fixiert.



# Anschlusskonzept der Leiterbahnen

## Bolzenschweißen

- Die Gewindebolzen werden direkt auf die Oberfläche der Metallfolien geschweißt.
- Mithilfe der Bolzen wird der elektrische Kontakt auf der Oberfläche hergestellt.
- Der Gewindebolzen übernimmt den mechanischen und elektrischen Anschluss an den ESN Komponenten.

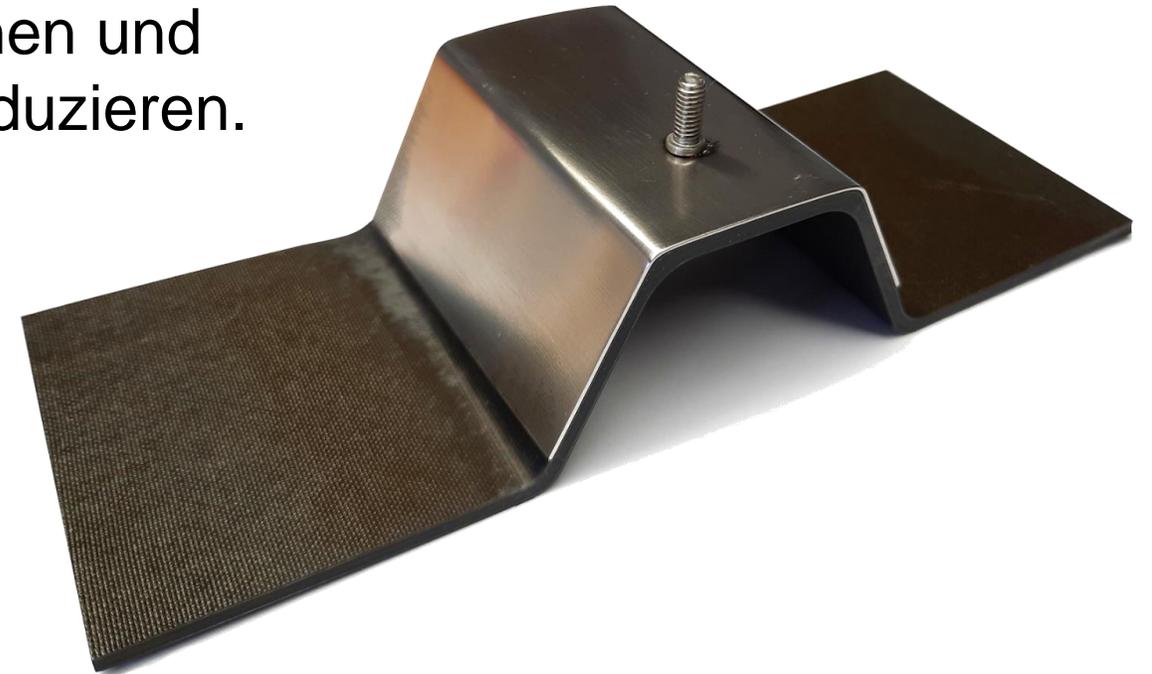


# Funktionalisierter ESN – Demonstrator Details

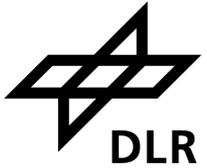
- Gewichtsneutrale Integration der Metallfolie bei nahezu gleicher Steifigkeit
- Es konnten eine CFK-Lage auf der vollen Breite und zwei kleine CFK-Lagen im Stringerkopf durch die Metallfolie ersetzt werden.
- Materialien: M21E und X5CrNi18-10
- Zusätzliche Funktionen:
  - elektrischer Querschnitt:
    - $26\text{mm} * 0,4\text{mm} = 10,4 \text{ mm}^2$
  - Impact Schutz für einen Tool Drop
  - Metallisches Interface auf der elektrischen Seite
  - FVK Interface am Stringerfuß



- Es wurde ein Designprozess vorgestellt, funktionalisierte Stringerkonzepte schnell hinsichtlich Gewicht und Leitfähigkeit analytisch auszulegen.
- Lösungsräume zeigen gültige Materialpaarungen und Lagenaufbauten auf.
- Das vorgestellte Konzept zeigt, dass es möglich ist, Versteifungselemente leichter zu designen und gleichzeitig den Montageaufwand zu reduzieren.
- Es wurde ein Demonstrator gefertigt, der bei gleichem Gewicht und gleicher Steifigkeit elektrisch funktionalisiert wurde.



# Vielen Dank



Dr. Alexander Pototzky  
Dr. David Zerbst

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.  
Institut für Systemleichtbau

Abteilung Funktionsleichtbau

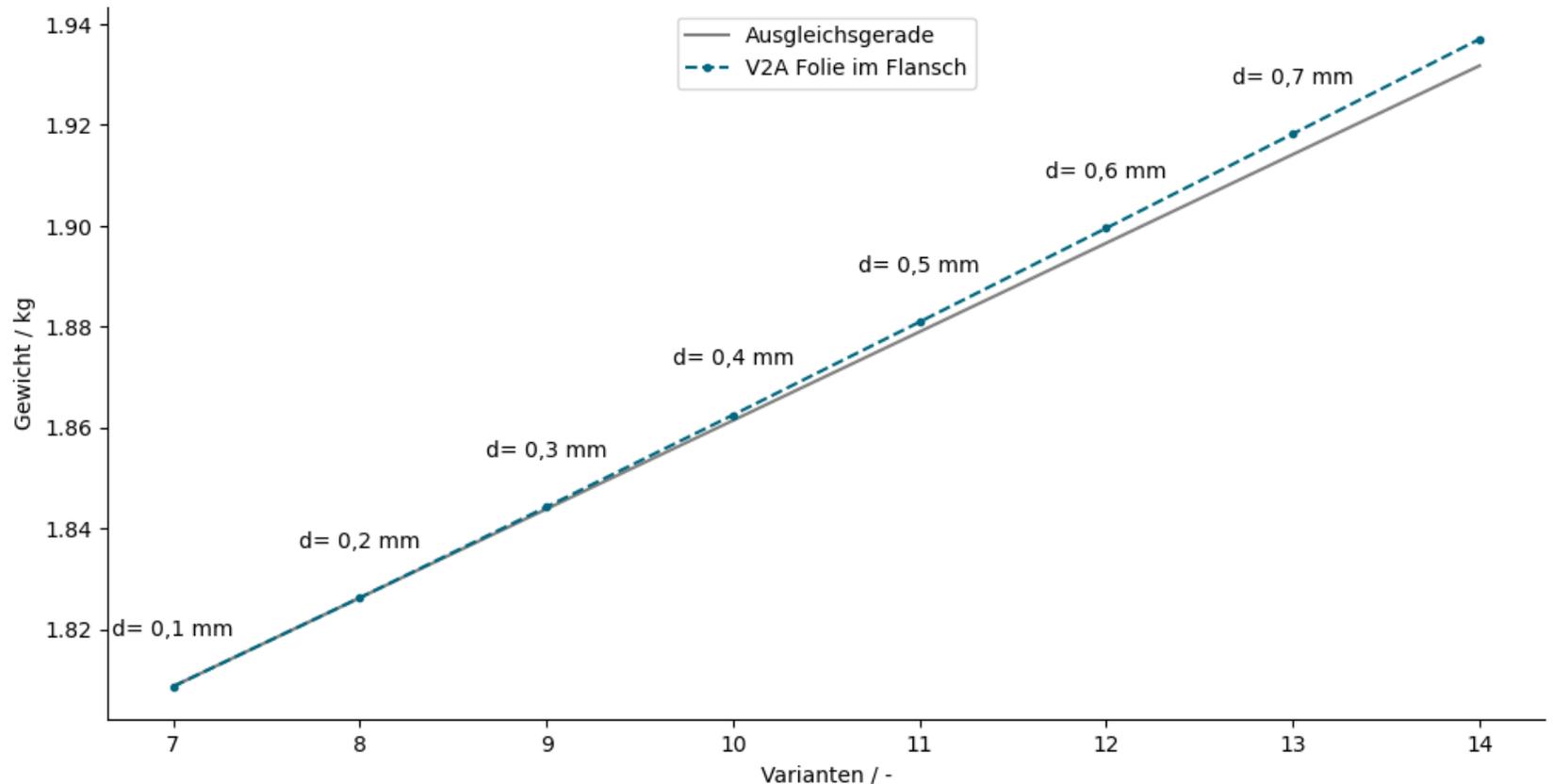
Lilienthalplatz 7  
38108 Braunschweig  
Germany



# Leitfähige Stringer

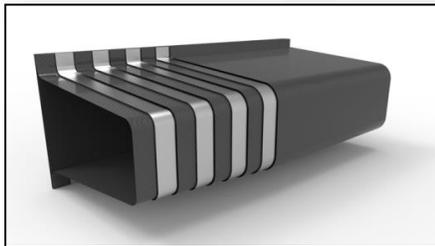
ab wann ist die Leitfähigkeit gut genug.

- Gibt es einen Linearen Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Gewicht?

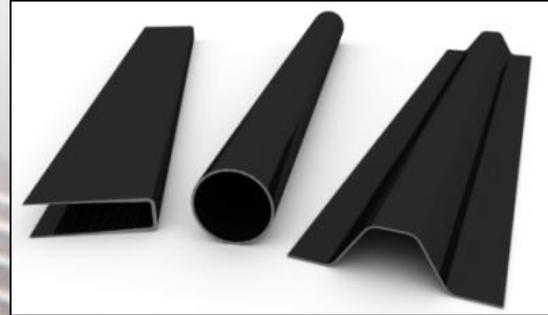


# Faser-Metall-Laminat (FML)

## Crashelemente



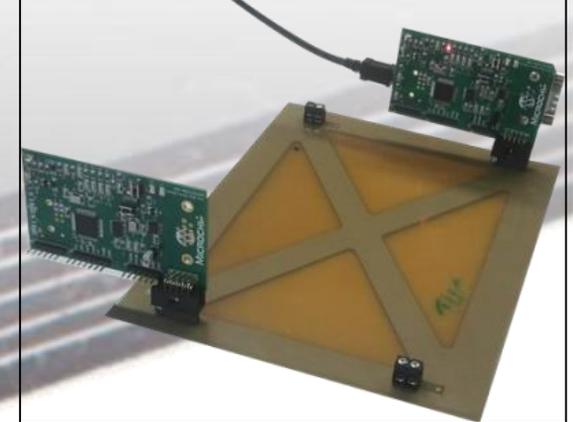
## Flächige Hybridisierung



## Lokale Hybridisierung



## Funktionsintegration



- Leichtbaulösung für uni-axial hochbelastete Strukturen (Bsp. Versteifungsstreben)
- Verbesserung von Beul- und Knickverhalten
- Erhöhung von Lochleibungsfestigkeiten
- Verbesserung des Crashverhaltens
- Funktionsintegration (elektrische Leitfähigkeit, Abrasionsschutz)

# Variation des Metallanteils

- Die Breite der Metallfolie kann beliebig variiert werden.
- Eine Metallfolie auf dem Stringerfuß wäre auch denkbar
- elektrischer Querschnitt:
  - $95\text{mm} * 0,4\text{mm} = 38\text{mm}^2$



# ALU – GFK CFK Kombie ? Realistische zukunft?



# FML – Metall Vorbehandlung mittels Vakuumsaugstrahlen



Mechanische Vorbehandlung (VSS):



Chemische Nachbehandlung (Tauchbad):



**Vakuumsaugstrahlen:**

- Strahlgut wird über Unterdruck im flachen Winkel über die Metallfolien geführt
- Gleichmäßige schonende Vorbehandlung (speziell für dünne Folien)
- Kontinuierlicher Prozess

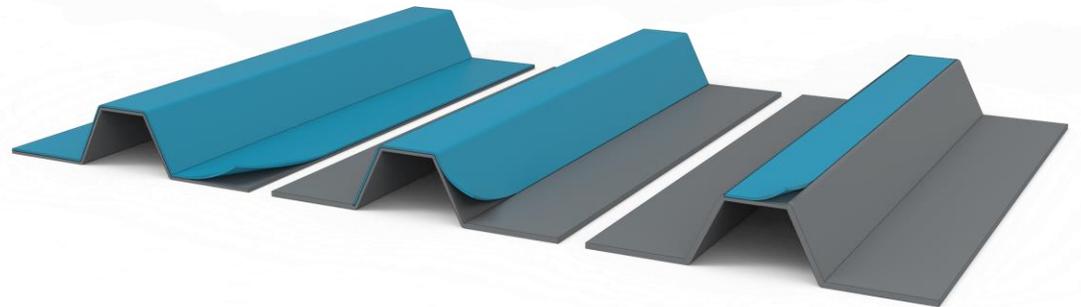
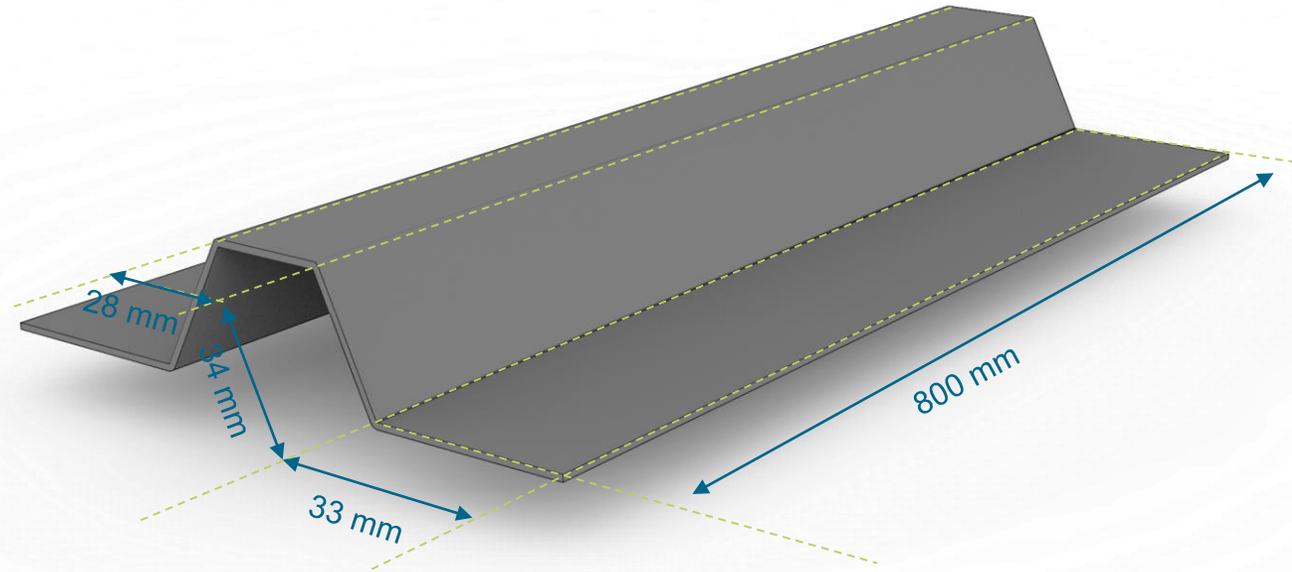
*„Ein **intrinsic Hybrid** ist ein integrales Bauteil, bei dem die Verbindung der verschiedenen Materialien im Ur- bzw. Umformprozess der metallischen oder endlosfaserverstärkten Komponente erfolgt. Somit ist kein nachgeschalteter Fügeprozess notwendig“*

# Randbedingungen, Größen, Variationen/konfigurationen

- Bla was wurde gemacht

- Material M21E/IMA
- Lagenaufbau  $[\pm 45, 0]_s$
- Alu, Kupfer, Edelstahl

Materialauswahl



- Das ESN besteht aus drei verschiedenen Untergruppen:
  - strukturellen metallischen Elemente
  - mechanischen Verbindungsstellen und Anbauteile
  
- Aufwändige Fertigung in der FAL

