

Untersuchung der Umsetzbarkeit eines aeroelastisch ähnlichen Halbmodells im European Transonic Windtunnel

Moritz Herberhold

Technische Universität Braunschweig

Thomas Klimmek

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Aeroelastik



Knowledge for Tomorrow



Inhaltsübersicht

- Motivation und Ziel
- Entwurfspunkt
- Modellbeschreibung
- Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens
- Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens
- Zusammenfassung und Ausblick



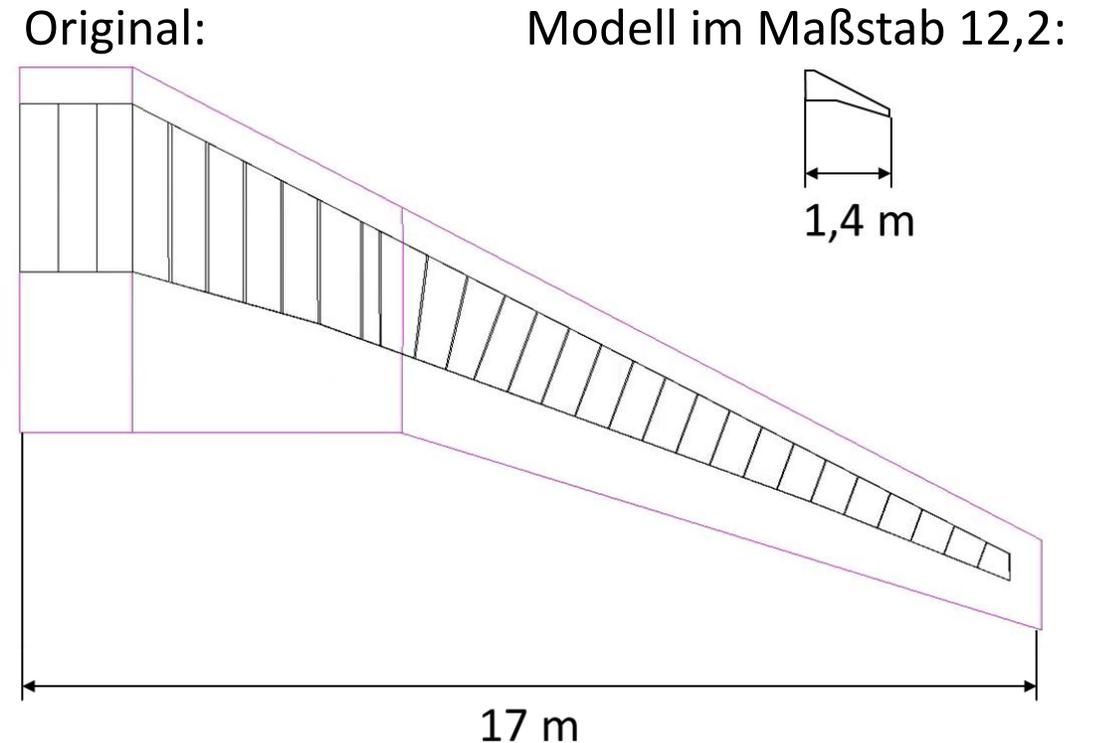
Motivation und Ziel

Motivation:

- Modelluntersuchungen von Verkehrsflugzeugen im transsonischen Reiseflug sind und bleiben eine große Herausforderung
- Zur Validation aeroelastischer Methoden und zur Verfeinerung des physikalischen Verständnisses sind Modellversuche unersetzlich
- Besonders bei transsonische Phänomen mit stark nichtlinearen strukturellen oder aerodynamischen Einflüssen, wie Limit Cycle Oscillations oder transsonischem Buffeting

Zentrale Herausforderung:

Schaffen aeroelastischer Ähnlichkeit zwischen Modell und Original



Motivation und Ziel

Aeroelastische Ähnlichkeit bei transsonischer Strömung:

- Relevante physikalische Größen müssen im selben Verhältnis zueinander stehen
- Verhältnis wird mit dimensionslosen Kennzahlen beschrieben

- Ähnlichkeit der Strömung: Machzahl und Reynoldszahl
 - Transsonische Anströmgeschwindigkeiten, großes Modell, hohe Luftdichte, hohe Ruhedrucke und/oder tiefe Temperaturen

- Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens: aeroelastische Cauchyzahl
 - Große Steifigkeiten

- Ähnlichkeit des dynamischen Strukturverhaltens: relatives Dichteverhältnis, reduzierte Frequenz
 - Große Massen, festes Verhältnis zwischen Eigenfrequenzen von Modell und Original

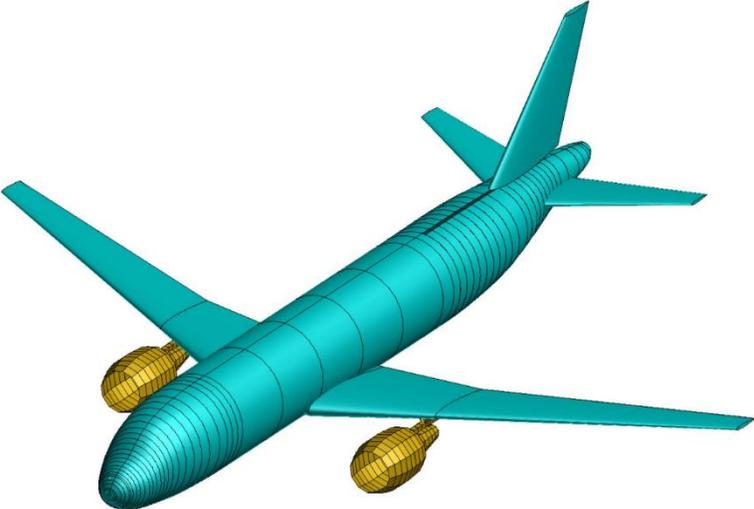


Motivation und Ziel

Ziel der Arbeit:

Untersuchung der Umsetzbarkeit eines aeroelastisch ähnlichen Halbmodells der D150-Konfiguration im transsonischen Reiseflug

D150-Konfiguration	
Spannweite:	33,91 m
Flügelfläche:	122,3 m ²
MTOW:	73 t
Reiseflughöhe:	10.000 m
Ma _{Reise} :	0,78
Besonderheiten:	
- Kurz- bis Mittelstrecke	
- 150 Passagier*innen	
- Klassische Aluminiumbauweise [1]	



[1]



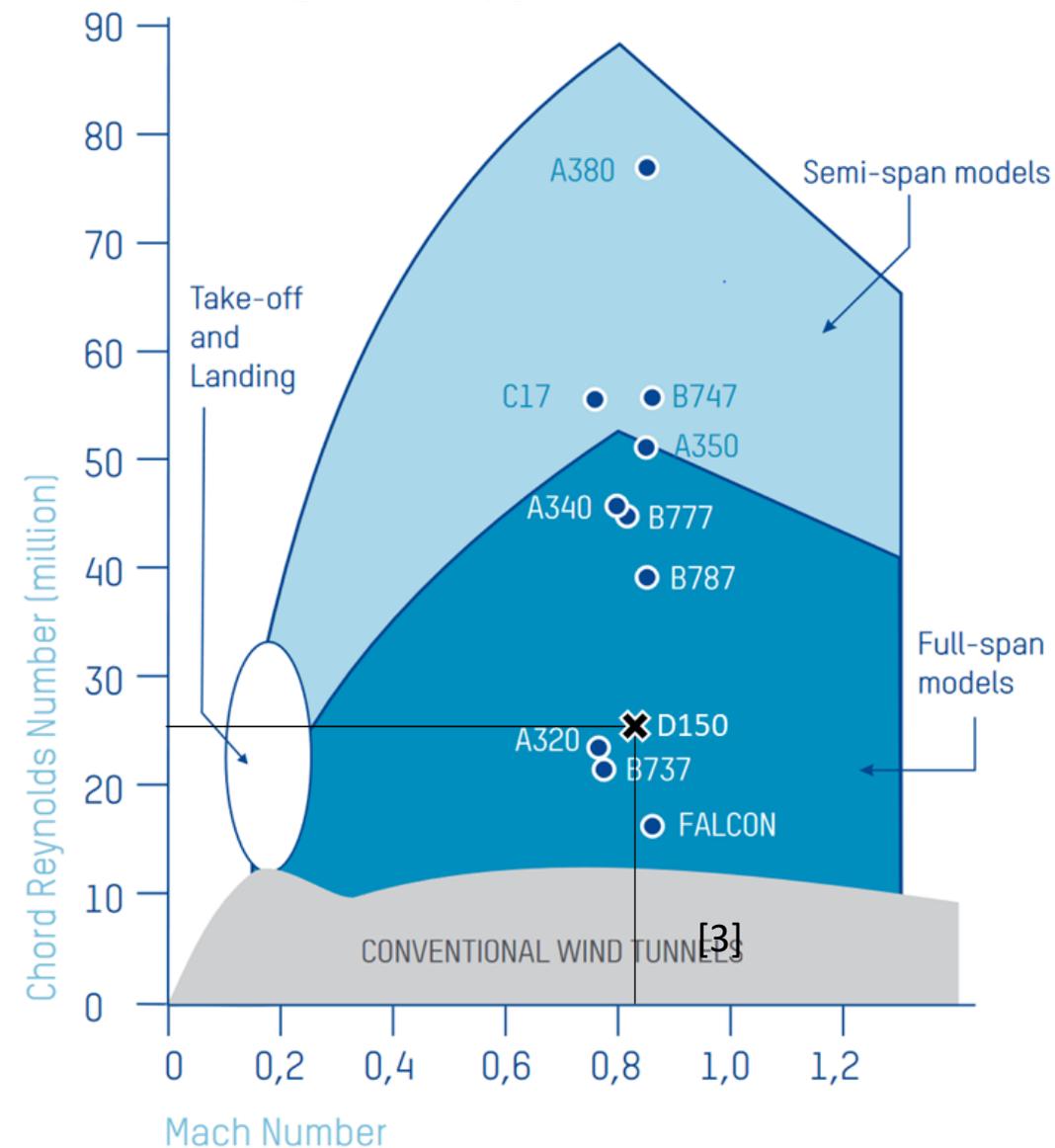
Entwurfspunkt

Betrachteter Flugzustand:

- 1g-Horizontalflug auf Reiseflughöhe mit maximaler Betriebsmachzahl M_{MO}
- Massenkfiguration mit maximaler Startmasse und maximaler Treibstoffmasse

Parameter	Wert
Flughöhe	10.000 m
Machzahl M_{MO}	0,82
C_L	0,47
Reynoldszahl	$25,1 \cdot 10^6$
Flügelmasse (Struktur+Systeme+Kraftstoff)	18730 kg
1. Biegung	2,718 Hz

Leistungsenveloppe des ETW:



Entwurfspunkt

Entwurfspunkt:

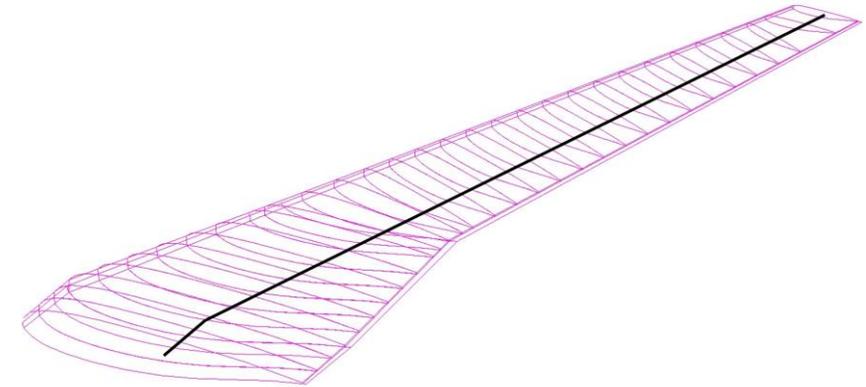
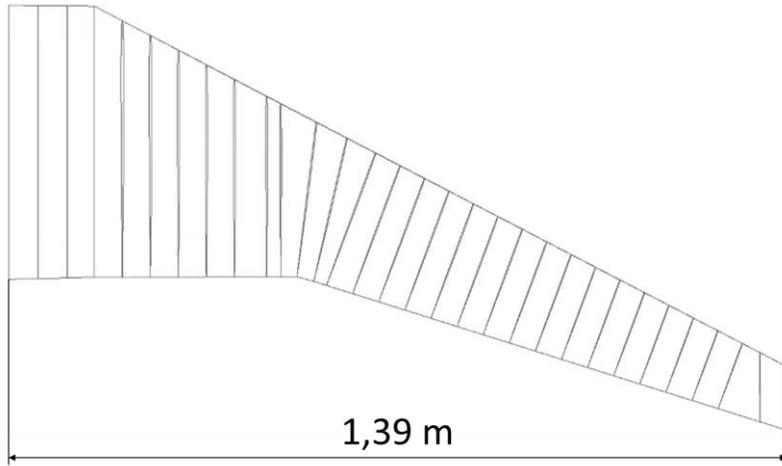
Parameter	Original	Verhältnis	Modell
Temperatur	223 K	0,538	120 K
Ruhedruck	264 hPa	5,205	1374 hPa
Luftdichte	0,413 kg/m ³	9,34	3,857 kg/m ³
Anströmgeschwindigkeit	245,6 m/s	0,746	183,1 m/s
Staudruck	12456 Pa	5,191	64661 Pa
Auftrieb bei $C_L=0,47$	358 kN	0,0349	12,5 kN
Flügelmasse	18730 kg	$5,144 \cdot 10^{-3}$	96,34 kg
1. Biegung	2,718 Hz	11,092	30,15 Hz

- Niedrige Temperatur sorgt für hohe Luftdichte
- Hohe Luftdichte führt zu hohem Staudruck und somit hohen Flächenlasten
- Hohe Luftdichte führt über relatives Dichteverhältnis zu hoher Modellmasse



Modellbeschreibung

Modellflügel:



- ModGen-Halbmodell im Maßstab 1:12,2 ohne Rumpf
- Aufbau orientiert sich an Flügelmodell aus Projekt Figure CRP [4]
- Tragende Flügelhaut mit Schaumkern
- Häute werden durch Schalenelemente und Schaumkern durch Volumenelemente modelliert
- Einspannung über Fixierung der Endrippe
- Rippenpositionen und Lage der Lastreferenzachse für gleiche Lasteinleitung aus Original übernommen
- Strukturmechanische modelliert werden nur Endrippen



Modellbeschreibung

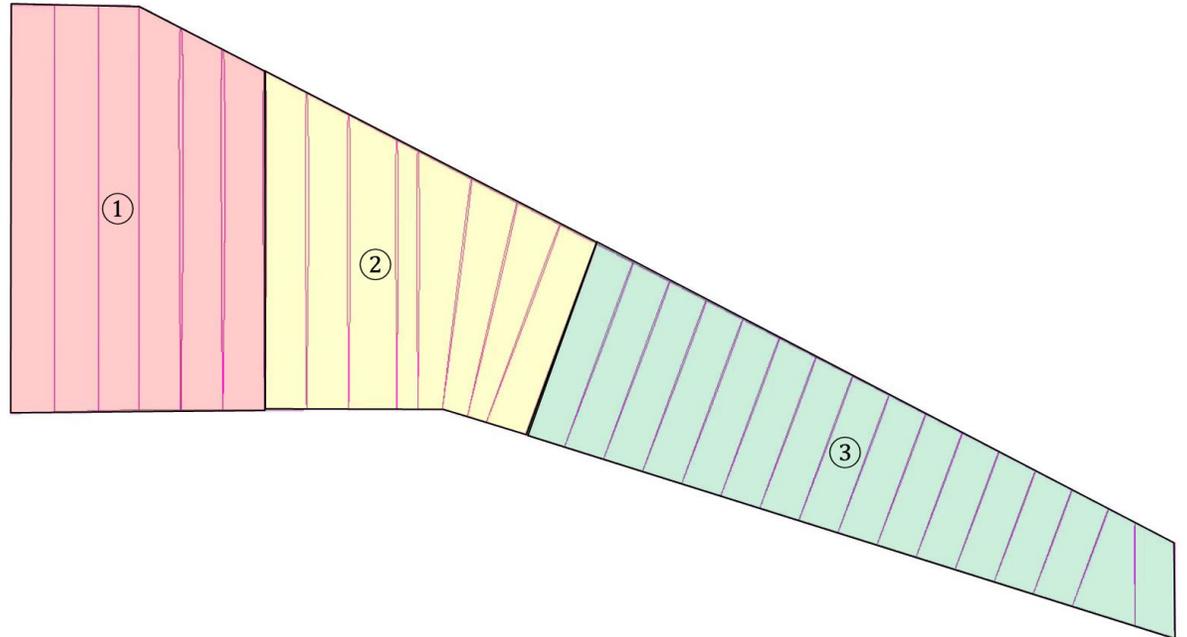
Optimierung und Materialaufbau:

- Faserverbundlaminat aus acht 0,5mm-Schichten mit symmetrischer Stapelreihenfolge $[0^\circ +45^\circ -45^\circ 90^\circ]_s$
- Implementiert in Form von PCOMP-Karten
- Drei Materialien implementiert:

Material	E_{11}	ϵ_t	ϵ_c
UD-Glasfaser	41,8 GPa	3 %	2 %
UD-Kohlefaser	155 GPa	1,075 %	0,323 %
UD-Aramidfaser	75 GPa	1,7 %	0,35 %

- Flügel ist in drei Designfelder unterteilt
- Hautdicken und Lagenaufbauten werden manuell angepasst

Designfelder:



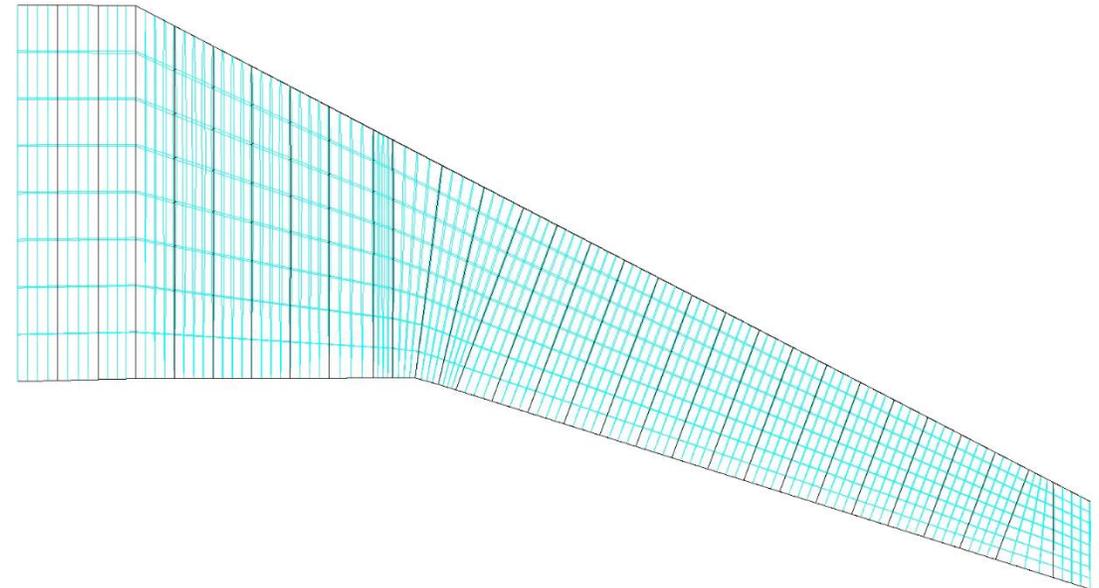
Modellbeschreibung

Lasten:

- Luftkräfte werden mit Doublet-Lattice-Methode berechnet
- Vier Lastfälle mit festem Anstellwinkel
- Lastfall 2 und 3 sind Extremlastfälle die Festigkeit des Modells gewährleisten
- Lastfall 4 besitzt $C_L=0,47$ und ist somit äquivalent zu 1g-Referenzlastfall

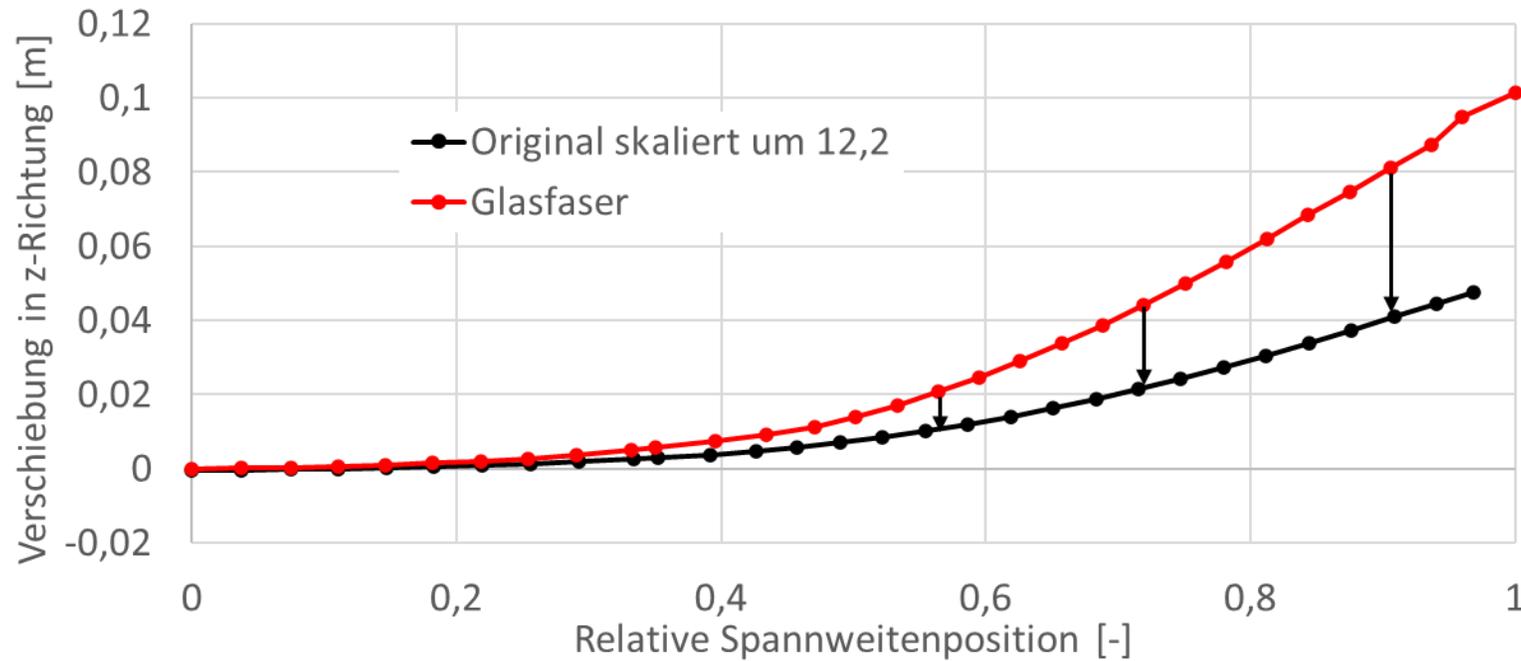
Lastfall	Typ	Anstellwinkel	Anströmmachzahl
1	α_{fixed}	0,0°	$Ma_{M0}=0,82$
2	α_{fixed}	10,0°	$Ma_D=0,9$
3	α_{fixed}	-10,0°	$Ma_D=0,9$
4	α_{fixed}	2,5°	$Ma_{M0}=0,82$

Doublet-Lattice-Modell:



Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Vorgehen:

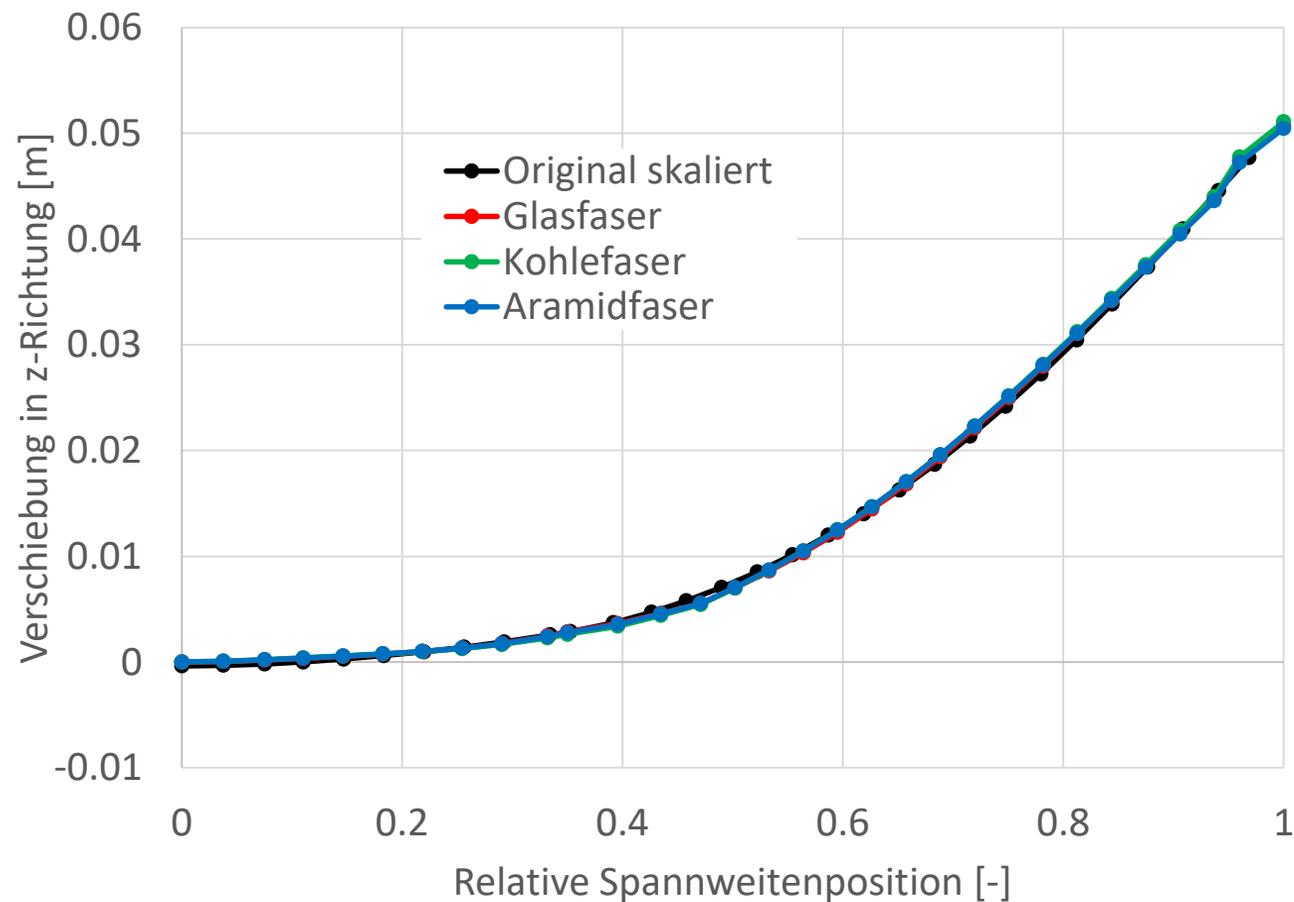


1. Skalierung der Originalbiegeline für den 1g-Referenzlastfall um den Maßstab 12,2
2. Vergleich der Biegelinien von Modell und Original
3. Erhöhung der Schichtdicke der 0°-Schichten bis Biegelinien maximal 5% Abweichung besitzen



Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Biegelinien:



Hautdicken der Modelle:

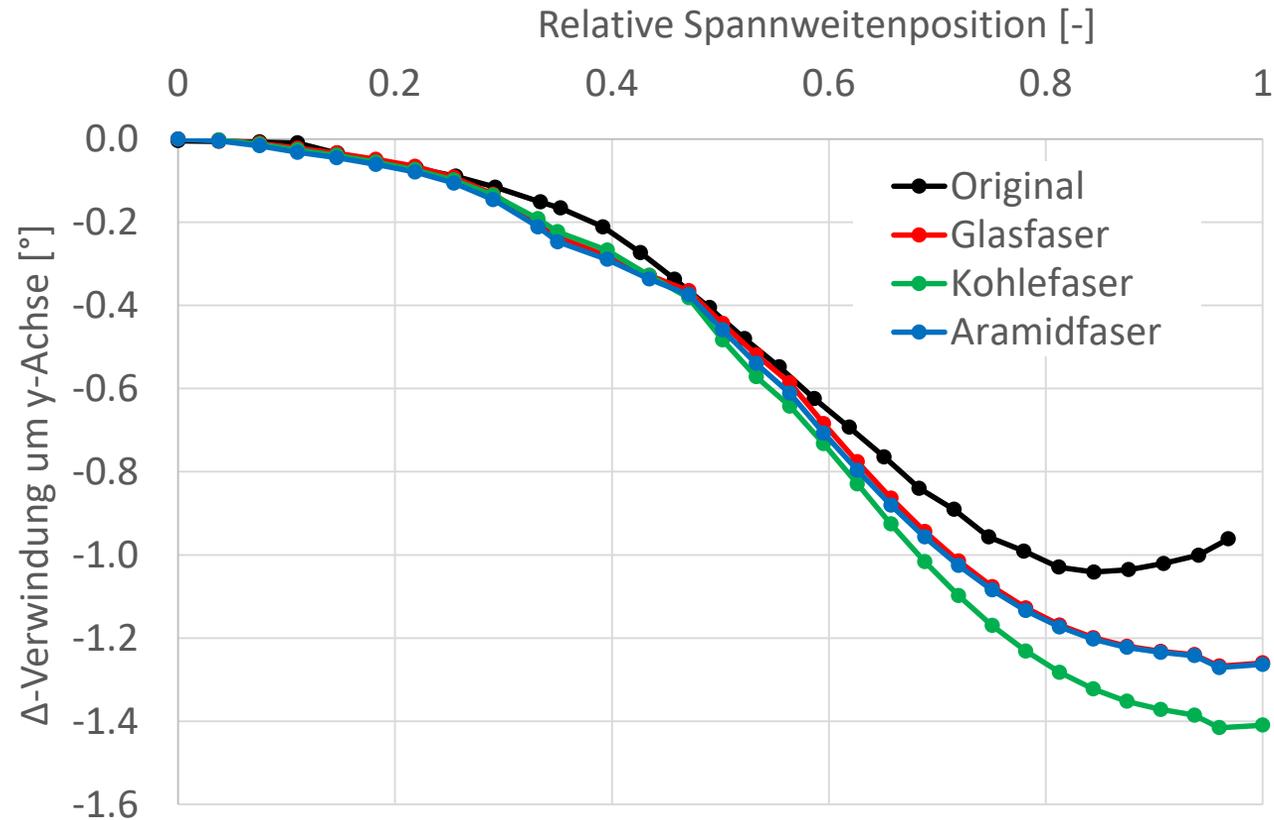
Modell	Designfeld 1	Designfeld 2	Designfeld 3
Glasfaser	20,2 mm	9,4 mm	6,6 mm
Kohlefaser	10,0 mm	3,8 mm	4,2 mm
Aramidfaser	16,4 mm	6,6 mm	5,2 mm

- Alle Modelle erreichen Ähnlichkeit der Biegelinie
- Glasfasermodell benötigt hierfür sehr hohe Hautdicken
- Die Hautdicken des Kohlefasermodells betragen etwa die Hälfte



Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Verwindung:



- Ähnlichkeit der Verwindung wird nicht erreicht
- Abweichungen bei Kohlefasermodell am größten
- Abweichung sorgt für Änderung der Auftriebsverteilung
- Nachbesserung notwendig

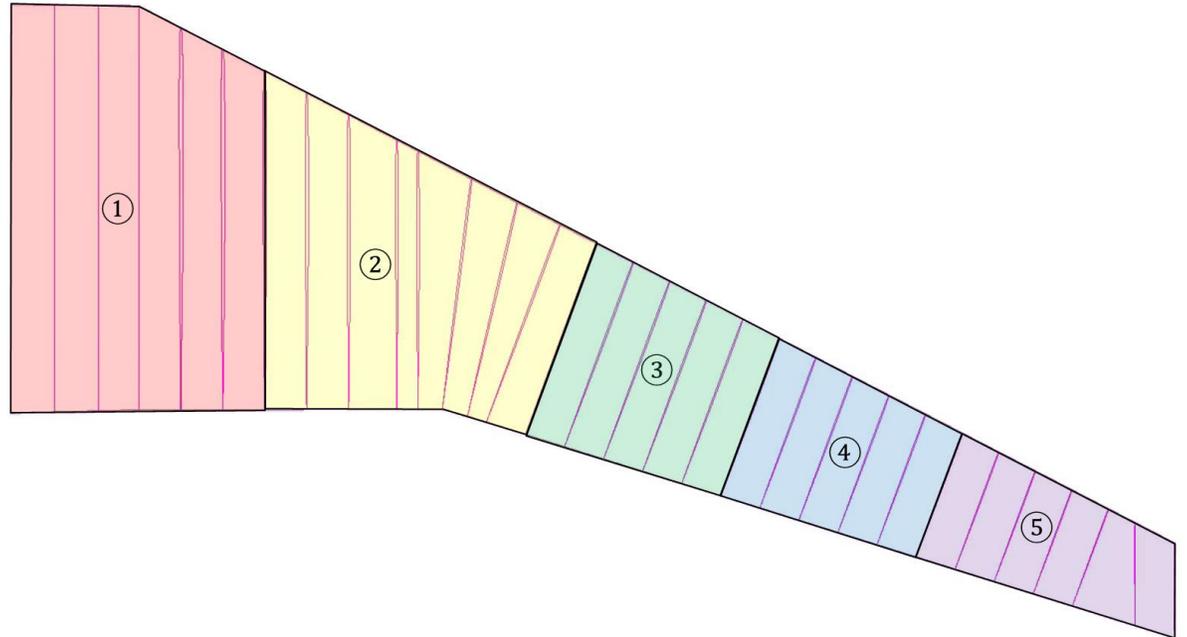


Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Anpassen des Vorgehens:

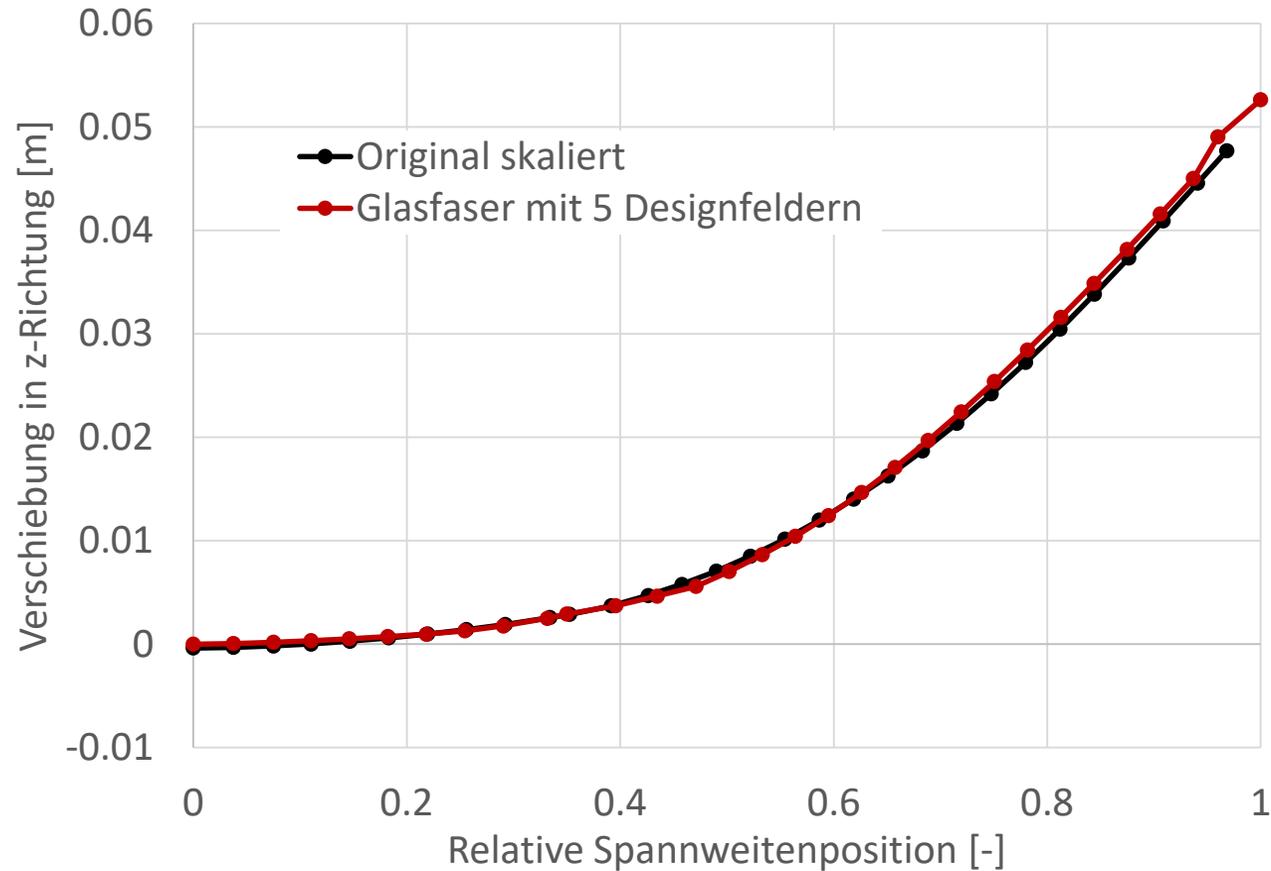
- Ziel: Modell, welches Ähnlichkeit der Verwindung und Biegelinie aufweist und den Festigkeitsanforderungen standhält
- Nur Glasfaser erfüllt Festigkeitsanforderungen
- Aufteilung des Designfeldes 3 in drei Designfelder
- Gleichzeitige Betrachtung von Verwindung und Biegelinie

Designfelder:



Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Glasfasermodell mit fünf Designfeldern: Biegelinie



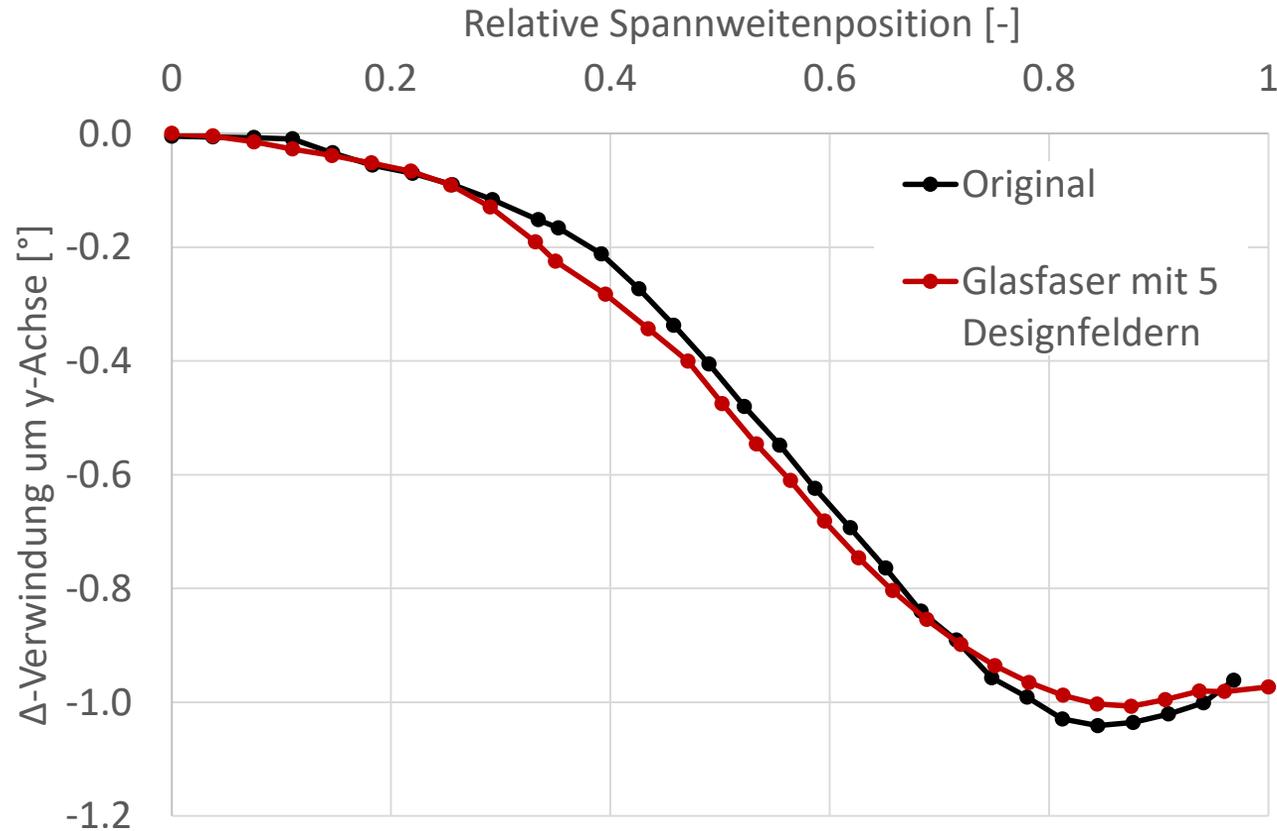
Designfeld	Designfeld	Designfeld	Designfeld	Designfeld
1	2	3	4	5
18,2 mm	11,0 mm	7,0 mm	7,0 mm	3,8 mm

- Ähnlichkeit der Biegelinie konnte erneut erreicht werden
- Leicht größere Abweichungen
- Erneut hohe Hautdicken
- Nur an Flügelwurzel und Flügelspitze etwas kleinere Hautdicken



Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Glasfasermodell mit fünf Designfeldern: Verwindung



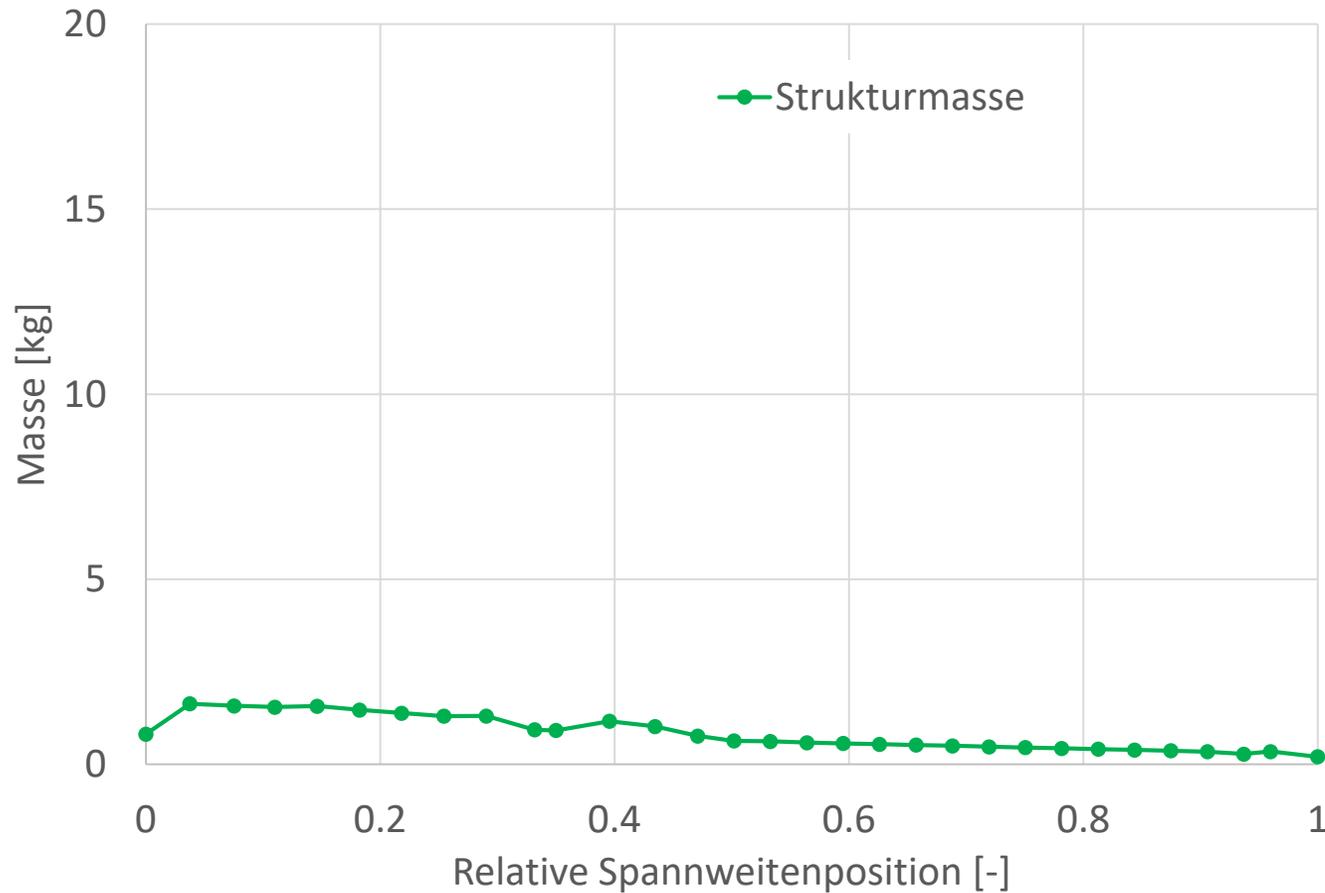
Designfeld 1	Designfeld 2	Designfeld 3	Designfeld 4	Designfeld 5
18,2 mm	11,0 mm	7,0 mm	7,0 mm	3,8 mm

- Ähnlichkeit der Verwindung konnte stark verbessert werden
- Keine Abweichungen $>0,1^\circ$
- Modell genügt auch Festigkeitsanforderungen
- Ähnlichkeit der statischen Verformung gegeben



Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens

Massenverteilung: Strukturmasse ohne Zusatzmassen



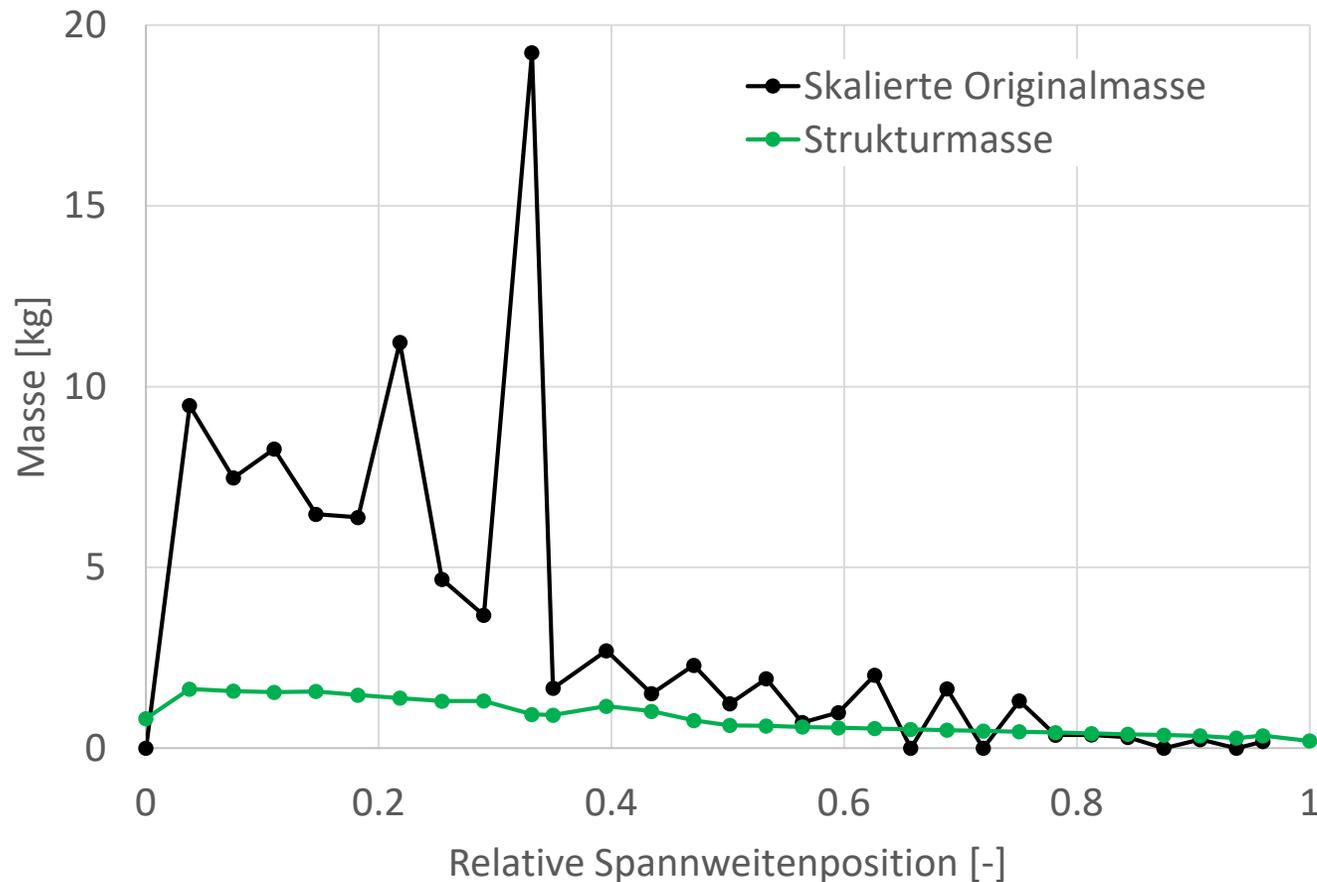
Eigenform	Original skaliert	Modell	Abweichung
1. Biegung	30,15 Hz	65,74 Hz	+118%
2. Biegung	95,68 Hz	170,68 Hz	+78,4%

- Bei Strukturmasse von 25,11 kg ergeben sich deutlich zu hohe Eigenfrequenzen



Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens

Massenverteilung: Strukturmasse ohne Zusatzmassen



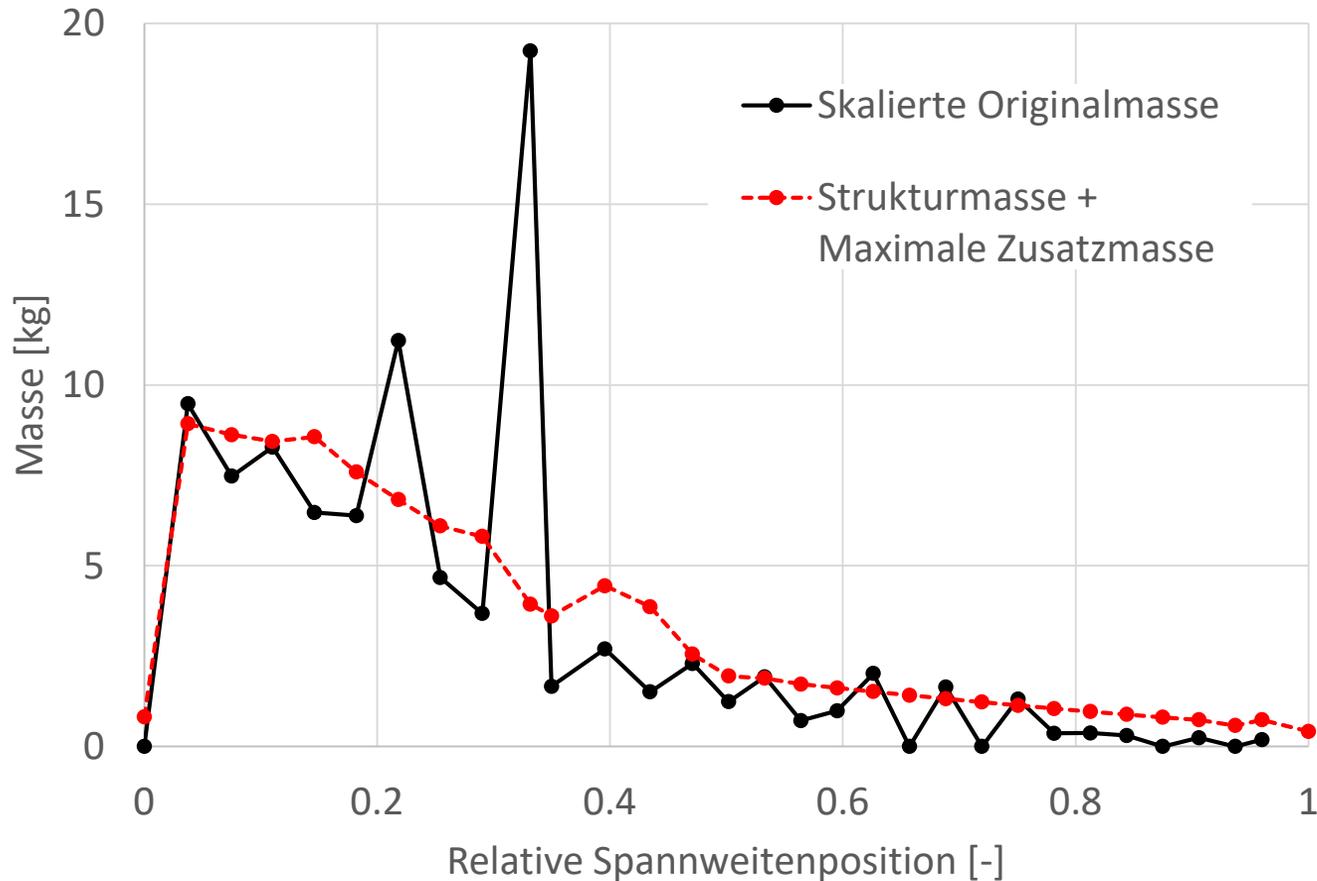
Eigenform	Original skaliert	Modell	Abweichung g
1. Biegung	30,15 Hz	65,74 Hz	+118%
2. Biegung	95,68 Hz	170,68 Hz	+78,4%

- Bei Strukturmasse von 25,11 kg ergeben sich deutlich zu hohe Eigenfrequenzen
 - Skalierte Originalmasse von 96,34 kg muss im Modell nachgebildet werden
 - Es fehlen Treibstoff und Systemmassen im Modell
- Hohe Zusatzmassen notwendig



Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens

Massenverteilung: Maximale Zusatzmasse



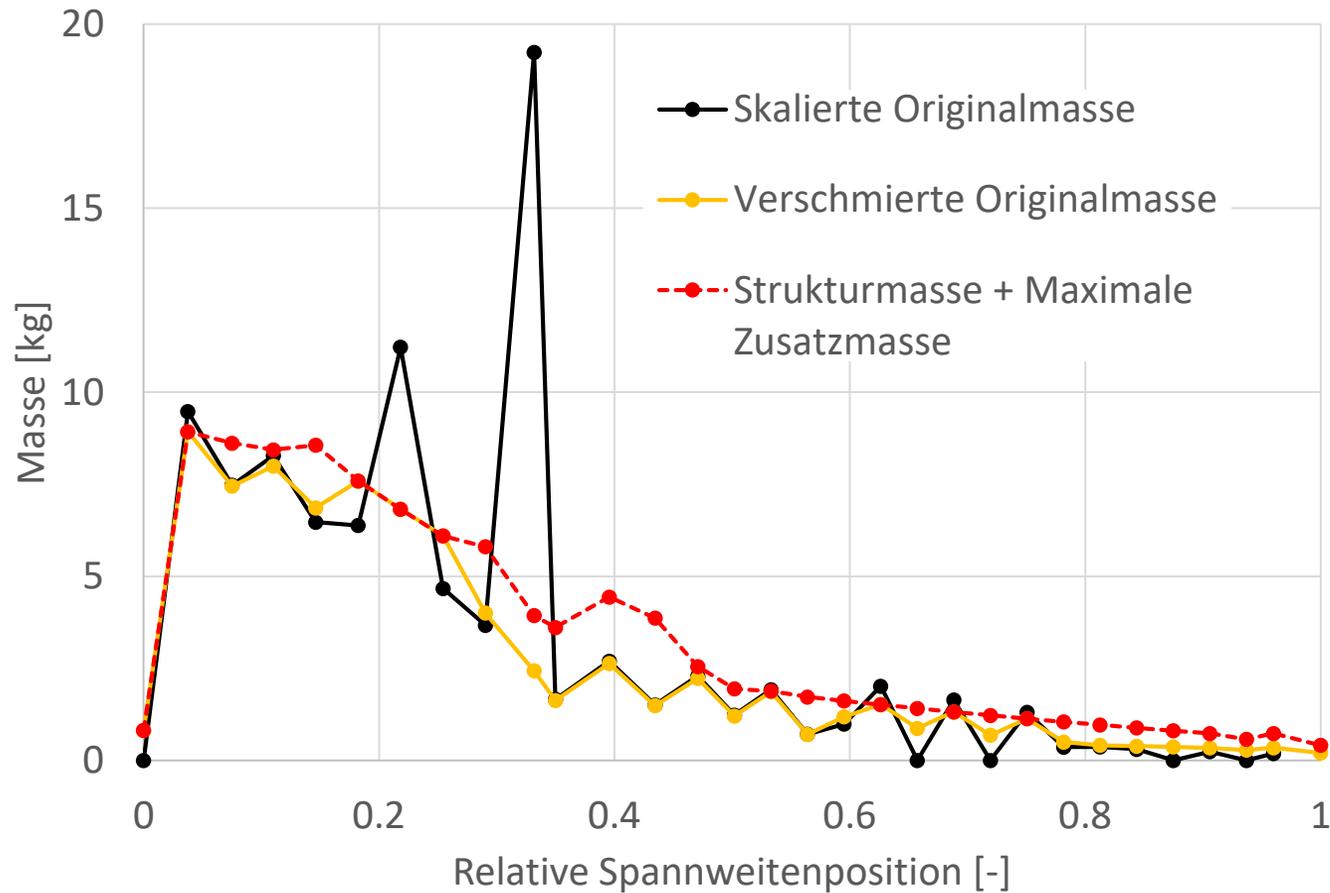
Annahmen:

- Maximale 50% des Flügelvolumens können für Zusatzmassen genutzt werden
- Zusatzmassen aus Blei mit einer Dichte von 11340 kg/m^3
- Zusatzmassen werden entlang der Lastreferenzachse an den Rippenpositionen angebracht und als Punktmassen mit Torsionsträgheit modelliert
- Triebwerksmasse von $17,78 \text{ kg}$ wird als externe Zusatzmasse an der Triebwerksposition angebracht



Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens

Massenverteilung: Verschmierte Originalmasse



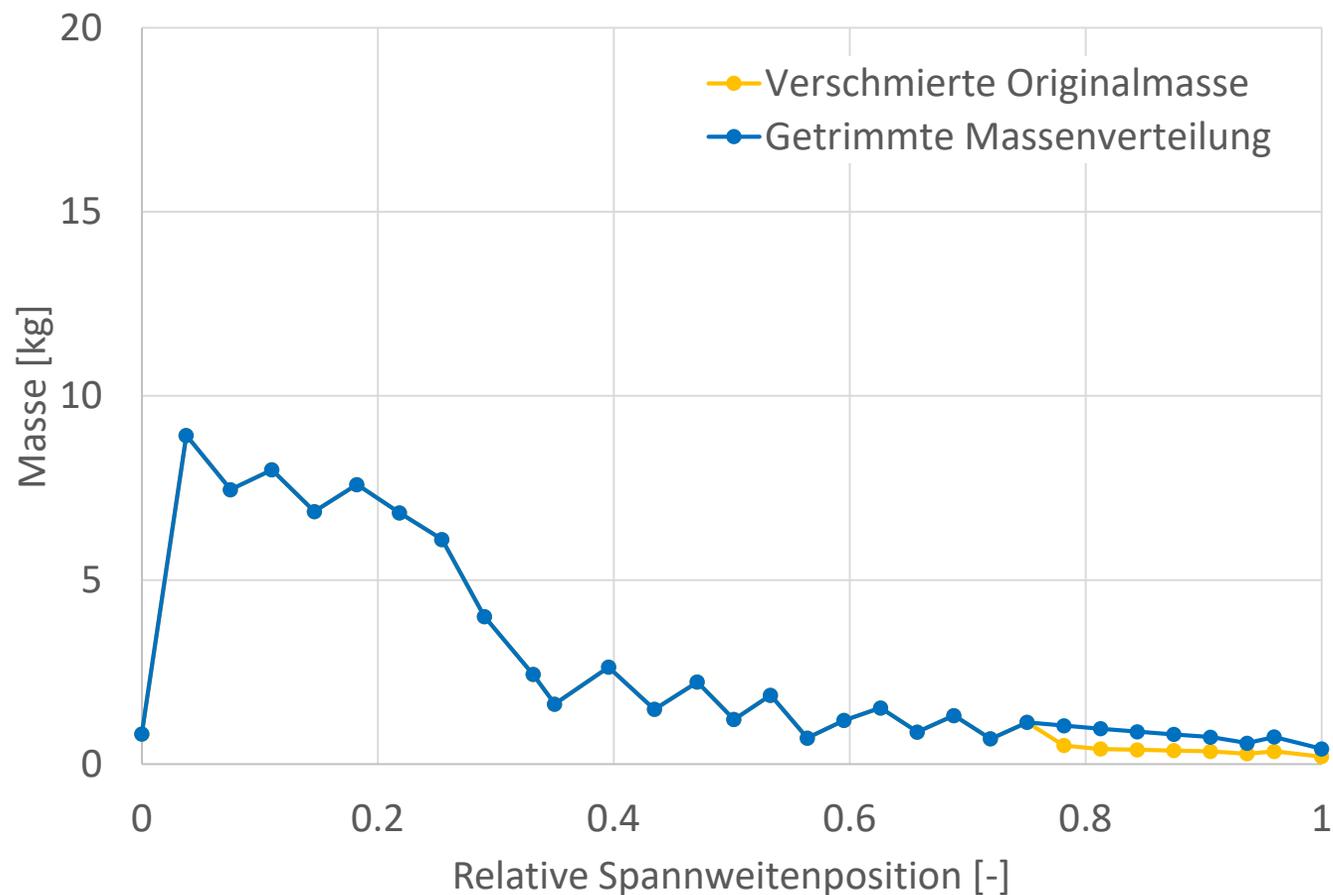
Eigenform	Original skaliert	Modell	Abweichung g
1. Biegung	30,15 Hz	43,66 Hz	+44,8%
2. Biegung	95,68 Hz	109,33 Hz	+14,3%

- Mit der verschmierten Originalmasse von 96,34 kg sind die deutlich näher, aber weiterhin zu hoch
- Für Ähnlichkeit der Eigenfrequenzen sind Trimmassen notwendig



Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens

Massenverteilung: Getrimmte Massenverteilung



Eigenform	Original skaliert	Modell	Abweichung
1. Biegung	30,15 Hz	31,40 Hz	+4,1%
2. Biegung	95,68 Hz	94,64 Hz	-1,1%

- Im äußeren Flügelbereich werden Trimm Massen hinzugefügt bis Frequenzen übereinstimmen
 - Frequenzähnlichkeit wird durch 3,34 kg an Trimm Massen erreicht
 - Gesamtmasse erhöht sich um 3,5 % auf 99,68 kg
- Für Ähnlichkeit der Eigenfrequenzen sind Trimm Massen notwendig



Zusammenfassung

- Vollständige und simultane Ähnlichkeit der Reynoldszahl, Machzahl, aeroelastischen Cauchyzahl und des relativen Dichteverhältnis wurde erreicht
- Für die Ähnlichkeit der reduzierten Frequenzen sind Trimm Massen notwendig, führen zur Abweichung vom relativen Dichteverhältnis und der Massenverteilung
- Die Konstruktionsweise der tragenden Häute und die getesteten Materialien waren nicht in der Lage ein real umsetzbares aeroelastisch ähnliches Modell für den ETW zu erzeugen
- Die größten Herausforderungen waren die notwendigen hohen Hautdicken, hohen Dehnungen und großen Zusatzmassen

Ausblick:

- Diese Arbeit zeigt Potential für die Umsetzbarkeit eines aeroelastisch ähnlichen Halbmodells
- Ein solches Modell befindet sich sehr nahe an der Grenze des technisch Machbaren



Fragen und Feedback

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

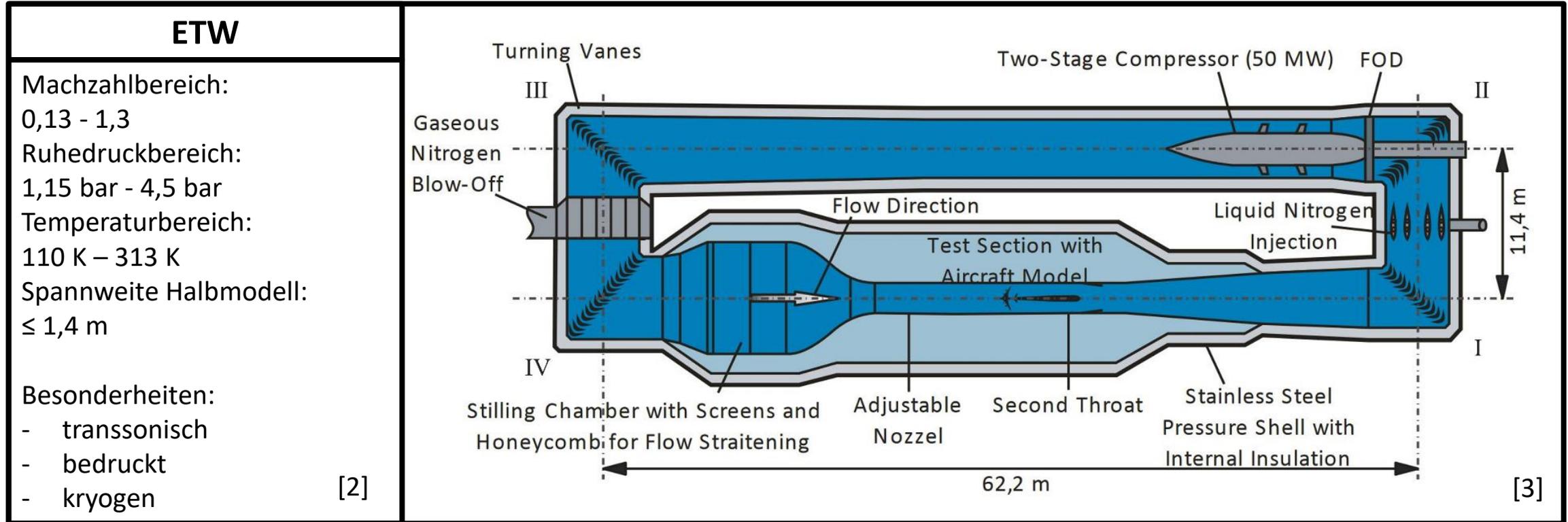


Quellen:

- [1] Thomas Klimmek. „Statische aeroelastische Anforderungen beim multidisziplinären Strukturentwurf von Verkehrsflugzeugflügeln“. Diss. Braunschweig: Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2015.
- [2] John Green und Jürgen Quest. „A Short History of the European Transonic Wind Tunnel ETW“. In: Progress in Aerospace Sciences 47.5 (Juli 2011), S. 319–368. issn:03760421. doi:10.1016/j.paerosci.2011.06.002.
- [3] European Transonic Windtunnel GmbH. ETW - Pushes the Limits. Broschüre. Köln, 2022, URL: https://www.etw.de/uploads/pdfs/ETW_Information_E.pdf
- [4] Johannes Dillinger u. a. „Structural Optimization of an Aeroelastic Wind Tunnel Model for Unsteady Transonic Testing“. In: CEAS Aeronautical Journal 13.4 (Okt. 2022), S. 951–965. issn: 1869-5582, 1869-5590. doi: 10.1007/s13272-022-00612-3.



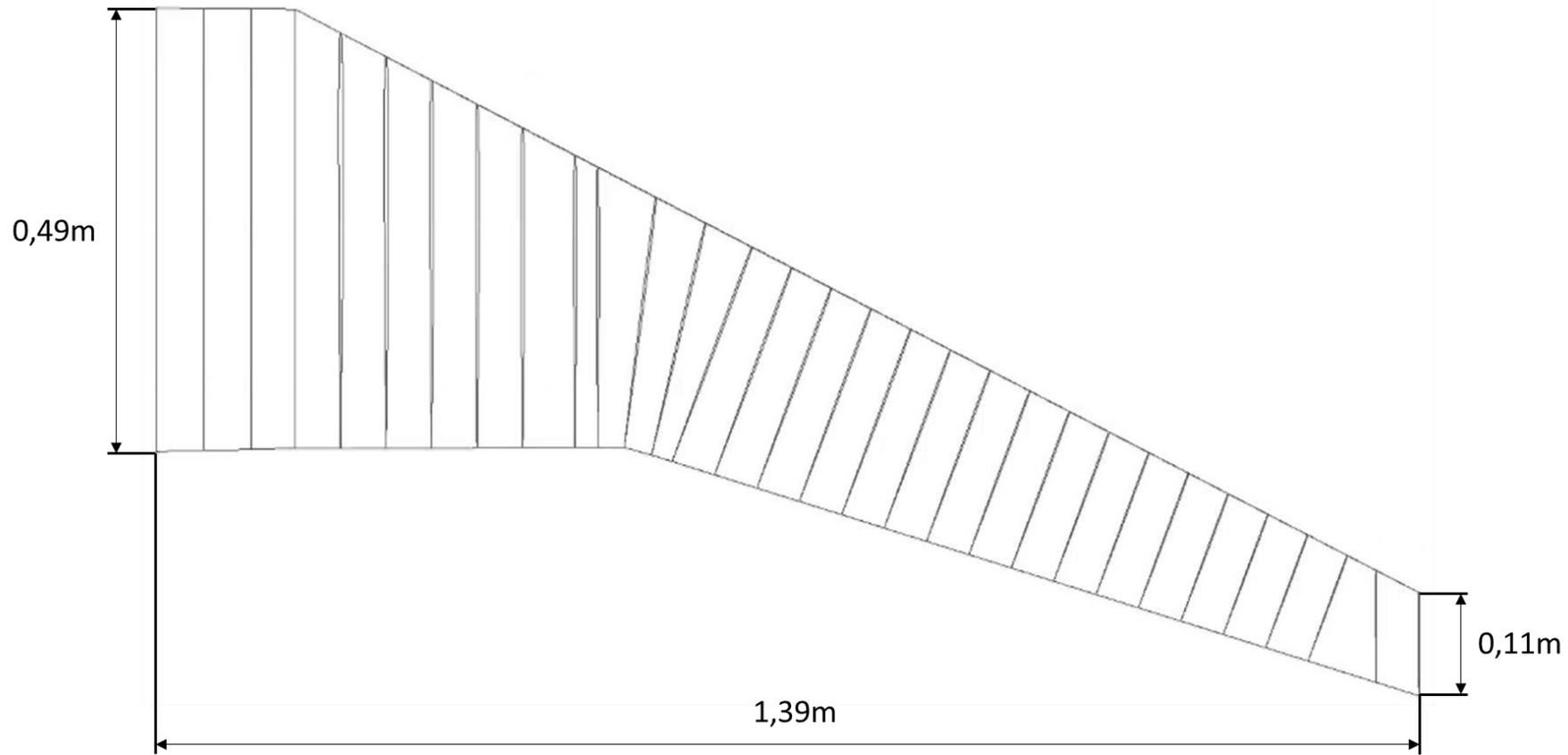
Entwurfspunkt



➤ Maximale möglicher Maßstab: $16,96\text{m}/1,4\text{m} \approx \mathbf{12,2}$



Modellgeometrie



Lagenaufbau

Tabelle 4.1.: Dicke und Lagenaufbau der Designfelder der Glasfasermodells

	Designfeld 1	Designfeld 2	Designfeld 3
Hautdicke	20,2 mm	9,4 mm	6,6 mm
Gesamtdicke 0°-Schichten	17,2, mm	6,4 mm	3,6 mm
Gesamtdicke 90°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
Gesamtdicke +45°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
Gesamtdicke -45°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm

Tabelle 4.3.: Dicke und Lagenaufbau der Designfelder der Kohlefasermodells

	Designfeld 1	Designfeld 2	Designfeld 3
Hautdicke	10,0 mm	3,8 mm	4,2 mm
Gesamtdicke 0°-Schichten	7,0, mm	1,6 mm	0,8 mm
Gesamtdicke 90°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	0,6 mm
Gesamtdicke +45°-Schichten	1,0 mm	0,6 mm	1,4 mm
Gesamtdicke -45°-Schichten	1,0 mm	0,6 mm	1,4 mm

Tabelle 4.5.: Dicke und Lagenaufbau der Designfelder der Aramidfasermodells

	Designfeld 1	Designfeld 2	Designfeld 3
Hautdicke	16,4 mm	6,6 mm	5,2 mm
Gesamtdicke 0°-Schichten	13,4, mm	3,6 mm	2,2 mm
Gesamtdicke 90°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
Gesamtdicke +45°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
Gesamtdicke -45°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm



Modell mit fünf Designfeldern

Tabelle 4.6.: Dicke und Lagenaufbau der Designfelder der Glasfasermodells mit fünf Designfeldern

	Designfeld 1	Designfeld 2	Designfeld 3	Designfeld 4	Designfeld 5
Hautdicke	18,2 mm	11,0 mm	7,0 mm	7,0 mm	3,8 mm
Gesamtdicke 0°-Schichten	16,0, mm	4,0 mm	4,0 mm	4,0 mm	3,4 mm
Gesamtdicke 90°-Schichten	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	0,4 mm
Gesamtdicke +45°-Schichten	0,6 mm	3,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	0,0 mm
Gesamtdicke -45°-Schichten	0,6 mm	3,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	0,0 mm

Tabelle 4.7.: Eigenfrequenzen der Glasfasermodells mit fünf Designfeldern für verschiedene Massenkonfigurationen

Eigenform	Nur Strukturmasse	Skalierte Originalmasse	Verschmierte Originalmasse	Getrimmte Zusatzmassen	Maximale Zusatzmassen
1. Biegung	65,74 Hz	45,55 Hz	43,66 Hz	31,40 Hz	29,84 Hz
2. Biegung	170,68 Hz	111,34 Hz	109,33 Hz	94,64 Hz	89,11 Hz



Motivation und Ziel

Aeroelastische Ähnlichkeit:

1. Ähnlichkeit der Strömungsbedingungen
 - Entscheidende Kennzahlen: Reynoldszahl und Machzahl

Machzahl

$$Ma = \frac{V_\infty}{a}$$

Reynoldszahl

$$Re = \frac{V_\infty l \rho_{1u}}{\eta}$$

V_∞ Anströmgeschwindigkeit

a Schallgeschwindigkeit

l charakteristische Länge

ρ_{1u} Luftdichte

η dynamische Zähigkeit

- Transsonische Anströmgeschwindigkeiten, möglichst großes Modell, hohe Ruhedrucke und/oder tiefe Temperaturen notwendig



Motivation und Ziel

Aeroelastische Ähnlichkeit:

2. Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens
 - Entscheidende Kennzahl: aeroelastische Cauchyzahl

aeroelastische Cauchyzahl

$$Ca_{ae} = \frac{V_{\infty}^2 \cdot \rho_{lu}}{E}$$

elastomechanische Cauchyzahl

$$Ca_{el} = \frac{l^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho_{st}}{E}$$

V_{∞} Anströmgeschwindigkeit

ρ_{lu} Luftdichte

E Elastizitätsmodul

l charakteristische Länge

ρ_{st} Strukturdichte

ω Kreisfrequenz

- Große Steifigkeit notwendig



Motivation und Ziel

Aeroelastische Ähnlichkeit:

3. Ähnlichkeit des dynamischen Schwingungsverhaltens
 - Entscheidende Kennzahlen: relatives Dichteverhältnis und reduzierte Frequenz

relatives Dichteverhältnis

$$\mu = \frac{\rho_{st}}{\rho_{lu}}$$

reduzierte Frequenz

$$\omega^* = \omega \cdot \frac{l}{V_\infty}$$

V_∞ Anströmgeschwindigkeit

l charakteristische Länge

ρ_{lu} Luftdichte

ρ_{st} Strukturdichte

ω Kreisfrequenz

- Große Masse und höhere Eigenfrequenzen notwendig

Anmerkung: Vollständige dynamische Ähnlichkeit benötigt auch die Ähnlichkeit der Strukturdämpfung und der elastomechanischen Cauchyzahl



Vorstudie

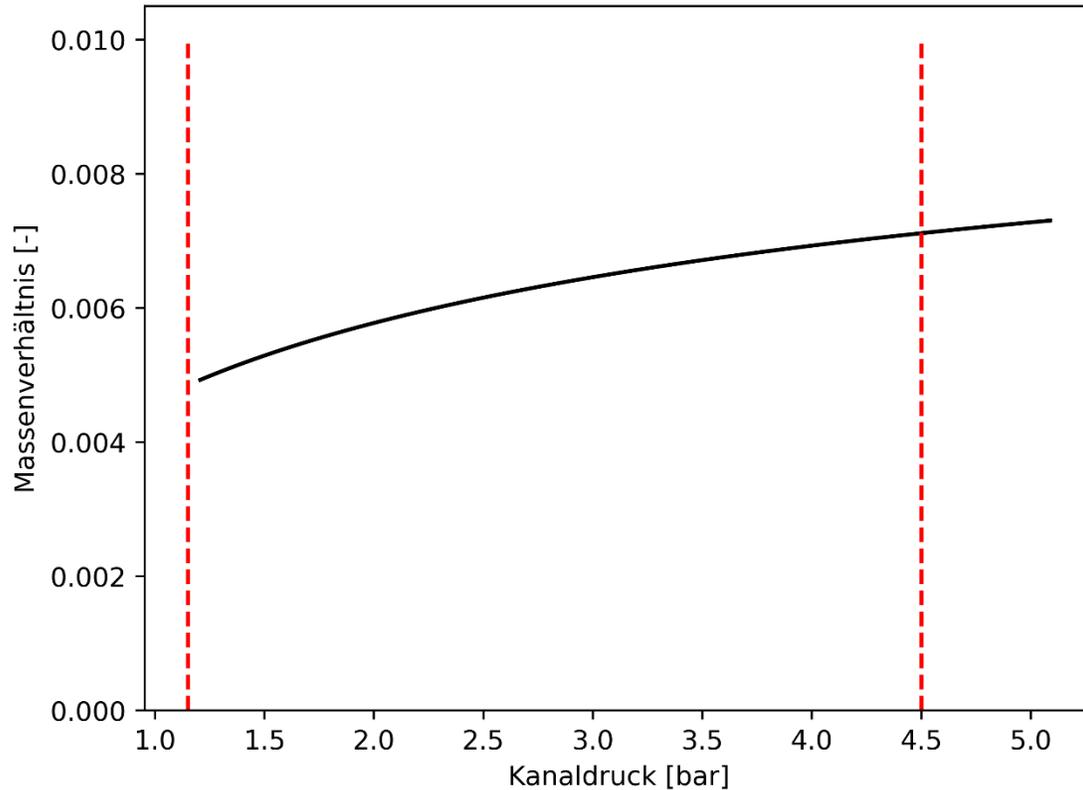
Entwurfspunkt:

Parameter	Original	Verhältnis	Modell
Temperatur	223 K	0,538	120 K
Ruhedruck	26,4 kPa	5,205	137,4 kPa
Luftdichte	0,413 kg/m ³	9,34	3,857 kg/m ³
Anströmgeschwindigkeit	245,6 m/s	0,746	183,1 m/s
Halbspannweite	16,96 m	12,2	1,39 m
Flügelfläche	61,15 m ²	6,704*10 ⁻³	0,41 m ²
Flügelmasse	18730 kg	5,144*10 ⁻³	96,34 kg
Staudruck	12456 Pa	5,191	64661 Pa
Auftrieb bei $C_L=0,5$	380,8 kN	0,0328	12,5kN
1. Biegung	2,718 Hz	11,092	30,15 Hz



Vorstudie

Notwendiges Massenverhältnis für Ähnlichkeit der relativen Dichte

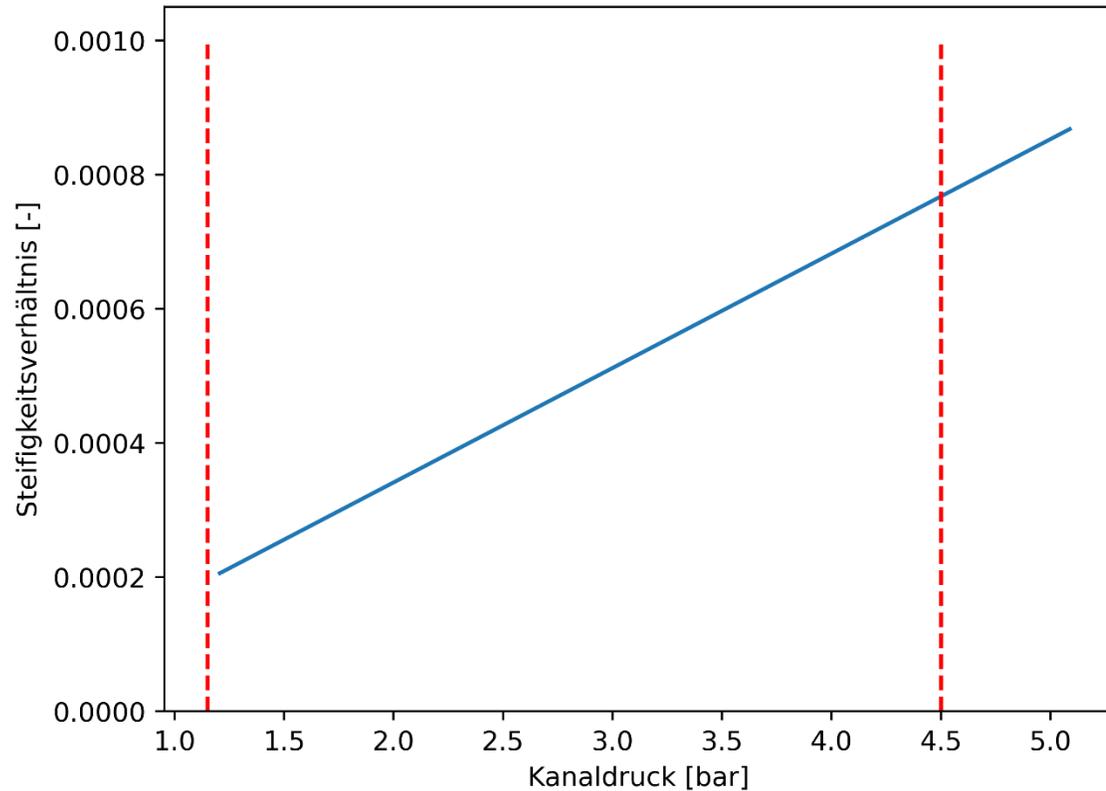


- Leitet sich aus Bedingung der gleichbleibenden relativen Dichte ab
 - Massenverhältnis nimmt mit Kanaldruck ab
 - Möglichst niedrigen Kanaldruck bzw. niedrige Kanaltemperatur wählen, um Modellmasse klein zu halten
- Entwurfspunkt bei 120 K und 1,374 bar



Vorstudie

Notwendiges Steifigkeitsverhältnis für
Ähnlichkeit der aeroelastischen Cauchyzahl:



Aeroelastischen Cauchyzahl: $Ca_{ae} = \frac{V^2 \rho_{lu}}{E}$

Steifigkeitsverhältnis: $\frac{EI_{Mo}}{EI_{Or}} = \frac{\rho_0 V_{\infty Mo}^2}{\rho_{10km} \cdot V_{\infty Or}^2} \cdot \frac{1}{N^4}$

- Steifigkeitsverhältnis und Staudruck sind linear von Kanaldruck abhängig

⇒ Kein Optimum erkennbar



European Transonic Windtunnel

Modellmontierung:



Grundsätzliches:

- 1993 in Köln eröffnet
- Transsonischer kryogener hochreynolds Windkanal

Technische Daten:

- Machzahlbereich: 0,13 - 1,3
- Ruhedruckbereich: 1,15 bar - 4,5 bar
- Temperaturbereich: 110 K – 313 K

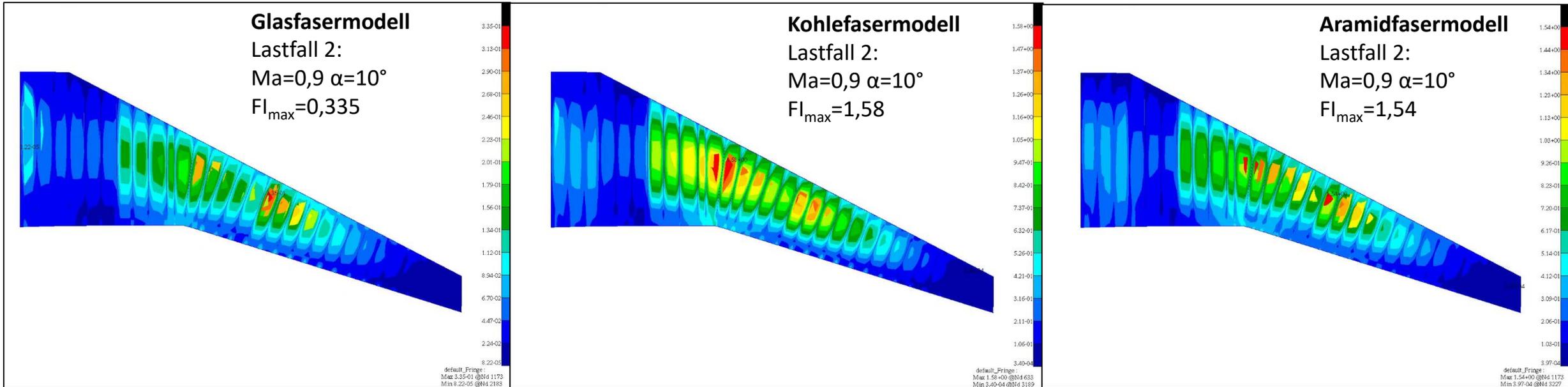
Maximale Spannweite:

- Halbmodelle: 1,4 m
- Vollmodelle: 1,56 m



Ähnlichkeit des statischen Strukturverhaltens

Festigkeit



– Maximaler Versagensindex von 0,335

➤ Kein Versagen

– Maximaler Versagensindex von 1,58

– Kohlefaser besitzt zu geringes ϵ_c

➤ Modell versagt

– Maximaler Versagensindex von 1,54

– Aramidfaser besitzt zu geringes ϵ_c

➤ Modell versagt



Materialien

Tabelle 3.5.: Materialeigenschaften der unidirektionalen Schichten der verwendeten Faserverbunde

Material	E_{11}	E_{22}	G_{12}	ν_{12}	ρ	ϵ_t	ϵ_c	γ_s
CFK	155 GPa	8,5 GPa	3,5 GPa	0,3	1500 kg/m ³	1,075 %	0,323 %	1,351 %
GFK	41,76 GPa	12,94 GPa	4,96 GPa	0,2637	1976,3 kg/m ³	3 %	2 %	2 %
AFK	75 GPa	6 GPa	2 GPa	0,3	1400 kg/m ³	1,7 %	0,35 %	3 %

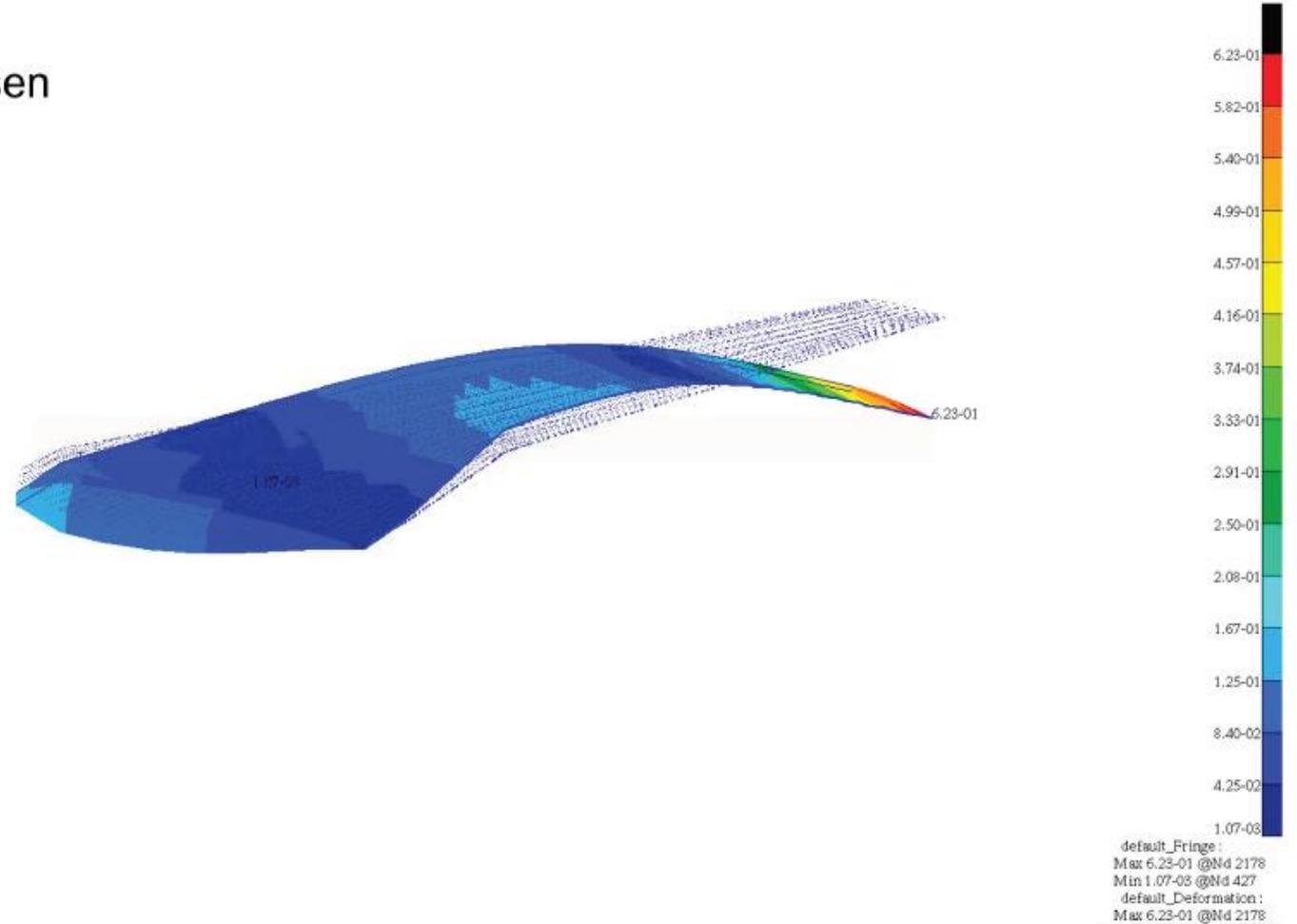
Tabelle 3.6.: Materialeigenschaften des Schaumkerns

E	G_{12}	ν_{12}	ρ
92 MPa	29 MPa	0,2637	75 kg/m ³



Eigenformen Glasfasermodell 1.Biegung

Modell: Glasfaser
Massenkonfiguration: Getrimmte Zusatzmassen
1. Biegung: 31,69Hz

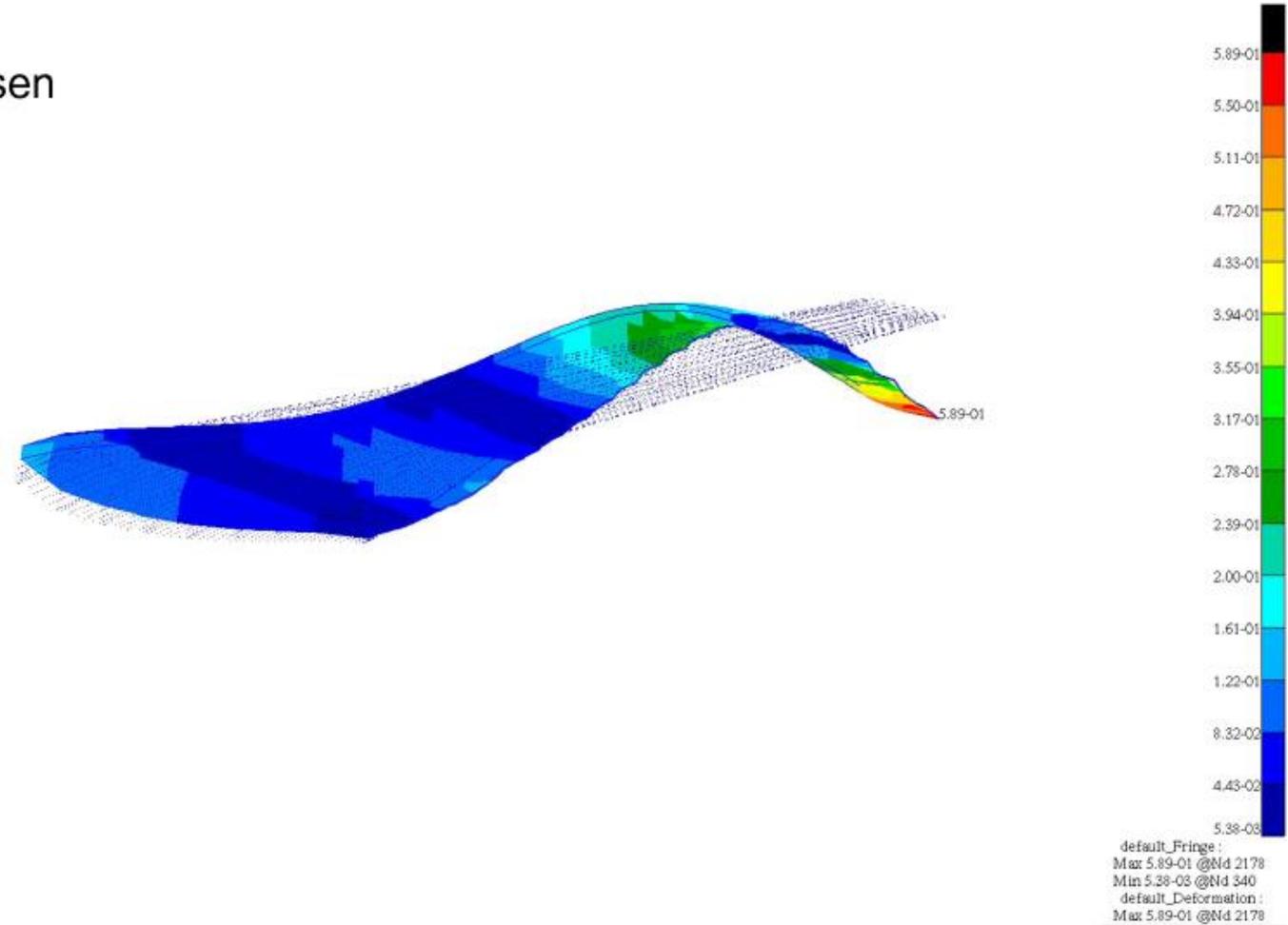


Eigenformen Glasfasermodell 2.Biegung

Modell: Glasfaser

Massenkonfiguration: Getrimmte Zusatzmassen

2. Biegung: 73,39Hz

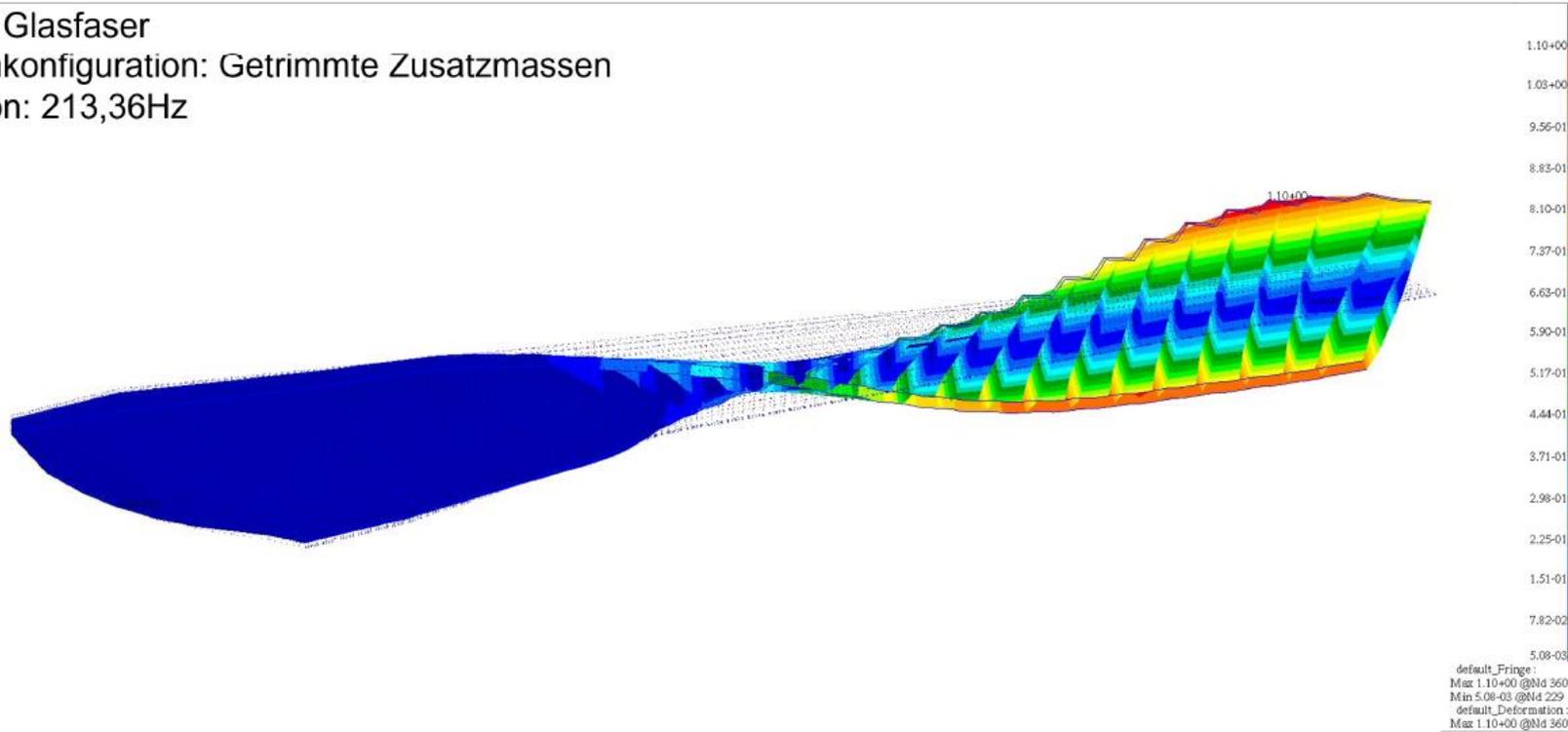


Eigenformen Glasfasermodell 1.Torsion

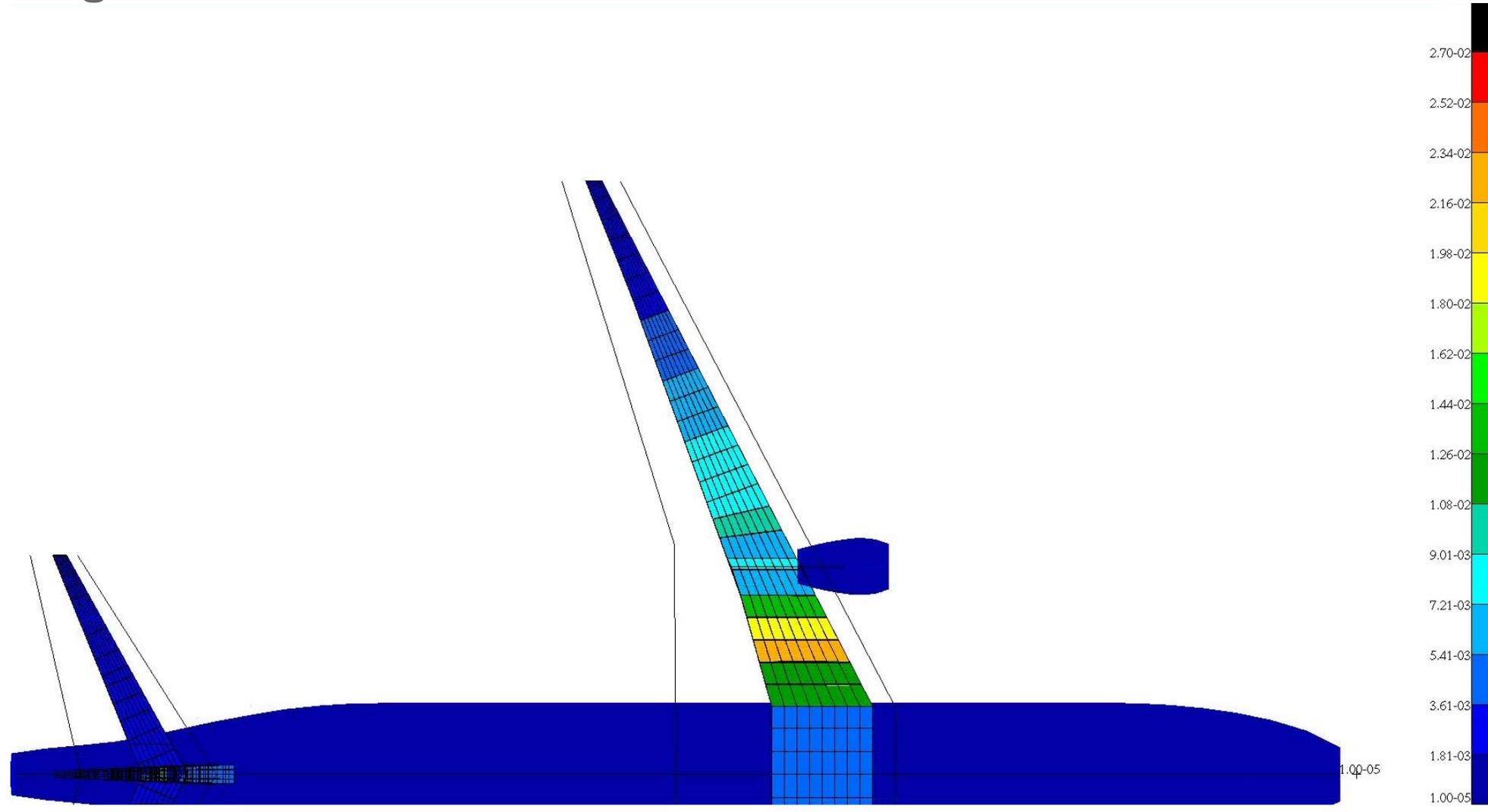
Modell: Glasfaser

Massenkonfiguration: Getrimmte Zusatzmassen

1.Torsion: 213,36Hz

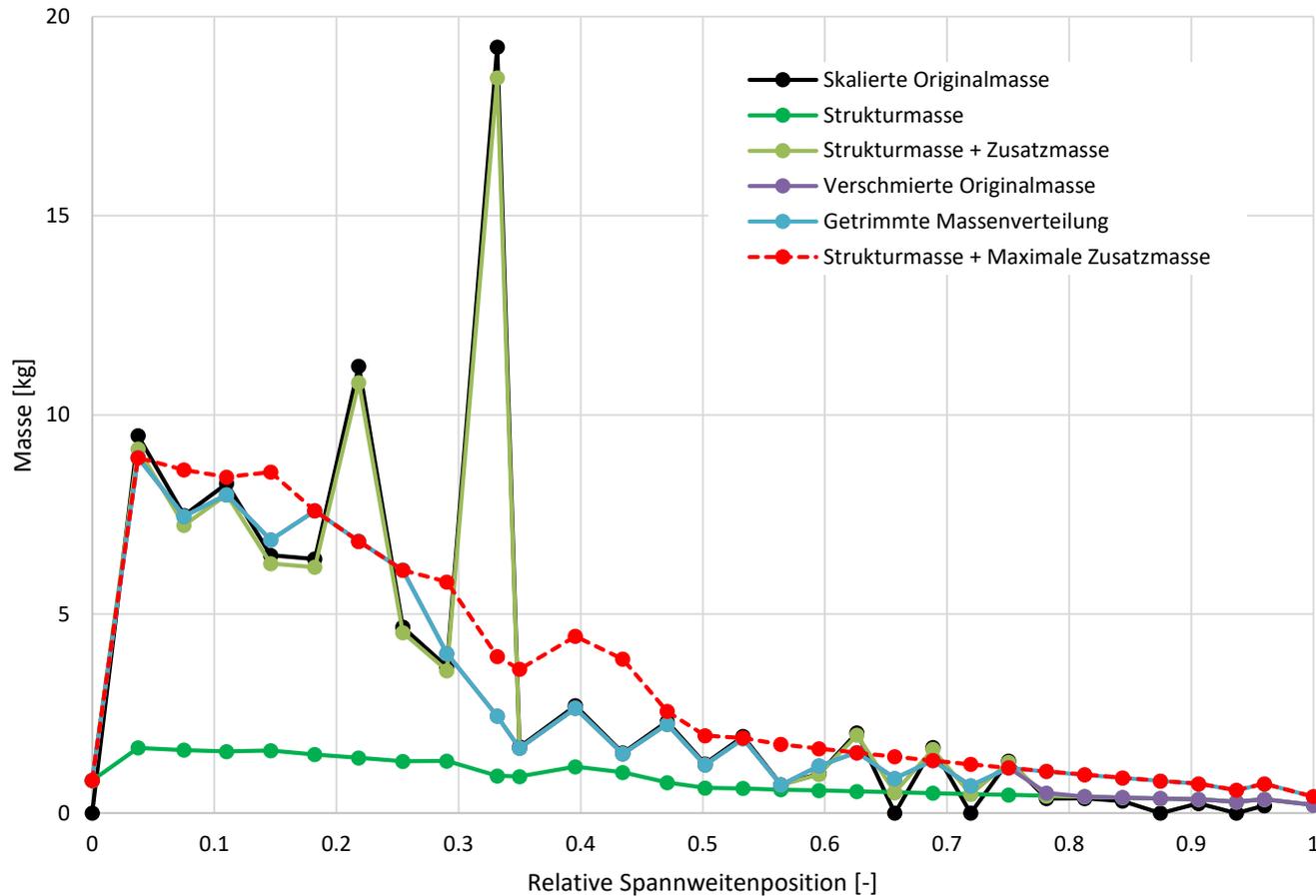


Originalmodell Hautdicken



Ähnlichkeit des Schwingungsverhaltens

Massenverteilung: Strukturmasse ohne Zusatzmassen



Eigenform	Original skaliert	Modell	Abweichung g
1. Biegung	30,15 Hz	65,74 Hz	+118%
2. Biegung	95,68 Hz	170,68 Hz	+78,4%

- Bei Strukturmasse von 25,11 kg ergeben sich deutlich zu hohe Eigenfrequenzen
- Skalierte Originalmasse von 96,34 kg muss im Modell nachgebildet werden
- Hohe Zusatzmassen notwendig

