

Gewichtsabschätzungen von geklebten und geschweißten Strukturverbindungen im Flugzeugvorentwurf

L. Beilstein^a, K. Drechsler^a, S. Rudolph^b

^aInstitut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland

^bInstitut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 27, 70569 Stuttgart, Deutschland

Kurzfassung

Eine präzise Gewichtsprognose ist bereits in der Flugzeugvorentwurfsphase von essentieller Bedeutung, weshalb empirische Ansätze nicht mehr als alleinige Herangehensweise genutzt werden. Diese Arbeit leistet durch die Entwicklung von analytischen bzw. dimensionslosen Gewichtsfunktionalen für Strukturverbindungen einen Beitrag zu einer detaillierteren und damit präziseren Gewichtsrechnung. Hierfür werden für typische Strukturverbindungen unter Einbeziehung verschiedener Fügeverfahren (Nieten, Kleben, Schweißen) analytische Gewichtsabschätzformeln hergeleitet, wobei zunächst der klassische Strukturkennwert als dimensionsbehaftete Kenngröße Verwendung findet. Der Grundgedanke eine struktureometrische Ähnlichkeitskennzahl zur Bewertung von Konstruktionen zu nutzen wird durch die Anwendung des Pi-Theorems von Buckingham zur Generierung dimensionsloser Kennzahlen konsequent weiterentwickelt und führt in der Folge auf eine gewichtsminimale Optimalfunktion der Verbindungen.

1. Nomenklatur

Formelzeichen		
Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Dicke der Schweißnaht	m
A	Querschnittsfläche	m ²
b	Breite	m
C_{LA}	Relativer Lochabstand	1
C_{LD}	Relativer Lochdurchmesser	1
E	Elastizitätsmodul	N/m ²
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
G	Gewicht	N
G	Schubmodul	N/m ²
j	Sicherheitsfaktor	1
$K = F/b l$	Strukturkennwert	N/m ²
$\tilde{K} = F/b l^2$	angepasster Strukturkennwert	N/m ³
l	Länge	m
m	Masse	kg
n_x	Anzahl der Nietreihen	1
R_m	Streckgrenze	N/m ²
s	Klebschichtdicke	m
t	Dicke	m
V	Volumen	m ³
α	Korrekturfaktor	1
η	Wirkungsgrad	1
π, Π	dimensionslose Kennzahl	1
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Spannung	N/m ²
τ	Schubspannung	N/m ²

Indizes

Symbol	Beschreibung
1, 2	Blech 1, Blech 2
ges	gesamt
i, j	Zählvariablen
K	Kleben
max	maximal
min	minimal
N	Nieten
R	Referenzblech
S	Schweißen
Ü	Überlappung
zul	zulässig

2. Einleitung

Die aktuell geführte Klimadebatte und die steigenden Kraftstoffpreise verlangen von den Flugzeugherstellern immer effizientere Flugzeuge. Ein wichtiger Aspekt zur Leistungssteigerung stellt die Reduzierung des Gesamtgewichts eines Luftfahrtgeräts dar. Eine genaue Vorhersage des Strukturgewichts ist deshalb für die Entscheidungen, die im Flugzeugvorentwurf zu treffen sind, von elementarer Bedeutung.

Für das gesamte Strukturgewicht beziehungsweise für das Gewicht einzelner Baugruppen existieren in der Literatur ([4], [5], [11]) Verfahren auf Basis von Methoden der mathematischen Statistik. Die in [1] diskutierten Nachteile fordern eine Ergänzung dieser Ansätze durch analytische und/oder numerische Verfahren und die Trennung des Gewichts in das „Optimum“- und das „Non-Optimum-Weight“. Das „Non-Optimum-Weight“ der „Joints“ verursacht einen Gewichtsanstieg zwischen 20 und 40 Prozent [10] gegenüber dem minimal möglichen Strukturgewicht.

Die Methodik zur Erstellung von gewichtsminimalen analytischen Funktionen für Verbindungselemente wurde in [1] bereits für eine ungestörte Vergleichsstruktur und eine vernietete Überlappingsverbindung beschrieben. Dieser Ansatz wird hier in dieser Arbeit auf weitere Fügeverfahren (Kleben, Schweißen) angewandt und erweitert.

3. Analytische Gewichtsfunktionale

Ausgehend von der geometrischen Gewichtsgleichung und der Einführung der zulässigen Spannung mittels der Designvariablen wird eine Gleichung, welche das minimale Gewicht repräsentiert, aufgestellt. Die Einführung des dimensionsbehafteten Strukturkennwerts [12] entkoppelt diese Gewichtsgleichung von den Geometrieparametern. Dieser sogenannte „Design-Ansatz“ zur Bestimmung gewichtsminimaler Kurven ermöglicht gewichtliche Vergleiche zwischen unterschiedlichen Strukturen, Fügeverfahren und Materialien und führt zur Festlegung einer optimalen Konstruktion aus Sicht des minimalen Gewichtsaspekts.

Eine ungestörte Struktur, wie in Bild 1 dargestellt, repräsentiert den trivialsten Fall zur Erstellung eines Gewichtsfunktional und wird im Weiteren als gewichtliche Referenz genutzt.

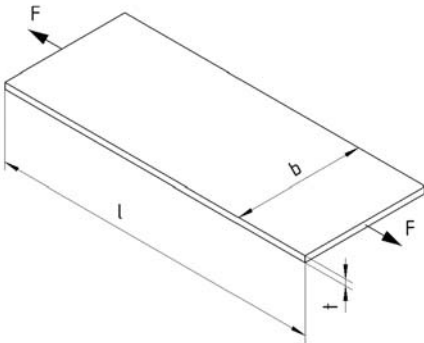


Bild 1: Referenzblech [1]

Für einen beliebigen Körper, der auch aus verschiedenen Einzelbauteilen zusammengesetzt sein kann, gilt als allgemeine Grundgleichung für das Gewicht

$$G = g m = g \sum_i \rho_i V_i. \quad (1)$$

Mittels der geometrischen Parameter l, b, t , der zulässigen Bruchspannung $\sigma_{zul} = F/b t \leq R_m/j_{R,ges}$ und der Definition des Strukturkennwerts $K = F/b l$ ergibt sich aus Gleichung (1) die Gewichtsfunktion für das Referenzblech [1].

$$\frac{G_{R,min}}{g b l^2} = \frac{\rho j_{R,ges}}{R_m} K \quad (2)$$

Eine typische Längsnaht des Flugzeugrumpfs stellt sich als mehrreihige genietete Überlappingsverbindung dar. Das Gewichtsfunktional für eine Überlappingsnietung bei gleichen Werkstoffen für die Bleche und die Niete lautet [1]:

$$\begin{aligned} \frac{G_{N,\ddot{U}1s,min}}{g b l^2} = & \frac{1}{2} j_{N,ges} \left(\frac{8 C_{LA} C_{LD} j_{N,ges} \rho}{\eta^2 C_{LA} R_m^2} \right. \\ & + \frac{2 C_{LA}^2 C_{LD} j_{N,ges} \rho (n_x - 1)}{\eta^2 C_{LA} R_m^2} \\ & \left. + \frac{\pi C_{LD} j_{N,ges} n_x \rho (\alpha - 1)}{\eta^2 C_{LA} R_m^2} \right) K^2 + \frac{j_{N,ges} \rho}{\eta R_m} K \quad (3) \end{aligned}$$

3.1. Überlappungsklebung

Für einen theoretischen Gewichtsvergleich wird das Gewichtsfunktional für eine einschnittige Überlappungsklebung (siehe Bild 2) unter Zugbelastung entwickelt. Biegeeffekte werden vernachlässigt, wie das bereits bei den Nietverbindungen angenommen wurde.

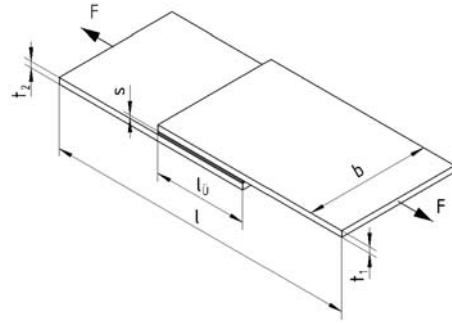


Bild 2: Einschnittige Überlappungsklebung

Nachfolgend ist die auf geometrischen Variablen beruhende Gewichtsgleichung dargestellt.

$$G_{K,\ddot{U}1s} = g \left(\frac{b}{2} (l_{\ddot{U}} + l) (\rho_1 t_1 + \rho_2 t_2) + b l_{\ddot{U}} s \rho_K \right) \quad (4)$$

Zur Vereinfachung wird die Annahme getroffen, dass für beide Bleche der gleiche Werkstoff verwendet wird.

$$\rho_1 = \rho_2 := \rho \quad (5)$$

$$R_{m1} = R_{m2} := R_m \quad (6)$$

Weiterhin ist das Gewicht der Klebschicht vernachlässigbar, es gelte also

$$G_K = b l_{\ddot{U}} s \rho_K = 0. \quad (7)$$

Aufgrund der Notwendigkeit die analytischen Gleichungen als Grundlage für die dimensionsanalytische Betrachtung zu

verwenden, muss eine bestimmte Form zugrunde liegen. Das Gewicht der Klebung führt zu einem zusätzlichen Summand in der analytischen Gleichung, was die Findung von dimensionslosen Kennzahlen nicht zufriedenstellend gewährleisten würde.

Mit Gleichung (7) vereinfacht sich die geometrische Gewichtsgleichung (4) für eine einschnittige Überlappungsklebung zu

$$G_{K,\dot{U}1s} = g b t \rho (l_{\dot{U}} + l). \quad (8)$$

Zur Berechnung des Verhaltens von Klebverbindungen unter mechanischer Belastung wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt. Für den Vorentwurf ist es ausreichend eindimensionale Modelle heranzuziehen, bei denen die Spannungen in den Fügeteilen und in der Klebschicht jeweils nur in Längsrichtung variieren.

Volkerson [2] modellierte eine Nietverbindung, indem er die Niete als homogene Zwischenschicht betrachtete, was direkt auf Klebverbindungen unter Zugscherbeanspruchung übertragen werden kann. Eine analytische Behandlung von geklebten Verbindungen unter den vorliegenden Randbedingungen bezüglich der Dimensionsanalyse kann nicht mit der Volkerson-Gleichung durchgeführt werden. Der Ansatz eines konstanten Schubspannungsverlaufs ist untauglich, da für die Auslegung der Spitzenwert der inneren Schubspannungsverteilung maßgebend ist, so dass ein Ansatz nach [12] genutzt wird, bei dem mit der Wirkungslänge die Überlappungslänge definiert wird.

Bei einer kurzen Überlappungslänge bilden sich hohe Kleberschubspannungsspitzen aus. Bei einer größeren Überlappungslänge ergibt sich eine ungleichförmige Verteilung mit weniger hohen Schubspannungsspitzen (siehe Bild 3). Die Schubspannungsspitze $\tau_{K,max}$ sollte möglichst klein sein, da diese für die Festigkeit ausschlaggebend ist. Diese Spitze lässt sich jedoch für Überlappungslängen, die größer sind als die Wirkungslänge, nicht weiter reduzieren. Es verlängert sich der schubspannungsfreie mittlere Teil und die Kraft wird nur noch an den Enden der Verbindung übertragen.

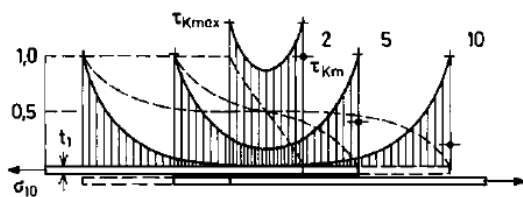


Bild 3: Schubspannungsverteilungen nach [12]

Für gleiche Steifigkeit der zu verbindenden Bleche lautet das Verhältnis der Schubspannungen nach Wiedemann [12]

$$\frac{\tau_{K,max}}{\tau_{K,m}} = \frac{\theta}{2} \coth \frac{\theta}{2}, \quad (9)$$

wobei θ eine durch die Klebung bestimmte Kennzahl darstellt. Bei steigender Kennzahl geht die hyperbolische Funktion gegen eins, jedoch kann laut Wiedemann [12] bereits ab

$\theta > \theta^* = 5$ mit einem von der Überlappungslänge unabhängigen Wert der Spannungsspitze gerechnet werden. Die Wirkungslänge unter Einbeziehung obiger Definition der Kennzahl θ lautet:

$$l^* = \theta^* \sqrt{\frac{s}{2 G_K}} E t = 5 \sqrt{\frac{s}{2 G_K}} E t \quad (10)$$

Diese Wirkungslänge wird nun als Überlappungslänge für die Ableitung der analytischen Gewichtsfunktionale genutzt.

Die Blechdicke wird aus der Zugfestigkeit der Bleche berechnet. Zur Entkopplung der Gleichung von der Geometrie wird der Strukturkennwert als Kennzahl herangezogen, wobei aufgrund der Wurzel in Gleichung (10) die Länge des betrachteten Bauteils quadratisch in die Definition eingehen muss und demnach der von Wiedemann definierte Strukturkennwert angesetzt für das Referenzblech und die Nietverbindung angepasst wird, um geometrisch unabhängige Gewichtsfunktionale für Klebverbindungen zu erhalten. Mit dem neu definierten angepassten Strukturkennwert $\tilde{K} = F/(b l^2)$, Gleichung (10) als Überlappungslänge und der geometrischen Gewichtsgleichung (8) ergibt sich das Gewichtsfunktional für eine einschnittige Überlappungsklebung.

$$\frac{G_{K,\dot{U}1s,min}}{g b l^3} = \frac{1}{2} \frac{\rho \tilde{K} j_{K,ges}}{R_m^2} \left(2 R_m + 5 \sqrt{2} \sqrt{\frac{s E \tilde{K} R_m j_{K,ges}}{G_K}} \right) \quad (11)$$

Einflussgrößen sind neben dem Strukturkennwert der Schubmodul und die Schichtdicke des Klebstoffs sowie der Werkstoff der Fügeteile mit der Zugfestigkeit und dem Elastizitätsmodul. Nachfolgend sind beispielhaft Abhängigkeiten in Diagrammform dargestellt.

In Bild 4 (a) ist der Schubmodul der Klebstoffe variiert. Ein steigender Schubmodul macht sich in einem verminderten Strukturgewicht bemerkbar. Je größer der Schubmodul, desto kleiner wird nach Gleichung (11) das Strukturgewicht, begründet durch eine sinkende Wirkungslänge. Die Zahlenwerte der in Bild 4 bezeichneten Schubmoduli der Klebstoffe sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Bezeichnung	Eigenschaften	Schubmodul G_K in N/mm ²
Schubmodul 1	warmaushärtend	1000
Schubmodul 2	warmaushärtend	1500
Schubmodul 3	kaltaushärtend	500

Tabelle 1: Schubmoduli verschiedener Klebstoffe nach Habenicht [2]

Bild 4 (b) zeigt das Gewichtsfunktional für verschiedene Dicken der Klebeschicht. Bei kleinen Werten des Strukturkennwerts $\tilde{K}$ ist kein Einfluss der Schichtdicke auf das Gewicht zu erkennen, während bei höheren Werten bei einer steigenden Schichtdicke eine Zunahme des Strukturgewichts zu beobachten ist. Da Strukturklebstoffe meist verformungsarme

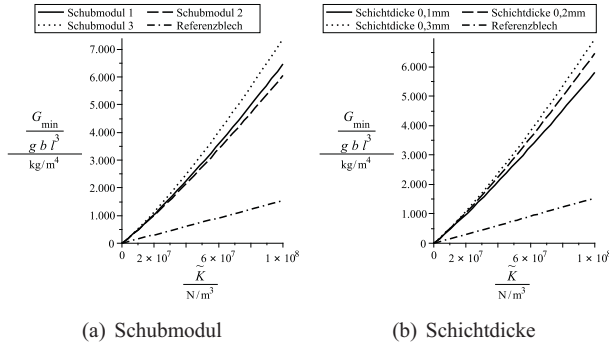


Bild 4: Gewichtsfunctionale für die einschnittige Überlappingsverbindung bei unterschiedlichen Schubmoduli (Material des Blechs: Aluminium, Klebstoffdicke 0,1mm) beziehungsweise Schichtdicken des Klebstoffs (Material des Blechs: Aluminium, Schubmodul 1)

Klebschichten ausbilden, sinkt die Festigkeit einer Klebung mit steigender Dicke der Klebefuge. Bei großen Klebschichtdicken ergeben sich zum Beispiel höhere Eigenspannungen in der Klebschicht durch Schwindung [2]. Bei zu kleinen Dicken ($s < 0,05\text{mm}$) haben die Rauheit der Fügestellen sowie eventuelle Benetzungsfehlstellen einen erheblichen Einfluss auf die Klebfestigkeit. In der Praxis hat sich als günstigste Klebschichtdicke der Bereich von 0,05 – 0,2mm erwiesen [2].

Vergleicht man für konstante Klebstoffkenngrößen die Einflüsse der Fügeteilwerkstoffe, so ist bei der Klebung eine Verbindung von Stahlbauteilen aufgrund der höheren Dichte schwerer als eine Aluminiumkonstruktion. Titan baut aufgrund des günstigsten Verhältnisses von Dichte zu Belastbarkeit am leichtesten (siehe Bild 5).

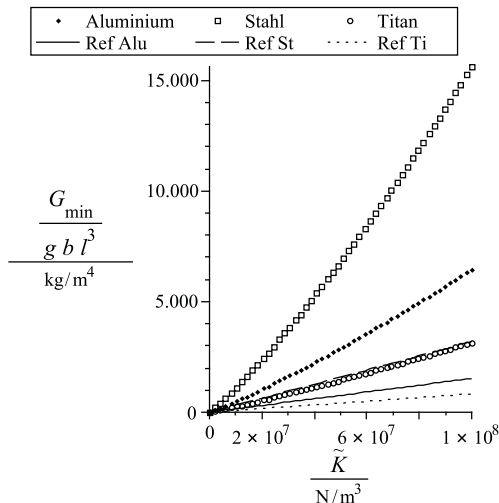


Bild 5: Gewichtsfunctionale für die einschnittige Überlappingsverbindung bei unterschiedlichen Werkstoffen der Fügeteile (Klebstoff: Schubmodul 1, Schichtdicke 0,2 mm) und das Referenzblech aus Bild 1

3.2. Geschweißter Stumpfstoß

Nachfolgend wird für eine Schweißverbindung, siehe Bild 6, die analytische Gewichtsgleichung hergeleitet.

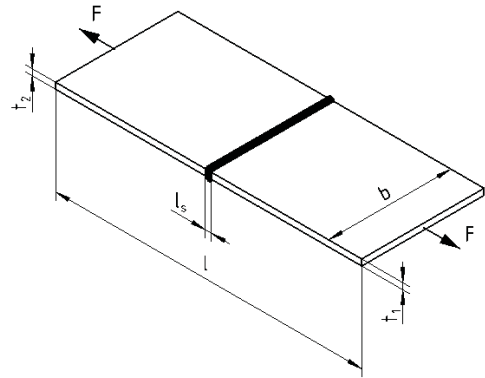


Bild 6: Geschweißter Stumpfstoß

Die verschiedenen Nahtformen (z.B. I-Naht, V-Naht, K-Naht), wie sie in der Literatur [6] beschrieben sind, werden im Weiteren nicht näher betrachtet, da die Auswirkungen auf das Gewicht vernachlässigbar sind. Mit der Grundgleichung (1) und den geometrischen Parametern ergibt sich die Basisgleichung für eine geschweißte Stumpfstoßverbindung.

$$G_{S.S} = g \left(\frac{b}{2} (l - l_s) (\rho_1 t_1 + \rho_2 t_2) + b l_s \alpha_s a \rho_s \right) \quad (12)$$

Der Parameter α_s ist ein Korrekturfaktor entsprechend dem Nietschaftlängenkorrekturfaktor bei vernieteten Verbindungen [1]. Mit diesem kann zum Beispiel eingebrachter Zusatzwerkstoff beziehungsweise eine Aufdickung der Schweißnaht berücksichtigt werden. Im Allgemeinen wird eine Schweißnaht jedoch nachbehandelt, deshalb kann dieser Faktor meist zu eins gesetzt werden, was für die weitere Herleitung angenommen wird.

Es werden ebenfalls vereinfachende Annahmen getroffen. Die Dichte der Schweißnaht ist gleich der des Blechwerkstoffs und die Werkstoffe der beiden Bleche sind gleich. Dies kann ohne weiteres angenommen werden, da mit den meisten Schweißverfahren nur gleichartige Werkstoffe gefügt werden können. Demnach gelten für eine Schweißverbindung die Gleichungen (5) und (6). Daraus folgt, dass beide Bleche die gleiche Dicke t haben, sofern der gleiche Widerstand gegen Zugbruch angesetzt wird. Daraus folgt nun die vereinfachte geometrische Gleichung für eine Stumpfstoßschweißverbindung.

$$G_{S.S} = g (b l \rho t) \quad (13)$$

Mit der zulässigen Bruchspannung $\sigma_{zul} = F/A_s = F/b t \leq R_m/j_{s.ges}$ eingesetzt in die geometrische Gewichtsgleichung (13) ergibt sich die Gewichtsgleichung (14) für einen geschweißten Stumpfstoß, der für verschiedene Materialien und dem Sicherheitsfaktor für Schweißverbindungen in Bild (7) dargestellt ist.

$$\frac{G_{S.S,min}}{g b l^2} = \frac{\rho j_{S.ges}}{R_m} K \quad (14)$$

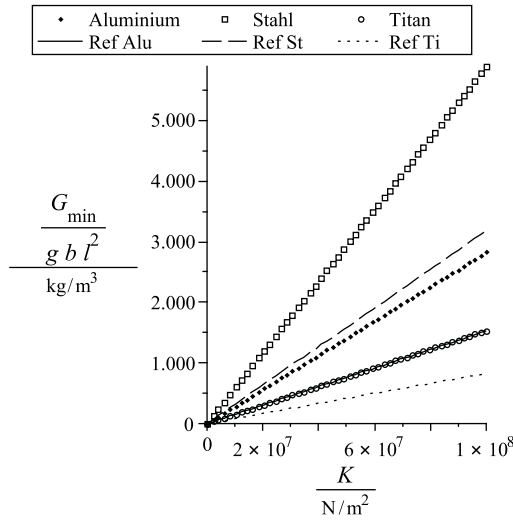


Bild 7: Geschweißter Stumpfstoß und Referenzblech aus Bild 1 bei unterschiedlichen Werkstoffen

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass ein gewichtlicher Vergleich auf Grundlage des Strukturkennwerts prinzipiell möglich ist. Allerdings bietet sich dieser Ansatz nicht als globale Bewertungsgrundlage für unterschiedliche Fügeverfahren an, da zur Entkopplung der analytischen Gleichungen von der äußeren Geometrie kein einheitlich definierter Strukturkennwert angesetzt werden kann. Deshalb stellt sich die Frage nach einer generell anwendbaren und objektiven Bewertungsgrundlage, was durch die dimensionslose Betrachtungsweise erreicht werden kann.

4. Dimensionslose Betrachtung

Im Gegensatz zu der in Kapitel 3 verwendeten Darstellungsform mittels des klassischen Strukturkennwerts können auf Basis der Kombination dimensionsloser Kennzahlen alle drei untersuchten Fügeverfahren gewichtlich verglichen und bewertet werden. Die mittels des Pi-Theorems nach Buckingham entwickelten dimensionslosen Größen bilden die Grundlage einer objektiven Bewertungsmethodik [7].

Das Pi-Theorem von Buckingham garantiert für jede dimensionshomogene und vollständige Funktion $f(x_1, \dots, x_n) = 0$ eine Funktion $F(\pi_1, \dots, \pi_m) = 0$ mit $m \leq n$ dimensionslosen Kennzahlen π_j [8].

Aus den analytischen Gewichtsgleichungen (2), (3) und den darin enthaltenen physikalischen Parametern können die Relevanzlisten und daraus die Dimensionsmatrizen gebildet werden [1]. Es entstehen $m = n - r$ dimensionslose Kennzahlen, wobei r den Rang der Dimensionsmatrix darstellt, die durch Multiplikation mehrerer π_j , was mathematisch betrachtet einer Projektion

gleichkommt, auf zwei physikalisch vorstellbare Kennzahlen reduziert werden, wobei die dritte Kenngröße Π_C die jeweiligen Eigenschaften des Fügeverfahrens (Nieten, Kleben) beschreibt und als diskreter Wert in die dimensionslose Gleichung eingeht.

4.1. Überlappungsklebung

Aus der physikalischen Dimensionsinformation der Relevanzliste $(G, F, b, s, G_K, E, l, g, R_m, \rho, j_{K.ges})$ der Gleichung (11), wobei der für Klebverbindungen definierte Strukturkennwert $\tilde{K}$ durch $F/(b l^2)$ ersetzt wurde, kann die Dimensionsmatrix (siehe Tabelle 2) aufgestellt werden.

V	M	L	T	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇
G	1	1	-2	1	0	0	0	0	0	0
F	1	1	-2	0	1	0	0	0	0	0
b	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
s	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
G_K	1	-1	-2	0	0	0	0	1	0	0
E	1	-1	-2	0	0	0	0	0	1	0
l	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
g	0	1	-2	2	2	1	1	0	0	1
R_m	1	-1	-2	-3	-3	-1	-1	-1	-1	-1
ρ	1	-3	0	2	2	1	1	0	0	1
$j_{K.ges}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 2: Dimensionsmatrix und resultierende Normalform der geklebten Überlappungsverbindung

Aus der Normalform der Dimensionsmatrix [8] resultieren hier $m = n - r = 8$ dimensionslose Kennzahlen.

$$\begin{aligned} \pi_1 &= j_{K.ges} & \pi_2 &= \frac{G g^2 \rho^2}{R_m^3} & \pi_3 &= \frac{F g^2 \rho^2}{R_m^3} & \pi_4 &= \frac{b g \rho}{R_m} \\ \pi_5 &= \frac{s g \rho}{R_m} & \pi_6 &= \frac{G_K}{R_m} & \pi_7 &= \frac{E}{R_m} & \pi_8 &= \frac{l g \rho}{R_m} \end{aligned}$$

Um durch die Einführung von dimensionslosen Kennzahlen eine globale Bewertungsgrundlage zu schaffen, müssen die in [1] definierten Kombinationen der π -Faktoren für das Referenzblech und die einschnittige Überlappungsverbindung ebenfalls für die Klebverbindung für Abszisse und Ordinate zur Darstellung in einem 2D-Diagramm verwendet werden, so dass

$$\Pi_A = \frac{G L_R}{F l} \quad \text{Klebung:} \quad \Pi_{A_K} = \frac{\pi_2}{\pi_3 \pi_8} \quad (15)$$

wobei die Reißlänge als $L_R = R_m/(\rho g)$ definiert ist.

$$\Pi_B = \frac{F}{R_m b l} \quad \text{Klebung:} \quad \Pi_{B_K} = \frac{\pi_3}{\pi_4 \pi_8} \quad (16)$$

Die analytische Gewichtsgleichung für Klebverbindungen (11) mit $\tilde{K} = F/(b l^2)$ kann nun durch Substitution der definierten Kennzahlen Π_A und Π_B in unten stehende dimensionslose Gleichung überführt werden.

$$\Pi_A = \pi_1 \left(1 + \frac{5}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\pi_5 \pi_7}{\pi_6 \pi_8} \Pi_B \pi_1} \right) \quad (17)$$

Der Sicherheitsfaktor für Klebverbindungen ergibt sich aus dem Standard-Sicherheitsfaktor $j = 1.5$, und diversen Abminderungsfaktoren für die Produktionsqualität der Klebschicht im Vergleich zu Laborprüfungen, Temperatur- und Feuchteinflüsse nach [2]. Damit ergibt sich der gesamte Sicherheitsfaktor für Klebungen zu $j_{K,ges} = 2.775$.

Die Kenngrößen unter der Wurzel aus Gleichung (17) werden zu Π_{C_K} zusammengefasst.

$$\Pi_{C_K} = \frac{\pi_5 \pi_7}{\pi_6 \pi_8} \quad \Pi_{C_K} = \frac{s g \rho}{R_m} \frac{E}{R_m} \frac{R_m}{G_K} \frac{R_m}{l g \rho} = \frac{s}{l} \frac{E}{G_K} \quad (18)$$

4.2. Geschweißter Stumpfstoß

Ausgehend von der analytischen Gleichung (14) und der Definition des Strukturkennwertes $K = F/(b l)$ erhält man die Relevanzliste $(G, F, l, b, R_m, g, \rho, j_{S,ges})$ und daraus die Dimensionsmatrix (siehe Tabelle 3).

V	M	L	T	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
G	1	1	-2	1	0	0	0
F	1	1	-2	0	1	0	0
l	0	1	0	0	0	1	0
b	0	1	0	0	0	0	1
R _m	1	-1	-2	-3	-3	-1	-1
g	0	1	-2	2	2	1	1
ρ	1	-3	0	2	2	1	1
j _{S,ges}	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 3: Dimensionsmatrix und resultierende Normalform des geschweißten Stumpfstoßes

Der Rang der Dimensionsmatrix ist $r = 3$. Aus den hier $n = 8$ Größen aus der Relevanzliste können demnach $m = n - r = 5$ dimensionslose Kennzahlen gebildet werden.

$$\begin{aligned} \pi_1 &= j_{S,ges} & \pi_2 &= \frac{G g^2 \rho^2}{R_m^3} & \pi_3 &= \frac{F g^2 \rho^2}{R_m^3} \\ \pi_4 &= \frac{l g \rho}{R_m} & \pi_5 &= \frac{b g \rho}{R_m} \end{aligned} \quad (19)$$

Analog zur Klebverbindung werden mehrere π_j zu Π_A zusammengefasst.

$$\Pi_A = \frac{G L_R}{F l} \quad \text{Schweißung:} \quad \Pi_{A_S} = \frac{\pi_2}{\pi_3 \pi_4} \quad (20)$$

Die endgültige Form der dimensionslosen Gleichung wird durch Einsetzen in die analytische Gewichtsgleichung (14) gefunden.

$$\Pi_A = \pi_1 \quad (21)$$

Das dimensionslose Strukturgewicht hängt bei der stumpfen Schweißverbindung nur vom Sicherheitsfaktor ab. Der Sicherheitsfaktor wird durch Abminderungsfaktoren so berechnet, dass ein Bruch nicht in der Schweißnaht auftritt und wird mit $j_{S,ges} = 1.85$ angesetzt [3].

In Bild 8 ist das dimensionslose Gewichtsfunktional als „Gewichtlicher Wirkungsgrad“ $\Pi_{Gew} = 1/\Pi_A$ dargestellt und auf den Wirkungsgrad des Referenzbleches bezogen, so dass die gängige Definition eines Wirkungsgrades mit einem Optimum bei 1 eingehalten wird. In Bild 9 ist das „dimensionslose Zusatzgewicht“ der jeweiligen Verbindungen dargestellt, welches sich folgendermaßen definiert:

$$\Delta_{Gew} = \Pi_A - \Pi_{A_R} \quad (22)$$

Auf Basis der dimensionslosen Kenngrößen Π_A und Π_B können Strukturverbindungen, gefügt mittels Nieten, Kleben oder Schweißen, gewichtlich bewertet werden. Bild 8 und Bild 9 zeigen diesen Vergleich für eine Überlappingsverbindung. Mit dieser Darstellungsform kann für jeden Anwendungsbereich die gewichtsminimale Ausführung der Verbindung mittels einer Optimalfunktion definiert werden.

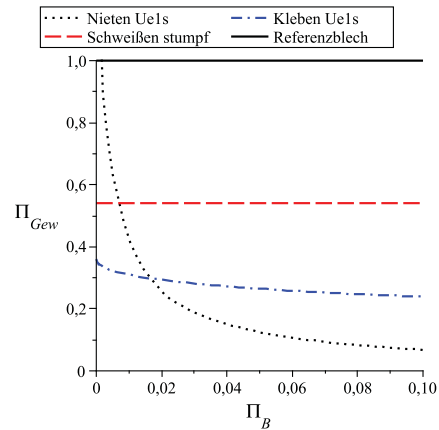


Bild 8: Gewichtlicher Wirkungsgrad

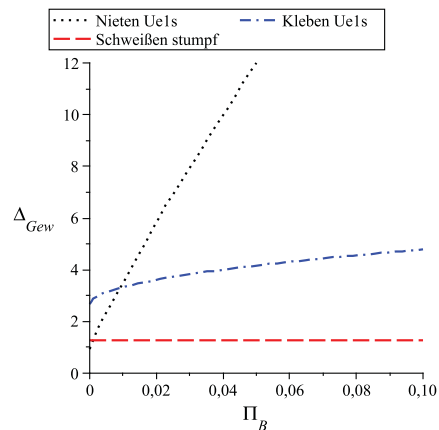


Bild 9: Dimensionsloses Zusatzgewicht

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Notwendigkeit genauerer Verfahren zur Gewichtsprognose im Flugzeugvorentwurf ist unbestritten. Die häufig verwendeten empirischen bzw. halbempirischen Verfahren, die sich aufgrund des Vorteils weniger Eingabeparameter bisher etablieren konnten und vorwiegend aus Ermangelung detaillierter CAD-Daten als Grundlage für die Gewichtsprognose in einem frühen Entwurfsstadium begründet sind, müssen für die Ableitung besserer Prognosen durch analytische Ansätze ergänzt werden, um neue Bauweisen und Technologien gewichtlich abbilden zu können. Weiterhin ist eine Aufteilung des Komponentengewichts in optimale und nicht-optimale Gewichtsanteile anzustreben.

Die Strukturverbindungen als Hauptgewichtstreiber des „Non-Optimum-Weights“ bedürfen einer genauen Betrachtung. Deshalb wurde in dieser Arbeit eine Methodik zur Gewichtsabschätzung von Strukturverbindungen mit Hilfe analytischer und dann darauf aufbauender dimensionsloser Ansätze entwickelt, welche eine Bewertung der unterschiedlichen Fügeverfahren hinsichtlich einer optimalen Konstruktion aus Sicht minimalem Gewichts ermöglichen. Die abgeleiteten dimensionslosen Kenngrößen „Gewichtlicher Wirkungsgrad“ und „Dimensionsloses Zusatzgewicht“ gewährleisten eine schnelle Bewertung des minimalen Verbindungsgewichts für verschiedene Belastungsbereiche, in welchen abschnittsweise die definierte „Optimalfunktion“ die jeweils ideale Konstruktionsform aufzeigt.

Zukünftig wird diese Methodik auf weitere typische Verbindungen und Materialien (FVW) im Flugzeugbau erweitert. Die in dieser Arbeit dargestellte Herangehensweise mittels des Pi-Theorems bietet sich zudem zur Implementierung von zukünftigen Anwendungen der rechnergestützten Entwurfserzeugung und Lösungsfindung an, da über die optimale Verbindungsfunktion bereits für die herrschenden Randbedingungen optimale Verbindungen regelbasiert erzeugt werden können. Durch die Verwendung einer Entwurfssprache [9] kann der Entwurfsprozess dadurch unterstützt werden, dass bereits in einem frühen Stadium regelbasiert fertigungsnahe CAD-Daten generiert werden, anhand derer eine exakte Massenbestimmung durchgeführt wird, die zur quantitativen Validierung der analytischen bzw. dimensionslosen Gewichts-Approximationsfunktionen verwendet werden kann.

Literatur

- [1] BEILSTEIN, L. ; MUTSCHLER, F. ; RUDOLPH, S. ; DRECHSLER, K.: Eine Methodik zur Gewichtsabschätzung von Verbindungselementen im Flugzeugvorentwurf. In: *DGLR - Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009*, Aachen, 08.-10. September 2009
- [2] HABENICHT, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer, 2006
- [3] KÜHN, M.: *Konstruktionselemente der Luft- und Raumfahrttechnik II, Vorlesung: Schweißverbindungen*. Universität Stuttgart, 2007
- [4] RAYMER, D. P.: *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1989
- [5] ROSKAM, J.: *Airplane Design - Part V: Component weight estimation*. DARcorporation, 1985
- [6] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung*. Springer, 1996
- [7] RUDOLPH, S.: *Eine Methodik zur systematischen Bewertung von Konstruieren*, Universität Stuttgart, Diss., 1994
- [8] RUDOLPH, S.: *Übertragung von Ähnlichkeitsbegriffen*. Habilitation, Universität Stuttgart, 2002
- [9] RUDOLPH, S. ; KRÖPLIN, B.: Entwurfsgrammatiken - Ein Paradigmenwechsel? In: *Der Prüflingenieur* April (2005), S. 34–43
- [10] SHANLEY, F. R.: *Weight-strength analysis of aircraft structures*. McGraw-Hill, 1952
- [11] TORENBEEK, E.: *Synthesis of subsonic airplane design : an introduction to the preliminary design of subsonic general aviation and transport aircraft, with emphasis on layout, aerodynamic design, propulsion and performance*. Kluwer Academic Publ., 1999
- [12] WIEDEMANN, J.: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. Springer, 2007