

EINSATZ INSTABILER STRUKTUREN ZUR FORMADAPTION BEI TRAGFLÜGELN

O. Mierheim, S. Löser, C. Gregor, W. Raither; Institut für Luft- und Raumfahrt der TU-Berlin; Marchstr. 12, 10587 Berlin, Deutschland

Zusammenfassung

Um große Formadaptionen bei Tragflügeln zu erreichen, müssen die aktiven Elemente strukturintegriert hohe Lasten mit großen Deformationen tragen und zudem ein geringes Gewicht haben. Mit dem Ziel, die Längenänderung beim knickenden Stab zu nutzen, werden überkritisch belastete Stabstrukturen untersucht. Diese können durch adaptierbare Stützung am Versagen gehindert und das Ausknicken so gezielt eingestellt werden. Es ergibt sich ein neues aktivierbares, längenveränderliches Element, das große Verformungen zulässt. Hierfür werden die für die Belastung, Festigkeit und Verformung relevanten Zusammenhänge gezeigt. Es werden exemplarische Beispiele gezeigt, wie Stäbe gestützt und mit diesen formadaptive Kragträger aufgebaut werden können.

NOMENKLATUR

b	Breite des Stabs	m
E	E-Modul	N/mm ²
I	Flächenträgheitsmoment	m ⁴
l	Länge des unverformten Stabs	m
Δl	Längenänderung des Stabs beim Knicken	m
M	Moment	Nm
n	Anzahl an Halbwellen des knickenden Stabs	-
P	Druckkraft in Stablängsrichtung	N
P _{krit}	kritische Druckkraft	N
P _i	innere Druckkraft im Stab	N
P _z	stützende Kraft quer zum Stab	N
p	pneumatischer Druck	mbar
t	Dicke des Stabs	m
w	Durchbiegung des Stabs	m
ε	Dehnung	%
κ	Krümmung	1/m
σ _{krit}	kritische Druckspannung	N/mm ²

1. EINLEITUNG

Um Flügel an verschiedene Flugzustände anzupassen, werden diese in ihrer Form verändert. Dies geschieht bei herkömmlichen Tragflügeln durch Ruder, Klappen und Spoiler. Diese haben jedoch verschiedene Nachteile. Die diskreten Gelenke zum Anschluss der Ruder führen zu erheblichen Gewichten, die Verformungen sind diskontinuierlich und die Wölbungsänderung bei Ruderausschlägen erfolgt mittels diskreter Winkeländerung.

Eine formadaptive Flügeltopologie hätte viele Vorteile. Es ist eine Verbesserung der aerodynamischen Leistungen durch die verbesserte Formadaption auf den gesamten Flugbereich bei gleichzeitig hoher Oberflächengüte zu erwarten [1].

Ein Großteil der Ansätze Tragflügel formadaptiv zu gestalten sieht dabei eine Profilverformung in Tiefenrichtung vor [1], [2]. Wenige Ansätze verfolgen eine Verformung in Spannweitenrichtung. Dies liegt an den in dieser Richtung hohen Lasten, die steife Strukturen erfordern, welche daher kaum verformbar sind. Lediglich bei Rotorblättern von Hubschraubern gibt es Versuche, die Verwindung durch aeroelastisch wirkende Stellflächen und diagonal auf der Haut aufgebrachte Piezofolien zu beeinflussen [3]. Rotorblätter sind hierfür besonders geeignet, da mit kleinen Schubverzerrungen über die große Streckung eine ausreichend große Verwindung erzielt werden kann.

Allen Ansätzen flexibel verformbare Tragflächen zu bauen ist die Problematik gemein, aus gegebenen maximalen Material- oder Aktuatordehnungen große Bauteilverformungen zu erreichen. Dies gilt insbesondere bei steifen Leichtbaustrukturen [4].

Gerade bei der Profilverformung ist es schwierig, über die geringe Profiltiefe eine deutliche Änderung der Profilwölbung zu erzielen. Viele Konzepte zur Beeinflussung der Profilverformung setzen hier auf überlappende Klaffungen. Eines der wenigen Beispiele für ein Konzept, das auf diesen Freiheitsgrad verzichten kann ist die Gürtelrippe [2].

Verformungen entlang der Spannweite haben zwar den Vorteil, dass sich hier kleine Dehnungen über die große Spannweite eher zu nutzbaren Verformungen summieren, aber auch den Nachteil, dass in diesen Schnittebenen die größeren Belastungen vorliegen. Soll eine formadaptive Tragfläche mit leichter, strukturintegrierter Aktuatorik erzielt werden, muss also zum einen die passive Struktur in der Lage sein den aufgeprägten Verformungen zu folgen, zum andern wird ein Aktuationsprinzip benötigt, das mit

geringem Gewicht ausreichende Kräfte und Deformationen erreicht.

Zur Formadaption in Flugzeugen werden bisher vor allem hydraulische und elektromechanische Aktuatoren verwendet. Diese können große Stellwege fahren und sehr große Kräfte aufbringen, sind jedoch auch vergleichsweise schwer. In wenigen, vor allen experimentellen Anwendungen kommen auch Formgedächtnislegierungen und Piezokristalle zum Einsatz. Insbesondere bei Konzepten zur strukturintegrierten Formadaption werden diese Werkstoffe häufig genannt. Die Verformungen von Piezokristallen sind jedoch äußerst gering. Formgedächtnislegierungen, die größere Verformungen erlauben, benötigen hingegen zur Aktivierung bestimmte Temperaturen. Diese sind häufig nur mit erheblichem Aufwand einstellbar und das System reagiert sehr träge.

In dieser Arbeit wird ein aktivierbares längenveränderliches Element vorgestellt, das als Grundlage überkritisch belastete Stabstrukturen verwendet.

Diese überkritisch belasteten Stabstrukturen werden technisch eigentlich grundsätzlich vermieden. Beim Knicken kommt es mit geringen Laststeigerungen zu sehr großen Verformungen und damit zum Versagen der Struktur.

Durch gezieltes Stabilisieren des instabilen Verhaltens kann ein Versagen vermieden werden und die großen Verformungen werden nutzbar. Im folgenden Kapitel wird daher auf die genauen Eigenschaften von knickenden Stabstrukturen eingegangen, um daran zu zeigen, unter welchen Bedingungen knickende Stäbe für formadaptive Anwendungen einsetzbar sind und in welchem Maße die Längenänderungen nutzbar werden. Im dritten Kapitel wird gezeigt, wie durch seitliche Stützung stabilisiert, die ertragbare Last erhöht und auf den Ausknickweg Einfluss genommen werden kann und wie so der Knickstab als aktivierbares Element nutzbar wird. Im vierten Kapitel werden Möglichkeiten der praktischen Umsetzung dieses Aktuierungskonzepts vorgestellt, zu denen im fünften Kapitel die Kraft-, Druck- und Wegverläufe aus Messungen mit den theoretisch ermittelten verglichen werden. Das sechste Kapitel stellt zwei exemplarische Strukturkonzepte zur Beeinflussung von Flügelverformungen mit diesen aktuierbaren Elementen vor.

2. EIGENSCHAFTEN INSTABILER STABSTRUKTUREN

Schlanke oder dünnwandige Strukturen neigen immer dann zur statischen Instabilität, wenn die durch eine Belastung auftretenden Verformungen die Beanspruchung vergrößern. Typische Instabilitäten im Leichtbau sind das Knicken, Beulen, Durchschlagen, Kippen und Knittern.

In dieser Arbeit wird das Knicken von Stäben betrachtet. Dieses kann am einfachsten am ausgeknickten Stab beschrieben werden und stellt ein Gleichgewicht aus inneren und äußeren Momenten dar. Die inneren Momente M_i berechnen sich aus der Materialsteifigkeit E , dem Flächenträgheitsmoment I und der Krümmung, die bei kleinen Verformungen durch die zweite Ableitung der Durchbiegung nach der Länge w'' ausgedrückt werden kann. Das äußere Moment M_a ergibt sich aus der Last P und der Durchbiegung $w(x)$. Die Verhältnisse sind in BILD 1 schematisch dargestellt.

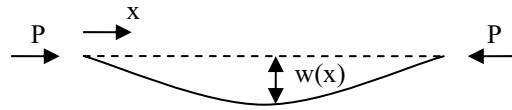


BILD 1. Verformung und Lastwirkung am geknickten Stab

Entsprechend erhält man als Gleichgewicht:

$$(1) \quad P \cdot w(x) + E \cdot I \cdot w''(x) = 0$$

Mit einem Sinusansatz lässt sich diese Differentialgleichung lösen und es ergibt sich die kritische Last in Abhängigkeit von der Halbwellenzahl n über der Länge l .

$$(2) \quad P_{kr} = E \cdot I \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{l} \right)^2$$

Auffallend an der Lösung ist, dass das Momentengleichgewicht bei Erreichen der kritischen Last völlig unabhängig von der Durchbiegung w erfüllt ist. Das bedeutet, dass in diesem Zustand (idealisiert) jede Durchbiegung einen Gleichgewichtszustand darstellt und dazwischen ohne Energieaufwand verschoben werden kann.

Exakt gilt dieser Zusammenhang jedoch nicht, da die zweite Ableitung der Durchbiegung nur bei kleiner Verformung der Krümmung entspricht. Bei größeren Verformungen gilt für die Krümmung κ :

$$(3) \quad \kappa = \frac{w''}{\sqrt{1+w'^2}^3}$$

und damit die Differenzialgleichung

$$(4) \quad P \cdot w + E \cdot I \cdot \frac{w''}{\sqrt{1+w'^2}^3} = 0$$

Diese Gleichung ist analytisch nur noch mit verschiedenen vereinfachenden Ansatzfunktionen zu lösen, kann jedoch numerisch ausreichend genau gelöst werden. In BILD 2 ist diese Lösung als Kraft-Durchbiegungsverlauf und Kraft-Längenänderungsverlauf eines Knickstabes normiert dargestellt. Die Kraft steigt mit zunehmendem Ausknicken nach Erreichen der Knicklast weiterhin an, ist also von der Durchbiegung abhängig. Der Verlauf endet etwa beim 1,3-fachen der Knicklast, an diesem Punkt geht die Steigung w' des Biegeverlaufs an den Lagern gegen unendlich.

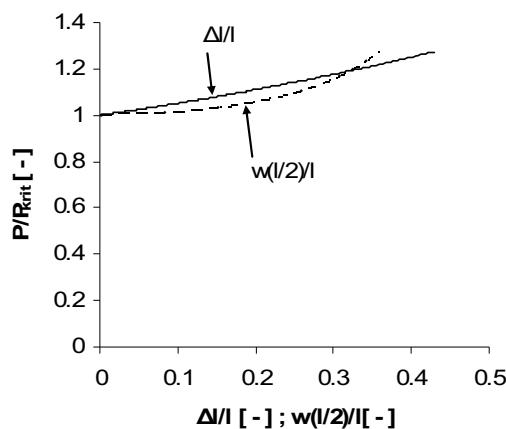


BILD 2. Kraft-Weg- und Durchbiegungsverlauf eines knickenden Stabes

Mit der Durchbiegung $w(l/2)$ des Knickstabes steigt die Krümmung κ und damit die Randfaserdehnung ε_{\max} . Diese ist zudem von der Dicke t des Stabes abhängig.

$$(5) \quad \varepsilon_{\max} = \kappa \cdot \frac{t}{2}$$

Die geometrischen Abmaße sind im folgenden BILD 3 für einen flachen Rechteckstab gezeigt.

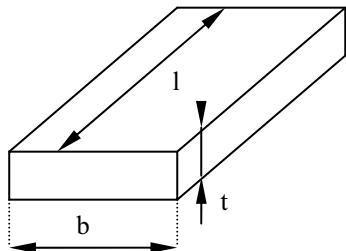


BILD 3. Abmaße eines flachen Stabes

Bei einem gegebenen Material mit einer maximalen Dehnung ist damit für eine bestimmte Durchbiegung, und damit für eine bestimmte Längenänderung, die Dicke begrenzt. Im folgenden BILD 4 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

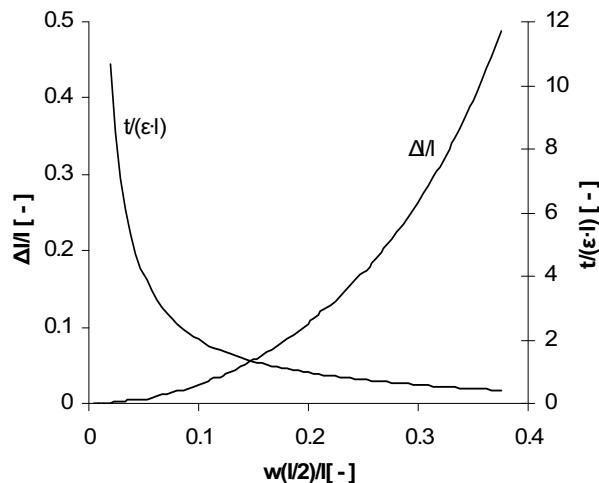


BILD 4. Längenänderung Δl und maximale Dicke t in Abhängigkeit der maximalen Dehnbarkeit ε eines Stabes über der Ausknickung w , jeweils auf die Ausgangslänge l normiert.

Soll eine große Längenänderung erreicht werden, gilt also:

- Die Länge l des Stabes sollte möglichst groß gewählt werden.
- Es sollte viel seitlicher Raum für eine große Durchbiegung w vorhanden sein.
- Der Stab sollte möglichst dünn sein, um nicht durch die Krümmung an seine Festigkeitsgrenze zu stoßen.
- Die elastische Dehnung des Materials sollte hoch sein.

Die Länge treibt dabei alle anderen geometrischen Werte nach oben, die Dicke t und die Materialdehnung ε beeinflussen die mögliche Biegung w .

Die für eine große Längenänderung vorteilhafte große Länge l und kleine Dicke t eines Stabes führen jedoch nach Gleichung (2) zu einer Abnahme der kritischen Last, bei der das Knicken einsetzt.

Wird die Knicklast P_{krit} aus Gleichung (2) mit dem Flächenträgheitsmoment

$$(6) \quad I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

auf die rechteckige Querschnittsfläche des Stabes bezogen so ergibt sich eine Knickspannung σ_{krit} .

$$(7) \quad \sigma_{\text{krit}} = E \cdot \frac{t^2}{12} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{l} \right)^2$$

Über die in BILD 4 gezeigten Zusammenhänge kann man diese Knickspannung auch in Abhängigkeit der Längenänderung darstellen (BILD 5).

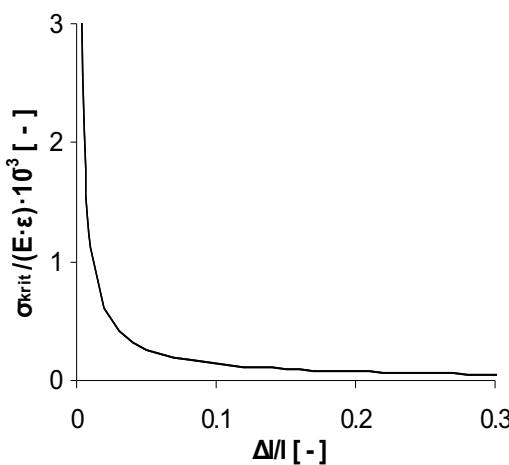


BILD 5. Maximal erreichbare Knickspannung (normiert auf den E-Modul und die maximale Materialdehnung) über der Längenänderung (bezogen auf die Ausgangslänge des Stabes)

Da der Stab für große Längenänderungen (wie in BILD 4 zu erkennen ist) dünn sein muss, ist bei großen Längenänderungen die Knickspannung entsprechend klein. Im folgenden BILD 6 ist der gleiche Zusammenhang am Beispiel eines aus unidirektionaler Glasfaser verstärktem Kunststoffstabs gezeigt.

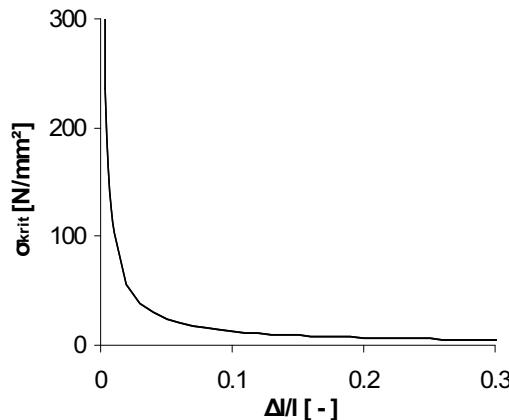


BILD 6. Maximal erreichbare Knickspannung eines Glasfaserstabes (rechteckiger Vollquerschnitt) mit einem E-Modul von $E=46000\text{N/mm}^2$ und einer Bruchdehnung von $\epsilon=2\%$ über der Längenänderung (bezogen auf die Ausgangslänge des Stabes)

BILD 6 zeigt, dass die maximal erreichbare Knickspannung und die maximal ertragbaren Längenänderungen besonders im Bereich bis 10% Längenänderung sehr stark voneinander abhängen. Bezogen auf die Festigkeit, die bei einem solchen Glasfaserstab etwa 900N/mm^2 beträgt, sind die Knickspannungen sehr gering. Dieser Vergleich ist jedoch vorsichtig zu bewerten, da druckbelastete Leichtbaustrukturen häufig gegen Instabilität ausgelegt werden müssen.

Glasfaser hat im Vergleich mit anderen Materialien in

dieser Anwendung günstige Eigenschaften mit einer sehr hohen Bruchdehnung und einer günstigen Steifigkeit. Eine weitere Verbesserung des in BILD 6 gezeigten Verlaufs kann durch Verwendung eines Hohlquerschnitts oder Sandwich erreicht werden.

3. AKTIVIERBARKEIT VON KNICKENDEN STABSTRUKTUREN

Wird dem ausknickenden Stab ein Anschlag geboten, erhöht sich die Durchbiegung w nicht weiter. Die Biegebelastung steigt dann lediglich proportional zur äußeren Last P und der Stab kann deutlich über die kritische Last ohne Versagen der Struktur belastet werden. Wird dieser Anschlag verschiebbar gestaltet, kann die Länge des Knickstabs entsprechend den im vorigen Kapitel gezeigten Verhältnissen geändert werden. Im folgenden BILD 7 ist dies schematisch für einen Stab gezeigt.

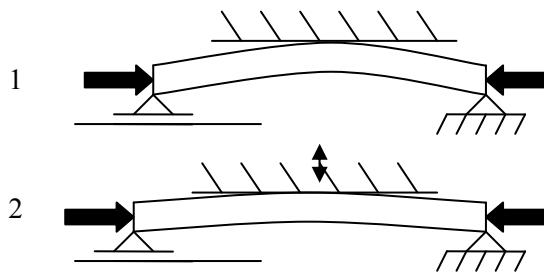


BILD 7. Prinzipskizze eines Knickstabs mit verschiebbarer Anschlag

Der gezeigte Anschlag ist als mechanisches Ersatzmodell zu verstehen. Die praktische Umsetzung kann sehr vielfältig sein, neben einem mechanisch verschiebbaren Anschlag können z.B. auch pneumatische oder hydraulische Balgen, oder magnetische bzw. elektrostatische Kräfte genutzt werden.

BILD 8 zeigt die Wirkung des verschobenen Anschlags auf den Kraft-Weg-Verlauf.

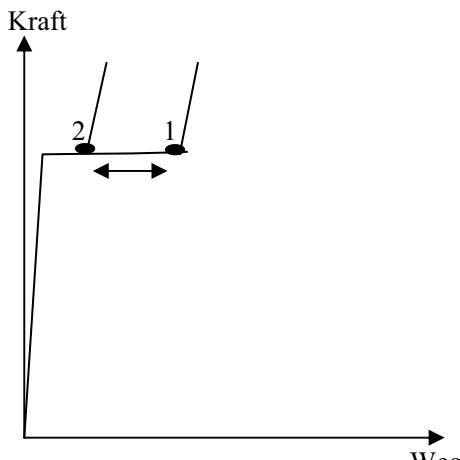


BILD 8. Prinzipskizze des Kraft-Weg-Verlaufs eines Knickstabs mit verschiebbarer Anschlag

Die Kraft P kann bei ausreichender Festigkeit des Anschlags bis auf das Vierfache der Knickkraft angehoben werden, bevor der Stab dazu neigt, in die nächste Eigen-

form durchzuschlagen. Die Kraft, die vom Anschlag aufzunehmen ist, hängt zum einen von der zugelassenen Biegeverformung w ab, zum anderen von der Knickkraft selbst. Der geknickte Stab belastet die Lagerpunkte auch mit einem Anschlag weiterhin mit seiner kritischen Last als Reaktionskraft. Eine seitliche Stützung muss also nur die Differenz aus der äußeren Last P und der kritischen Last P_{krit} tragen. Dieser Zusammenhang ist im folgenden BILD 9 schematisch für eine Last gezeigt, die nur wenig über der Knicklast liegt. Wie in BILD 2 zu erkennen ist, steigt die Last aus dem inneren Stabmoment mit zunehmender Verformung leicht an. Bei moderaten Verformungen ist dieser Einfluss jedoch nur klein, weshalb er im Weiteren vernachlässigt wird.

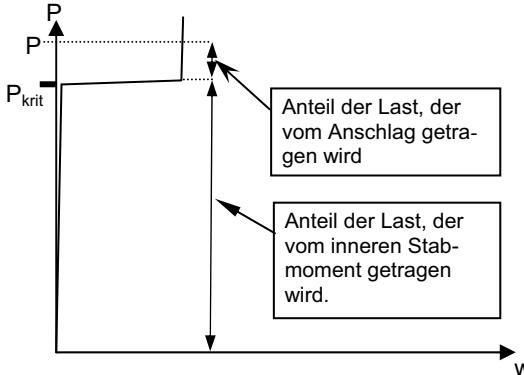


BILD 9. Lastaufteilung zwischen inneren Biegemomenten und Anschlag bei Stützung eines knickenden Stabes

Entscheidend für die Auslegung eines solchen Anschlags ist die Last P_z , die dieser senkrecht auf den Stab zur Stützung aufbringen muss. Die Last P_z variiert dabei abhängig von der Art der Stützung, z.B. ebener Anschlag oder pneumatischer Balg. Eine einfache und gute Abschätzung der Kräfte ist über das momentenfreie Kräftegleichgewicht am Lagerpunkt zu berechnen. Die am Lager wirkenden vektoriellen Kräfte sind in BILD 10 gezeigt, wobei P_i die Längskraft im Stab ist und nur die Kräfte betrachtet werden, die durch den Anschlag entstehen.

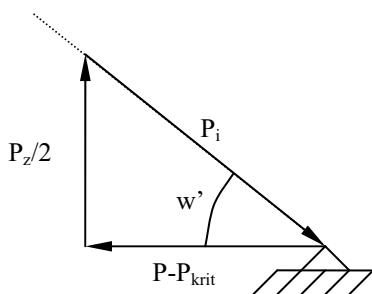


BILD 10. Kräftegleichgewicht am Lager eines Knickstabs

Die Lagerlast quer zum Stab hängt also lediglich von der äußeren Last P und der Steigung des Stabs am Lager w' ab. Da die Lagerlast als einzige mit der stützenden Last des Anschlags im Gleichgewicht steht, kann für die Kraft am Anschlag P_z geschrieben werden:

$$(8) \quad P_z = 2 \cdot (P - P_{\text{krit}}) \cdot w'$$

Auch w' hängt von der Art des Anschlags und der Belastung des Stabes ab. Insbesondere bei einer Aktivierung mittels pneumatischen Balg und moderaten Verformungen bleibt der Verformungsmodus mit und ohne Anschlag praktisch gleich und w' am Lager hängt damit nur noch von der relativen Längenänderung $\Delta l/l$ des Stabes ab.

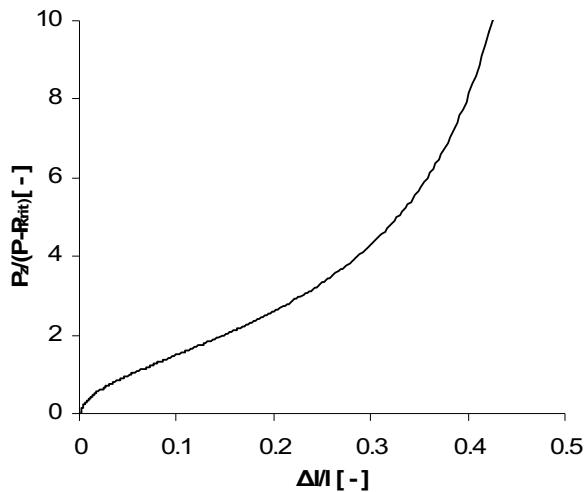


BILD 11. Vom Anschlag aufzubringende Kraft P_z in Abhängigkeit von der Längenänderung $\Delta l/l$ und der Differenz aus Stabbelastung und Knicklast.

BILD 11 zeigt diesen Zusammenhang. Bei kleinen Verformungen steigt die Last P_z unterproportional, ab 20% $\Delta l/l$ nimmt die Last überproportional zu und strebt bei einer relativen Längenänderung von etwa 43% gegen unendlich. Gut nutzbar ist daher vor allem ein Bereich bis etwa 20% Längenänderung, was auch durch die Verläufe in BILD 5 bestätigt wird.

Wie schon in BILD 9 zu erkennen ist, kann die zur Stabilisierung benötigte Kraft durch die Auslegung des Stabes auf eine bestimmte Knickkraft stark beeinflusst werden. Liegt die äußere Last nur knapp oberhalb der Knicklast, ist die Stabilisierung mit sehr kleinen Kräften möglich. Energetisch ist diese Auslegung sehr günstig, da der Großteil der Verformungsenergie elastisch im Stab gespeichert ist und bei der Aktivierung (Geradeindrücken des Stabes) nicht aufgewendet werden muss. Dies geht jedoch nur bei recht konstanten Lasten, da die äußere Last nicht unter die Knicklast kommen sollte. (In diesem Fall würde der Stab nicht knicken und daher mit der vorgestellten Methode auch nicht seine Länge ändern).

Die Auslegung eines solchen, zur aktiven Längenänderung verwendeten Stabes sollte also sehr genau auf den Anwendungsfall bezogen sein. Speziell die zu tragenden Lasten und die zu erreichenden Verformungen sollten genau aufeinander abgestimmt werden. Eine große Formbarkeit bedeutet eine geringe Knickspannung, und damit ein hohes Gewicht oder hohe Aktivierungskräfte. Daneben ist auch die seitliche Verformung zu berücksichtigen, da ausreichend Platz zum Knicken vorhanden sein muss.

4. PRAKТИSCHE UMSETZUNGEN ZUR AKTIVIERUNG KNICKENDER STÄBE

Im Folgenden werden verschiedene Konzepte und deren Umsetzungen beschrieben, auf das Knickverhalten von Stäben Einfluss zu nehmen. Die vorgestellten Konzepte werden alle pneumatisch aktiviert.

Wie in BILD 7 gezeigt, benötigt ein aktivierbarer knickender Stab einen verschiebbaren Anschlag. Ist dies ein pneumatischer Balg, muss auch dieser gelagert werden. Zudem sollte dafür gesorgt werden, dass es auch ohne anliegenden Luftdruck nicht zum Versagen des Stabes kommt. Beim ersten vorgestellten Konzept passiert dies durch zueinander symmetrisch angeordnete Stäbe.

4.1. Kreisförmig angeordnete Stäbe

Bei dieser Konfiguration werden ein oder mehrere Stäbe kreisförmig zueinander angeordnet. Durch geeignete Maßnahmen, beispielsweise Vorkrümmung oder exzentrische Lasteinleitung, wird sichergestellt, dass alle Stäbe in die Kreismitte knicken. Hier treffen sich die Stäbe, legen sich aneinander an und finden so einen passiv stützenden Anschlag. In der Kreismitte befindet sich ein Folienschlauch, der mit Luft aufgebläht werden kann und damit, je nach Luftvolumen, die Stäbe zurückdrückt. Eine Prinzipskizze ist im folgenden BILD 12 gezeigt. BILD 13 zeigt einen Versuchsaufbau, in dem dieses Prinzip umgesetzt wurde.

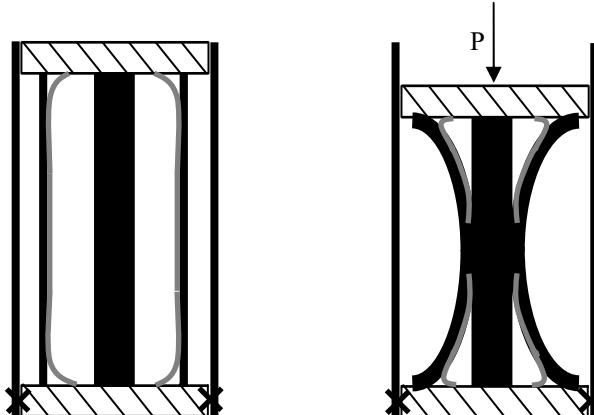


BILD 12. Prinzipskizze kreisförmig angeordneter Stäbe, gerade und ausgeknickt

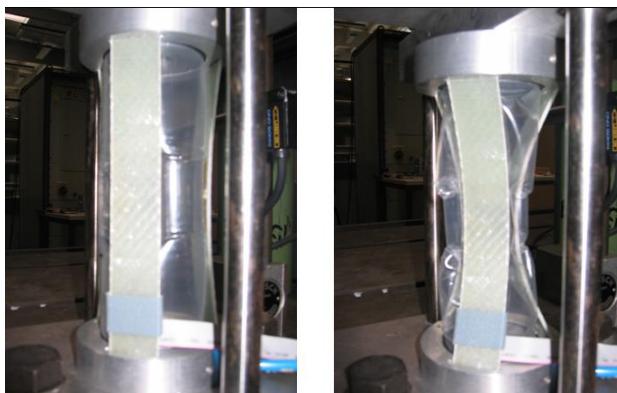


BILD 13. Versuchsaufbau mit drei kreisförmig angeordneten Stäben unter Last, links mit Luftdruck

Der Vorteil dieser Anordnung liegt im Verzicht eines extra eingebauten Anschlags. Ein Nachteil ist, dass alle Stäbe im Weg parallel geschaltet werden müssen, was eine Lagerplatte oder eine andere Form der Wegkopplung notwendig macht. Zudem müssen die beiden Lagerplatten parallel geführt werden, da sie sonst bei nicht hundertprozentiger Gleichheit der Stäbe zueinander kippen würden. Dies passiert im BILD 13 durch den Versuchsstand. Bei freiem Aufbau kann beispielsweise ein Rohr verwendet werden (in BILD 12 skizziert).

Die Anzahl der Stäbe, die im Kreis angeordnet werden, hängt vor allem vom vorhandenen Platz für den Durchmesser des Kreises ab. Zwei gegenüber angeordnete Stäbe benötigen dabei den geringsten Platz, bei mehr Stäben umschließen die sich anlegenden Stäbe eine immer größere Fläche. Versuche zeigen jedoch, dass sich zwei knickende Stäbe nicht stabil aneinander anlegen. Wie in BILD 14 zu erkennen ist, behält ein Stab die typische Knickform eines beidseitig gelagerten Stabs bei, während der andere Stab in eine krumme Doppelwelle übergeht, bis er schließlich deutlich unterhalb der vierfachen kritischen Last (theoretischer Wert für den Modus mit einer weiteren Halbwelle) durchschlägt.

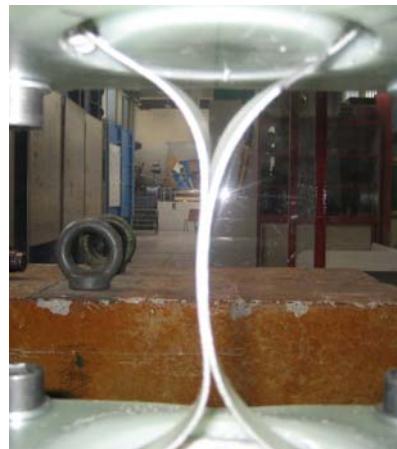


BILD 14. Anlegen von zwei knickenden Stäben

Drei Stäbe bilden beim Anlegen hingegen ein sehr stabiles Dreiecksprofil. Wie in BILD 15 zu erkennen, können diese sich sogar über mehr als die Hälfte ihrer Länge aneinander anlegen. (Dieses Verhalten kann durch einen minimal konkaven Breitenverlauf begünstigt werden). Im Bild sind etwa 2/3 der Stablänge aneinander angelegt, was dem 9-Fachen der Knicklast entspricht.



BILD 15. Anlegen von drei knickenden Stäben

Werden mehr als drei Stäbe verwendet, funktioniert das Anlegen deutlich schlechter, da die Stabecken sich in einem Winkel von 90° oder stumpfer aneinander anlegen. Es kommt dann bei kleinen Störungen zum Abrutschen oder einem Biegendrillknicken, wobei die Tragfähigkeit sofort verloren geht. Durch weitere Anschlagelemente in der Mitte kann jedoch auch bei mehr als drei Stäben ein stabiler Anschlag erreicht werden. Ein Vorteil wird durch mehr als drei Stäbe jedoch auch nicht erzielt. Von daher kann die Anordnung mit drei Stäben bzgl. Stabilität und Komplexität als Optimum betrachtet werden.

4.2. Einzelstab im Rohr

Die Verwendung von nur einem Stab reduziert die Komplexität im Bauteil erheblich. Im Vergleich zur zuvor vorgestellten Kreisanordnung muss bei einem einzelnen Stab der Anschlag bzw. das Auflager für den Luftbalg zusätzlich vorgesehen werden. Beides kann durch ein einfaches Rohr (rund oder auch rechteckig) erreicht werden. Das Parallelhalten der beiden Lagerebenen ist nicht nötig. Durch einen Balg, der im Rohr neben dem Stab platziert wird, kann das Knicken beeinflusst werden. Das Prinzip ist in BILD 16 skizziert, eine Umsetzung ist in BILD 17 gezeigt.

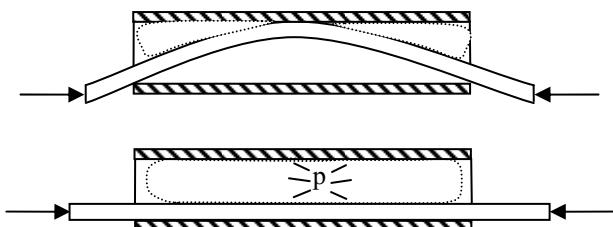


BILD 16. Prinzipskizze aktivierbarer Knickstab im Rohr



BILD 17. Beispiele für einzelne Knickstäbe im Rohr, links geknickt, rechts mit Lufterdruck stabilisiert

5. GEMESSENE DRUCK- UND KRAFTVERLÄUFE DER AKTUIERBAREN KNICKSTÄBE

Im Folgenden sind für den in BILD 13 gezeigten Versuchsaufbau verschiedene Messungen als Vergleich zu den durch Rechnungen ermittelten Verläufen dargestellt. Wie zu erkennen ist, handelt es sich um eine kreisförmige Anordnung dreier Stäbe, in deren Mitte ein Folienschlauch als Luftbalg zur pneumatischen Aktuierung platziert ist.

BILD 18 zeigt den Last-Weg-Verlauf des Versuchsstands. Klar zu erkennen ist der Bereich des Anlegens ab 4% Längenänderung durch den Lastanstieg, der allerdings durch auf die Stäbe zum Schutz der Folie aufgebrachte Gummipolster bis 6% Längenänderung nicht so ausgeprägt ist wie in BILD 8 skizziert.

BILD 19 zeigt die Druck-Weg-Verläufe des gleichen Aufbaus bei zwei konstanten äußeren Lasten P . Bei geraden Stäben ($\Delta l/l=0$) ist der benötigte Druck gering, die Stäbe müssen nur in ihrer Gleichgewichtslage gehalten werden. Trotzdem geht der Druck hier nicht auf Null. Dies hat zwei Gründe: Zum einen haben die Stäbe, um nicht nach außen zu knicken, eine Vorkrümmung, zum anderen ist in dieser Position die Folie prall und wird durch den Innendruck gespannt. Mit zunehmender Längenänderung wird der benötigte Druck größer, bis ab 4% Längenänderung durch das Anlegen der Stäbe die äußere Last zunehmend getragen wird.

Bemerkenswert ist der sehr niedrige Druck, der zum Heben bzw. Halten der Last benötigt wird. Die geleistete Arbeit an der Last $P=155\text{N}$ ($2,2 \cdot P_{\text{krit}}$) beträgt rund 2J. Wird die aufgewendete Arbeit konservativ aus dem maximalen Druck und dem Luftvolumen (gemessen) berechnet, beträgt diese nur 1,1J. Ist die Last näher an der Knicklast, wie das bei $P=105\text{N}$ ($1,5 \cdot P_{\text{krit}}$) der Fall ist, werden die Verhältnisse noch günstiger. Die geleistete Arbeit beträgt in diesem Fall 1,1J, die aufgewendete Arbeit 0,35J. Die Differenz dieser Arbeiten ist die im Knickstab elastisch gespeicherte Energie.

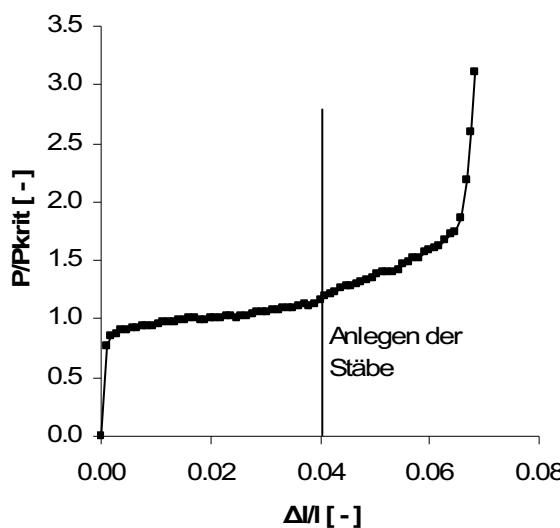


BILD 18. gemessener Kraft-Weg-Verlauf eines Knickstabs mit Anschlag (Aufbau aus BILD 13)

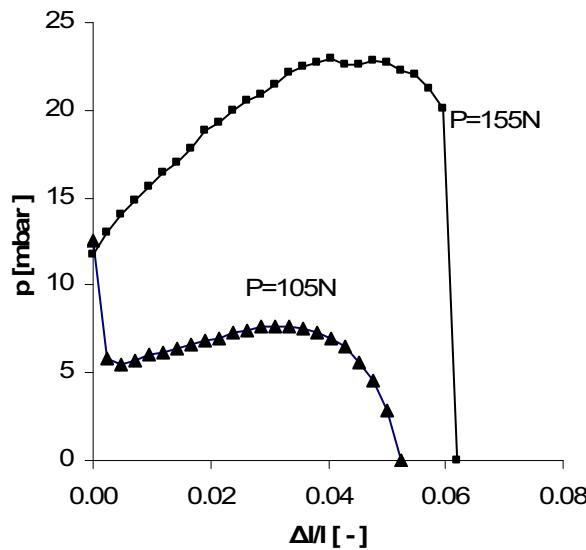


BILD 19. gemessene Druck-Weg Verlauf bei zwei konstanten äußeren Lasten ($P_{krit}=70N$, $l=210mm$)

Proportional zum Innendruck steigt die Kraft P_z , die die Stäbe stabilisiert. Im folgenden BILD 20 ist diese Kraft, gebildet über die Stabflächen auf die der Innendruck wirkt, bezogen auf die Differenz aus Knicklast P_{krit} und äußerer Last P , dargestellt. Zum Vergleich ist der theoretische Verlauf aus BILD 11 gezeigt. Bis zum Anlegen der Stäbe bei 4% Längenänderung ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Über 4% legen sich die Stäbe aneinander an und die stabilisierende Kraft wird vermehrt von den Stäben gegenseitig aufgebracht, sodass die Kraft aus dem Druckverlauf wie auch in BILD 19 schnell gegen Null geht.

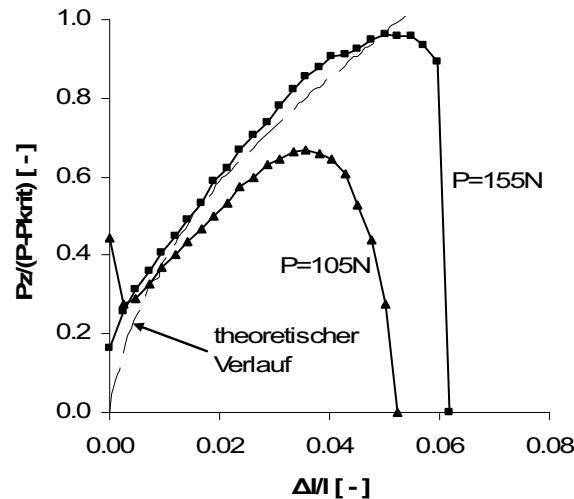


BILD 20. normierter Druck-Weg-Verlauf, dargestellt als bezogene Kraft senkrecht zum Stab; zwei Messungen (vergleiche BILD 19) sowie der theoretische Verlauf (vergleiche BILD 11)

6. KONZEpte ZUR FORMADAPTION VON TRAGFLÜGELN

Wie vorgestellt, können mit knickenden Stäben auch unter hohen Lasten signifikante Stellwege gefahren werden. Sind diese Stäbe in ein statisch bestimmtes Tragwerk integriert, ist die Formadaption problemlos möglich. Werden die Stäbe einer bereits statisch bestimmten und steifen Struktur hinzugefügt, führen Längenänderungen der Stäbe vor allem zum Verzerren der vorhandenen Struktur und damit schnell zum Versagen.

Im folgenden BILD 21 ist der Versuchsaufbau eines Fachwerkkratgrägers gezeigt, in dem sämtliche druckbelasteten Stäbe nach dem in BILD 12 und BILD 13 gezeigten Prinzip als aktuierbare Knickstäbe ausgeführt sind. Die großen Verformungen sind im Vergleich gut erkennbar.

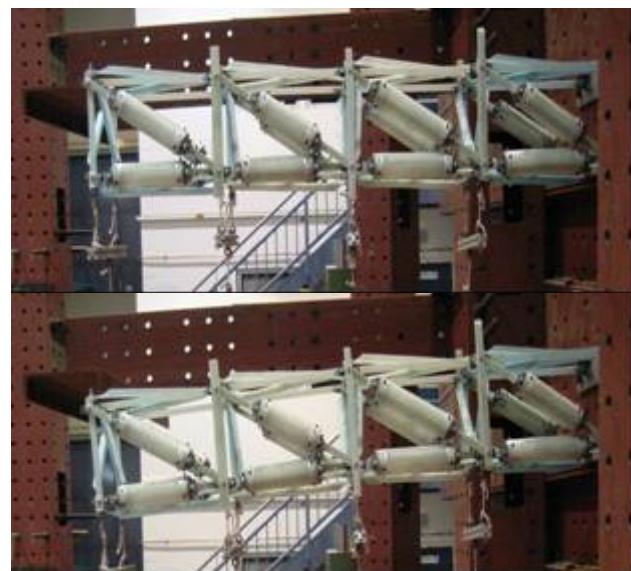


BILD 21. Fachwerk mit knickenden Stäben unbelastet (oben) und belastet (unten)

Fachwerke sind in Flügeln als tragende Struktur selten zu

finden. Ein Ausnahmebeispiel ist die Ju 52, deren Flügel aus acht Längsholmen bestehen, die untereinander durch diagonale Streben verbunden sind. Die Wellblechhaut der Flügel ist nicht in der Lage, Kräfte in Spannweitenrichtung aufzunehmen. Ein solcher Flügel könnte mit dem oben gezeigten Tragwerk in Biegerichtung adaptiv gestaltet werden.

Eine Verwindung, für Flügel aerodynamisch viel bedeutsamer und von dem gezeigten Fachwerk einstellbar, belastet dagegen die Flügelhaut, sofern diese das Fachwerk als geschlossenes Profil umgibt, sehr stark. Für diesen Verformungsmodus müssten Schlitze in der Haut, beispielsweise an der Hinterkante, vorgesehen werden (offenes Profil), damit eine Torsion möglich wird.

Liegt eine klassische Tragflügelstruktur mit Flügelkästen vor, ist auch die dargestellte Biegeverformung mit einem integrierten Stabwerk nicht umsetzbar, da die Struktur statisch überbestimmt wäre und der Kasten diese Verformungen nicht ertragen würde. Die Biegeverformung adaptiv zu beeinflussen ist jedoch für die aerodynamische Güte von Flügeln ohne großen Einfluss.

Um eine einstellbare Verwindung mit geringer Änderung des Strukturkonzepts eines typischen Flügelkastens zu erreichen, kann der Hinterholm des einzelligen Profils durch diagonale Knickstäbe ersetzt werden. Es ergeben sich ähnliche Vorteile wie beim typischen Kastenprofil, eine gute Biege- und Torsionssteifigkeit, aber auch ein großer Verwindungsfreiheitsgrad.

Die Aktuierung der Stäbe bewirkt in diesem Fall eine einstellbare Verschiebung zwischen Ober- und Untergurt. Dies entspricht einer Schubverformung des Hinterholms, was im geschlossenen Kasten eine Torsion bewirken würde.

Im folgenden BILD 22 ist ein Modell eines solchen halboffenen Kastenprofils gezeigt. Es handelt sich um ein C-Profil mit Rippen aus GFK, das wie beschrieben an der offenen Seite durch diagonale Stäbe gestützt wird. Die Stäbe sind in diesem Beispiel von der Länge so gewählt, dass der Kasten im unbelasteten Zustand unverwundet ist.

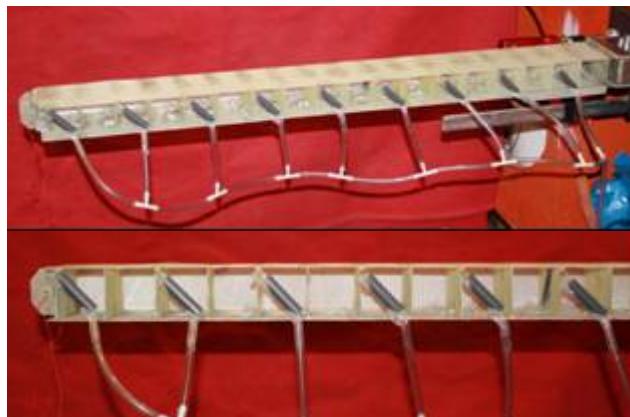


BILD 22. Halboffenes Kastenprofil mit Knickstäben (Einzelstäbe im Rohr)

Werden die Stäbe nicht durch Luftdruck gestützt, verhält sich der Kragträger unter Querkraftbelastung wie ein C-

Profil und tordiert. Durch Luftdruck können die Stäbe gestützt werden und der Kragträger verwindet sich praktisch nicht. BILD 23 zeigt dies in der Vorderansicht. Über den 1m langen halboffenen Kasten ergibt sich eine Verwindung von bis zu 11°.



BILD 23. Verwindung des halboffenen Kastens unter Last, rechts mit durch Luftdruck gestützten Stäben

7. ZUSAMMENFASSUNG

Überkritisch belastete Stäbe können, wenn sie gestützt werden, Lasten deutlich über der kritischen Last ertragen. Die dabei möglichen Verformungen $\Delta l/l$ hängen vom verfügbaren Platz, dem Dicken-Längen Verhältnis t/l und der Bruchdehnung ab und liegen deutlich über den Bruchdehnungen der im Strukturleichtbau üblichen Werkstoffe. Wird der stützende Anschlag der Stäbe variabel gestaltet, kann die Biegung und damit die Längenänderung des Stabes eingestellt werden.

Der knickende Stab kann somit als einstellbares, längenveränderliches Element verwendet werden.

Die Vorteile sind:

- Der Stab kann als integrales Bauteil direkt in den Lastpfad gesetzt werden. Es sind keine Gelenke oder parallel geschaltete Strukturen nötig.
- Die Knicklast des Stabes kann auf beliebig hohe Lasten angepasst werden, der Gewichtszuwachs ist dabei linear.
- Die Verkürzung kann bis zu 43% der Ausgangslänge betragen.

Der Stab muss dabei allerdings sehr genau an die auftretenden Lasten und benötigten Verformungen angepasst werden.

- Die auftretenden Lasten müssen oberhalb der Knicklast P_{krit} liegen, sollten aber auch nicht das Vierfache der Knicklast überschreiten.
- Um das Aktuierungssystem, in den beschriebenen Beispielen die pneumatischen Gefäße, leicht und energieeffizient zu halten, sollten die Betriebslasten möglichst dicht an der kritischen Last liegen.
- Je größer die maximale relative Verformung $\Delta l/l$ gewählt wird, desto geringer wird die Knickspannung σ_{krit} . Da die kritische Kraft P_{krit} dicht unter den Betriebsspannungen liegen sollte, wird der Stab mit zunehmender Verformung schwerer.

Diese Einschränkungen zeigen, dass überkritisch belastete stabilisierbare Stäbe nur in bestimmten Fällen das optimale Stellelement sind. Schwanken die Lasten stark, oder sind noch größere Längenänderungen nötig, ist der hydraulische Zylinder überlegen. Müssen hohe Frequenzen erreicht werden, sollten Piezokristalle verwendet werden.

Um jedoch in der belasteten Struktur bei kleinem Strukturkennwert eine Formadaption mit geringer Masse umzusetzen, bieten überkritisch belastete stabilisierbare Stäbe eine gute Alternative.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H. Arendt, D. Heyland, W. Martin: *Das Leitkonzept „Adaptiver Flügel“ (ADIF)*, DGLR Jahrestagung 1997 München, DGLR-JT97-147
- [2] L.F. Campanile, S. Anders, *Aerodynamic and aeroelastic amplification in adaptive belt-rib airfoils*, Aerospace Science and Tech, 2005, 9, pp. 55-63
- [3] H. Hanselka, A. Büter, Th. Bein, H.P. Monner, E. Breitbach: *Adaptive Struktursystem für Luftfahrtanwendungen am Beispiel des adaptiven Flügels und adaptiven Rotors*, DGLR Jahrestagung 1997 München, DGLR-JT97-147
- [4] C. Thill, J. Etches, I. Bond, K. Potter and P. Weaver, *Morphing Skins, The Aeronautical Journal, March 2008, pp. 117-139*