

# KONZEPT ZUM TEST VON FLUGZEUGRUMPF SCHALEN UNTER REALEN FLUGZEUGBEDINGUNGEN

M. Götze, M. Sachse, R. Best, Th. Fleischer, M. Semsch  
IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH  
Wilhelmine-Reichard-Ring 4, D-01109 Dresden

## Zusammenfassung

Neuere Entwicklungen von Flugzeugzellen weisen verstkt eine Zusammenstellung verschiedenartiger Technologien sowie Materialien auf. Diese Tendenz rrt von den Bemungen einer kraftflu- und betriebsfestigkeitsgerechten Gestaltung bei vertretbarem, möglichst geringem Fertigungsaufwand her. Besonders Flugzeugrumpfe enthalten diesbeziglich Bereiche unterschiedlicher Anforderungen und entsprechend lokal variierende Strukturanstze. Daher ist ein ständig wachsender Informationsbedarf erkennbar, der typischer Weise einen erheblichen Mehraufwand an experimenteller Simulation zur Folge hat. Dieser Umstand wirft ein neues Licht auf die Aufgaben der Betriebsfestigkeitsversuche an gekrümmten Einzelschalen. Die hochspezialisierten Prufeinrichtungen für derartige Versuche erfuhren in diesem Zusammenhang eine kontinuierliche Steigerung ihrer Leistungsfigkeit. Waren ursprünglich Riuntersuchungen an metallischen Schalenhuten der Kern der Bemungen, so wurde mittlerweile eine deutlich umfangreichere Simulationsgüte erreicht, als sie für diese erste spezielle Aufgabe erforderlich war. Zum einen können jetzt Randbedingungen für sämtliche zylindrische Rumpfabschnitte abgebildet werden, zum anderen lassen sich die Steifen einschließlich ihrer Anschlüsse in die Ermüdungs- und Schadenstoleranzuntersuchungen für Rumpfschalen vollwertig in die Simulation einbeziehen.

## 1. EINLEITUNG

Für die nächste Generation an Passagierflugzeugen fiel die Materialauswahl in den Rumpfsektionen sehr stark zu Gunsten des CFK aus. Einerseits ergibt sich dadurch die Möglichkeit der maßgeschneiderten Eigenschaftsverteilung innerhalb einer Struktur, die den stark wechselnden Anforderungen im Rumpf folgen könnte. Andererseits bedingt dies die Notwendigkeit, die Wissensbasis über den Umgang mit den in der kommerziellen Luftfahrt noch nicht vollstdig etablierten Werkstoffen in kurzer Zeit erheblich auszubauen. Allgemeine physikalische Eigenschaften und eine Vielzahl von Fertigungstechnologien wurden bereits in den letzten Dekaden ausgiebig untersucht. Das schadenstolerante Verhalten sowie die quantitative Schadenserkennung insbesondere an großen Strukturen bilden neben verfahrenstechnischen Weiterentwicklungen einen Schwerpunkt der aktuellen Bemungen.

Experimentelle Untersuchungen an Einzelschalen bieten sich als eine Möglichkeit an. Mit einem guten Verhältnis von Aufwand, speziell zeitlich, zu Erkenntnisgewinn an unskalierten Details lassen sich Versuchsreihen entwickeln, die für einen Vergleich von Gestaltungskonzepten sehr gut geeignet sind. Bei mittlerem Aufwand, verglichen zu Versuchen mit Tonnen und Kupons, befinden sich die engeren Untersuchungsbereiche eingebettet in die Originalstruktur. Auf Basis dieser Versuchsreihen können effizient weiterfrende, risikominimierte Tonnenversuche konzipiert werden [1].

## 2. AMBITIONEN INNERHALB DER TESTPYRAMIDE

Die Entwicklungsprozesse für Hochtechnologierprodukte wurden in der letzten Dekade dramatisch beschleunigt. Ein Aspekt ist dabei der verstktete Einsatz von Verbundmaterialien insbesondere Faserverbunde innerhalb mechanisch hochbeanspruchter Teile. Dadurch stieg auch die Komplexität der notwendigen Untersuchungen erheblich an, um letztendlich fundierte Entscheidungsgrundlagen für die erfolgreiche Produktentwicklung schaffen zu können.

Auch für den Bewertungs- und Zertifizierungsproze von bedruckten Flugzeugrumpfschalen ergab sich durch die Einfrung speziell kohlefaser verstärkter Kunststoffe eine Reihe von Änderungen. Zum einen frte das zu metallischen Schalen verschiedene Ermüdungs- und Schadenstoleranzverhalten zu einer Verschiebung der untersuchten Rumpfabschnitte von der Oberschale zu seitlicher Unterschale sowie Unterschale. Entsprechend gelten auch neue Anforderungen für die zyklischen Lasten der durchzuführenden Einzelschalenversuche. Die jetzt relevanten künstlichen Schäden, vorrangig Einschläge, unterscheiden sich deutlich von denen der metallischen Rumpfschalen, vorzugsweise Sägeschnitte. Aus diesen Gründen heraus muß sich die experimentelle Simulation neu orientieren bezüglich ihrer Leistungsfigkeit, um weiterhin die Anforderungen der Ermüdungs- und Schadenstoleranzuntersuchungen an gekrümmten Rumpfschalen erfüllen zu können.

Zusätzlich ergibt sich aus Sicht der maßgeschneiderten Gestaltung der Wunsch, Kombinationen verschiedener Aspekte wie Ermüdungsverhalten, Blitzschlagwiderstand,

Fertigungsaufwand, Bedarf an Ausrüstung und Werkzeugen bewertend gegenüberstellen zu können. Das beinhaltet auch, daß verschiedene Werkstoffklassen innerhalb einer Rumpfschale miteinander verbunden sein sollen. Somit gewinnt das Zusammenwirken einzelner Bauteile der Rumpfschalen zunehmend an Bedeutung für die Versuchsdurchführung respektive die Simulationsqualität. Gleichwohl wird die Entscheidung der Entwicklungsgruppen, die richtige aber zumindest geeignete Zusammensetzung der Technologien und Verfahren zu finden, schwieriger.

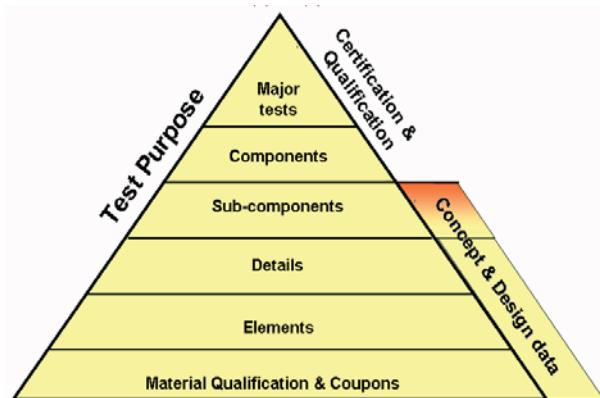


BILD 1. Testpyramide; Tendenz der Schalenversuche, die im Bereich „Sub-components“ liegen

Wenn also die Entscheidung für oder gegen ein Strukturkonzept von Ergebnissen aus Versuchen mit komplexeren als Kuponproben abhängt, dann bedarf es einer Testmethode, die das bei überschaubar mehr Aufwand leisten kann. Wie die aktuellen Entwicklungen von Rumpfstrukturen zeigen, sollte diese sich für Schalen aller Rumpfbereiche eignen. Mit den jetzt zur Verfügung stehenden Versuchsständen zur Rumpfschalenprüfung ist ein solches Instrument verfügbar, welches Rumpfschalen mit oder ohne Spante, mit monolithischen oder Sandwich-Häuten aufnehmen kann. Es ermöglicht die Erweiterung der untersuchungs-/ versuchsintensiven Aufgaben im Bereich der Konzeptbewertung auf spezielle Unterstrukturen – Baugruppen, die die relevanten Details einbetten. Über das Verständnis von Details als regelmäßige Überlagerung der Bestandteile einer Rumpfschale hinaus, werden Einzelschalenversuche zunehmend zur Erschließung des Strukturverhaltens an Öffnungen/ Ausschnitten genutzt. Im einfachen Fall des Fensters oder eines Antennendurchbruchs geschieht dies unskaliert, für turähnliche Öffnungen skaliert. Es lassen sich also unterstützende Einflüsse in beide Richtungen der Testpyramide wahrnehmen, wobei Schalenversuche im Vorfeld zu den qualifizierenden Tonnenversuchen stattfinden oder sich gegebenenfalls mit diesen leicht überschneiden. Zusammenfassend lässt sich im Sinne der Testaufgaben feststellen, daß die Rumpfschalenprüfung bei mittlerem Zeit- und Kostenaufwand realitätsnähere Detailuntersuchungen erlaubt und gleichzeitig gereifte, präzise Festlegungen für Tonnenversuche ermöglicht.

### 3. GRUNDLAGEN BEWÄHRTER VERFAHREN

Die Wurzeln der Versuche mit unskalierten Rumpfschalen unter Überdrucklasten reichen bis in die Mitte des vergangenen Jahrhunderts zurück. Am Anfang standen zwei spiegelsymmetrisch angeordnete Schalen, die an ihren

Rändern dicht und fest miteinander verbunden waren. Dieser „Kaulquappe“ wurden pneumatisch Druckzyklen aufgeprägt. Offenbar war dieses Vorgehen nicht sehr praktikabel durch seine erheblichen Störeinflüsse. Es findet kaum noch Erwähnung. Im Gegensatz dazu wurde der hydraulischen zyklischen Druckprüfung des gesamten im Wassertank installierten Rumpfes deutlich mehr Aufmerksamkeit gewidmet. Parallel dazu erfolgten experimentelle Untersuchungen an ebenen und gekrümmten Schalen unter einachsig eingeleiteten Lasten wie Zug, Druck oder Schub.

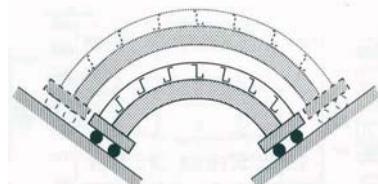


BILD 2. Idealer Zustand für Überdrucklasten [5]



BILD 3. Idealisierter Zustand für Schublasten (rechts) und Längslasten (links)

Der erste häufig genutzte Ansatz für Untersuchungen an einfach gekrümmten Rumpfschalen bildet die Kombination aus Überdrucklast und den korrespondierenden Membrankräften eines zylindrischen Druckbehälters ab. Diese Verhältnisse erweitert um Querschnittslasten der Rumpfbiegung wurden und werden auf Oberschalen des Vorderrumpfes angewendet. Die Versuchseinrichtung nimmt die Rumpfschalen schwimmend gelagert über einem starren Druckkasten mit umlaufenden Dichtungen auf. Am gesamten Schalenumfang befinden sich mechanische Lasteinleitungen.

- $F_{\text{längs}}$  Hautzugkraft in Längsrichtung; aktiv geregelt
- $p_{\text{ü}}$  pneumatischer Überdruck; aktiv geregelt
- $F_{\text{Spant}}$  Spantkraft (quasi tangential); aktiv geregelt
- $F_{\text{Haut}}$  Hautkraft (quasi tangential); passiv

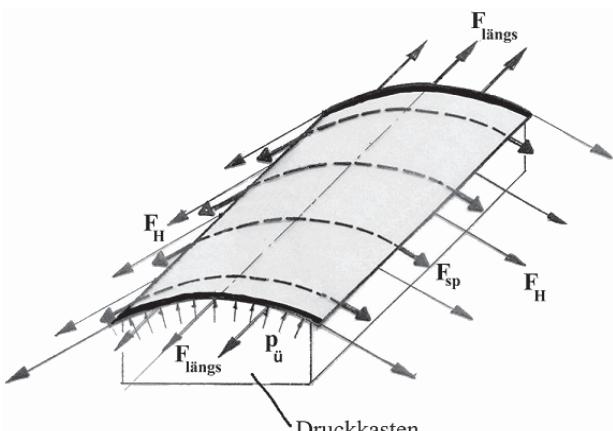


BILD 4. Testprinzip schwimmend gelagerte Rumpf-obersschale

Dieses Prinzip wird kontinuierlich für die Bewertung des Ermüdungs- und Rißfortschrittsverhalten metallischer Rumpfschalen genutzt. Die Beanspruchungsverteilung in der Schalenhaut sowie die rißhemmende Wirkung der Steifen stellen sich für die Mehrzahl der Hautfelder als absolut aussagekräftig dar. An einer Schale können nacheinander bis zu vier Schäden untersucht werden. Für Längsrisse erwiesen sich GAG-Zyklen (Ground Air Ground) als hinreichend zur Simulation der Einsatzbedingungen, wogegen für Umfangsrisse Flugprofile abgebildet werden müssen. Letztere werden von Schalenlängslasten dominiert, die aus der Rumpfbiegung herrühren. Bei diesem Vorgehen bleiben spantspezifische Untersuchungsziele außerhalb der Betrachtungen, ausgenommen der Einfluß eines durchtrennten Spantes auf das Verhalten eines Zweifeldriß'.

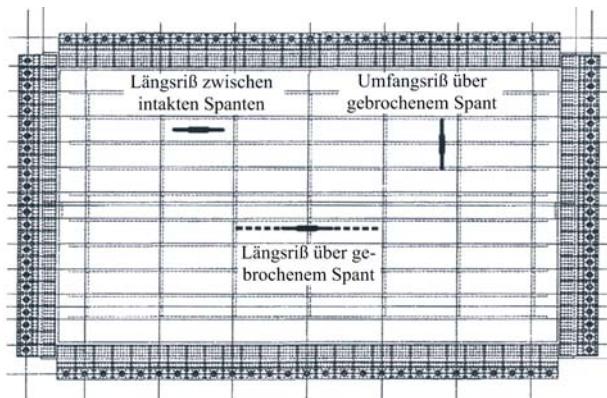


BILD 5. Rißanordnung in einer IMA-Schale [1]

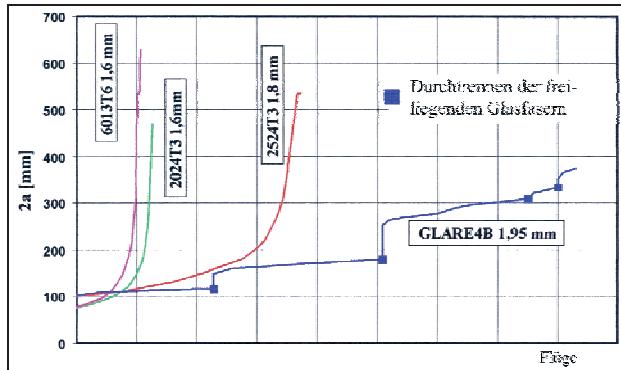


BILD 6. Rißfortschrittskurven für Materialvergleich [1]

Auf der Basis dieser ersten erfolgreichen Testtechnologie für die mehrachsige Einzelschalenprüfung setzte sich eine beständige Weiterentwicklung fort. Neben äußerlich unscheinbaren Verbesserungen brachte die Erweiterung um eine überlagerbare Lastkomponente, den Schubfluß, eine markante Steigerung der Leistungsfähigkeit im Sinne des Simulationsspektrums. Unter Beibehaltung der bekannten Randbedingungen erfolgte die Installation zusätzlicher Lasteinleitungskomponenten am Rand des zu untersuchenden Bereiches, wie in der Prinzipskizze BILD 7 angedeutet.

- $F_{\text{Schub}}$  Hautschubkraft; aktiv geregelt und passiv

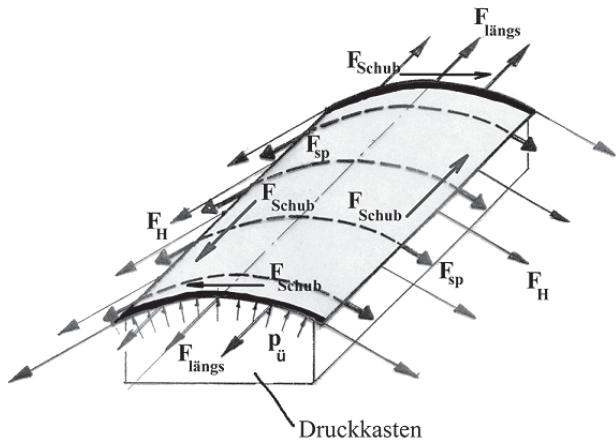


BILD 7. Testprinzip schwimmend gelagerte obere Rumpfseitenschale

Mit der erweiterten Testtechnologie gelingt es gleichermaßen gut, realitätsnahe Beanspruchungszustände gleichmäßig über mehrere Hautfelder in der Rumpfhaut einzustellen. Darüber hinaus läßt sich das Drehen der Rißspitze durch den Schubeinfluß experimentell darstellen und befindet sich in guter Übereinstimmung mit ver suchsbegleitenden numerischen Simulationen. Ungeachtet dessen erreicht die bisher vorgestellte Herangehensweise der schwimmend gelagerten Einzelschalen ihre Grenzen. Ein wesentlicher Grund liegt in der Basisvoraussetzung für frei einstellbare mehrachsige Lasten. Die einzelnen Lasteinleitungen müssen nahezu entkoppelt voneinander auf dem gesamten Schalenumfang wirksam werden können. Daraus ergeben sich Situationen wie beispielsweise, daß der geforderte Schubfluß in Seitenschalen infolge des begrenzten Bauraums nicht erreicht werden kann oder in biegeempfindliche Sandwich-Schalen inakzeptable simulationsbedingte Störungen der Beanspruchungsverteilung auftreten. Dieser Umstand führt zu einem alternativen Testkonzept, das ein Behälterkomplement zur Bildung eines geschlossenen Querschnitts nutzt. Beispiele hierfür sind Tonnenversuche mit Wechselschalen aber auch ein nachgiebiger, weicher Druckkasten, dessen Längsränder mit der Rumpfschale verbunden werden [3], [4].

## 4. HERAUSFORDERUNG EINES EINZELSCHALENVERSUCHES

### 4.1. Verbesserte Möglichkeiten steigern die Erwartungen

Ganz allgemein beziehen sich Entwicklungsansätze für Rumpfschalenprüfstände auf die Beanspruchungsverteilung innerhalb der geprüften Struktur. Als Simulationsanforderungen wurden bisher ausschließlich homogene, sprich auch periodische, Zustände innerhalb des Versuchsfeldes auf einer Rumpfschale formuliert. Es handelt sich um reine Membranlasten. An dem Flächentragwerk Rumpfschale erfordert diese Vorgabe vor allem einen geeigneten Umgang mit den Exzentrizitäten ihrer eindimensionalen Bestandteile, den Stringern und Spanten, gegenüber der zweidimensional abstrahierbaren Haut. Die lokalen Eigenschaften variieren entsprechend den in der näheren Umgebung enthaltenen Bestandteilen der Rumpfschale. Die erhebliche radiale Ausdehnung der

Spannung erforderlich für die experimentelle Simulation eine separate Behandlung. Für Stringer gebräuchliche verschmierende Herangehensweisen, wie zum Beispiel ein gemeinsamer Sockel am Schalenrand, entfallen. In dem Umgang mit den hier beschriebenen Phänomenen liegt demzufolge der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit.

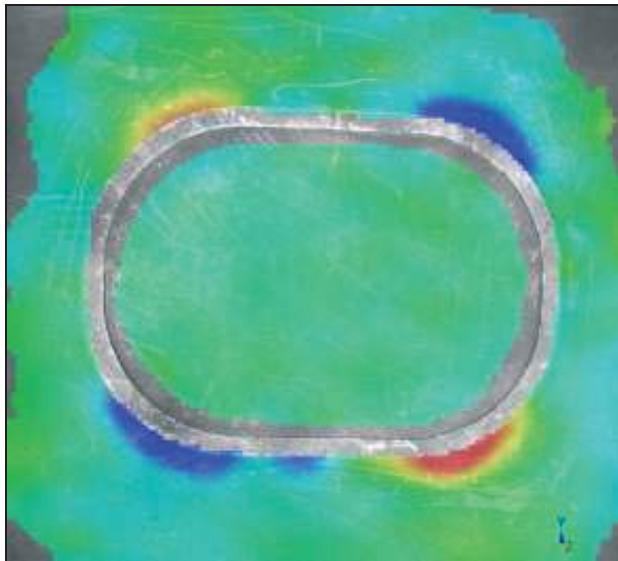


BILD 8. Lokale Effekte an einem Fensterrahmen; Rumpfschale unter Schublast; erfaßt und dargestellt mit ARAMIS

Die entscheidende Herausforderung besteht also in der korrekten Abbildung der an den Schalenrändern geforderten verteilten Lasten. Die Rumpfschale an sich stellt eine Leichtbaustuktur dar, die in Hautnormalenrichtung sehr empfindlich auf Laststörungen reagiert. Überdies existieren an deren Rändern keine Lasteinleitungspunkte, da es sich um ein freigeschnittenes Stück aus dem Rumpf handelt. Die Empfindlichkeit gegenüber Steifigkeitssprüngen hervorgerufen durch Lasteinleitungselemente ist gleichermaßen hoch. Im Widerspruch dazu stehen die steigenden Forderungen an abzubildenden Lasten, insbesondere Kombination daraus. Die Belastungen umfassen einen Bereich von Ermüdungszyklen über Restfestigkeitsbestimmung bis hin zu einachsigen Bruchlasten wie dem Berstversuch unter Überdrucklast. In gleicher Weise herausfordernd ist der inhärenten Anspruch, eine Testtechnologie für alle Rumpfbereiche in Umfangsrichtung bereitstellen zu können.

Durch das zuverlässige Erreichen der erforderlichen Versuchsqualität, speziell zu Themen wie Hautfelder, -stoße und -reparaturen, bei vertretbarem Aufwand erweiterte sich das diskutierte Aufgabenspektrum. Immer stärker rücken Untersuchungen kleiner und mittelgroßer Öffnungen in den Vordergrund. Komplexe Lastkombinationen für Rumpfschalen aus den Quadrantengrenzen, wie seitlich unten, stehen durch die Eröffnung des Lastbereiches bis teilweise an die Grenze des Nachbeulverhaltens im Interesse der Schalententwickler. Die Eignung der Einzelschalenversuche zur experimentellen Beurteilung von Topologie, Topographie und Technologie wird als Mittel zur bestmöglichen Vorbereitung auf die Installation einer ausgereiften Schale in einem der selteneren und langwierigen Tonnenversuche verstanden.

#### 4.2. Versuchseinrichtung für aktuelle und zukünftig komplexe Untersuchungsanforderungen an Flugzeugrumpfschalen

Bereits die Versuchsstände mit schwimmend gelagerten Rumpfschalen decken den erheblichen Bedarf konventioneller Anforderungen aktuell sowie zukünftig ab. Sie basieren auf einer gegenüber den Rumpfschalen hochgradig steifen, den Kraftfluß schließenden Struktur. Erst in unmittelbarer Schalennähe wird dieses Verhältnis durch Verzweigen der Lastpfade und Ausdünnen der Bauteile verlassen. Die Rumpfschale ist auf einer imaginären Rumpfmantelfläche verschiebbar an die Umgebung gefesselt.

Anders stellt sich die Situation im geschlossenen Ersatzquerschnitt dar. Im hier behandelten Fall des Einzelschalenversuchs ergänzt der Druckkasten die Rumpfschale zu einer in ihrer Gesamtheit modellierten Druckröhre. Dies gilt für das Verhalten unter Einwirkung einzelner Lastkomponenten wie auch für das Zusammenspiel der Lasten. Druckkasten und Rumpfschale erfahren gemeinsame globale Dehnungen. Mit Blick auf das Testspektrum ergeben sich für den weichen Druckkasten besondere Herausforderungen folgender Art:

- Einsatz als Druckbehälterbauteil
- Durchleitung des Schubflusses
- Aufprägung der Tangentiallasten der Rumpfstruktur auf die Rumpfschale
- Große Nachgiebigkeit in Längsrichtung zwischen den Flanschen
- Größere Bruchdehnung der Längsflansche als die der Rumpfschale

Mit diesen Prämissen gestaltete die IMA GmbH Dresden einen GFK-Kasten (siehe BILD 9), dessen geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften auf eine bestimmte Klasse von CFK-Rumpfschalen abgestimmt ist. Die vorgestellte Erstauslegung bezieht sich auf Anforderungen aus Forschung und Entwicklung im EMIR-Projekt innerhalb des LuFo II -Programms.



BILD 9. Weicher Druckkasten

Zu Beginn der Belastungsphase einer jeden Prüfschale sind Messungen zur Feinabstimmung der aktiven Lasten zwingend erforderlich. Sie beginnen mit den Erwartungswerten aus der numerischen Simulation des bestmögli-

chen Verhaltens der Rumpfschale auf dem Prüfstand. Insbesondere die Abbildung der Tangentiallasten, welche proportional mit dem Überdruck geführt werden, wird durch stufenweise Veränderung der querschnittskorrigierenden Sekantenkraft auf den schalenspezifischen Arbeitsbereich eingestellt. Zur Überwachung und Feineinstellung werden Dehnungen beispielsweise an:

- der Längslasche der Rumpfschale
  - Haut und Spanten
  - dem Längsflansch des Druckkastens sowie
  - den Druckkastenlamellen
- eraßt.

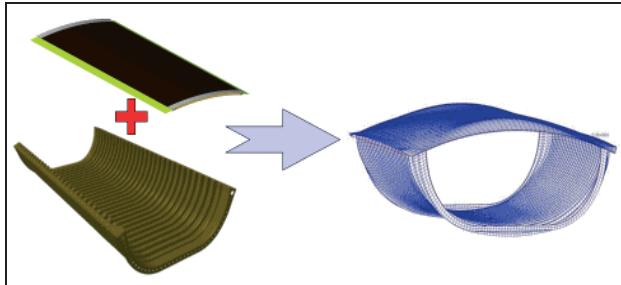


BILD 10. Prinzip des geschlossenen Ersatzquerschnitts

Der derzeit neueste Schalenprüfstand ist so konzipiert, daß verschiedene aber ähnliche Druckröhren gemäß der Prinzipdarstellung in BILD 10 installiert werden können. Die Druckröhrenlänge wurde stufenweise variabel gestaltet. Die Längslasten sind gleichberechtigt in beiden Richtungen nutzbar, auch innerhalb eines simulierten Flugzyklus'. Hierbei kann ein Bereich der globalen Längsdehnung von bis zu  $\pm 1,5\%$  ausgeschöpft werden. Die markantesten Werte der Leistungsbeschreibung sind BILD 11 zu entnehmen. Damit gelingt es, dem mittlerweile sehr hohen Anspruch an experimentellen EinzelschalenSimulationen vollständig gerecht werden zu können. Darüber hinaus decken die geschaffenen Möglichkeiten Forderungen aus direkt nachfolgenden Aufgaben bereits ab.

<b>Leistungsdaten</b>	
<b>Geometrie</b>	
• Radius	1975 ... 2820mm
• Breite	1550mm
• Länge	1900 ... 3400mm
• Dicken bis zu	50mm
• Anzahl der Spante	0 ... 6
<b>Lasten</b>	
• Längskraft (Schale) (Membran im Mittel)	$\pm 2800\text{kN}$ $\pm 1600\text{N/mm}$
• Torsionsmoment (Membran im Mittel)	$\pm 640\text{kNm}$ $\pm 280\text{N/mm}$
• Überdruck	0 ... 0,15MPa

BILD 11. Leistungsmerkmale zu BILD 12

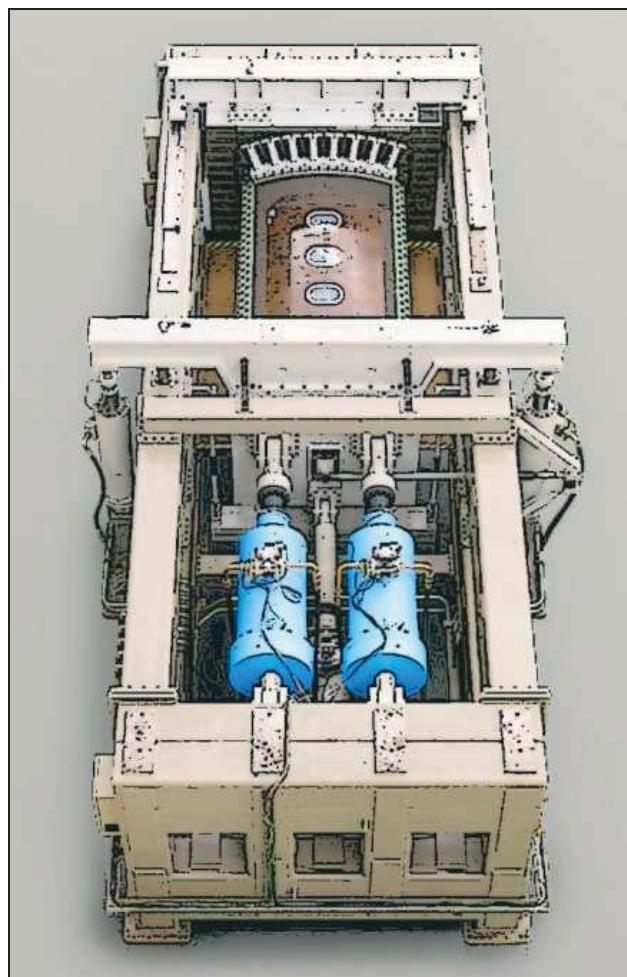


BILD 12. Neuester Schalenprüfstand der IMA GmbH Dresden

#### 4.3. Demonstration der Simulationsqualität an einer CFK-Sandwich-Schale

Gemäß den bisherigen Ausführungen ist der Kraftfluß innerhalb der einzelnen Bauteile einer Rumpfschale das ausschlaggebende Qualitätsmerkmal für eine experimentelle Simulation. Liegt, wie bei der hier beschriebenen Prüfstandsqualifikation, eine homogen gestaltete, ungeschädigte Rumpfschale vor, so ist die periodische Gleichmäßigkeit der Beanspruchungsverteilung das zu erfüllende Qualitätskriterium.



BILD 13. Prüfschale zur Bewertung der Simulationsqualität

Für die Bewertung dieses Kriteriums wurden Messungen an einer biegeempfindlichen Sandwich-Schale herangezogen. Biegeempfindlich meint in diesem Zusammenhang die sofort in der Haut wirksamen Störungen unter Überdrucklast, hervorgerufen durch Abweichungen von den idealen Sektorrandbedingungen (siehe BILD 2). Dünne H äute werden innerhalb eines Hautfeldes nur marginal von vergleichbaren Effekten beeinflußt. Die Kissenbildung und die Membranlasten dominieren den Beanspruchungszustand. Störungen verbleiben weitestgehend im Spant.

Belastet wurde die Rumpfschale im Rahmen der Qualitätsbewertung mit folgenden Einzellasten:

- Längslast
- Überdruck ( $\epsilon_x = 0$ )
- Schub

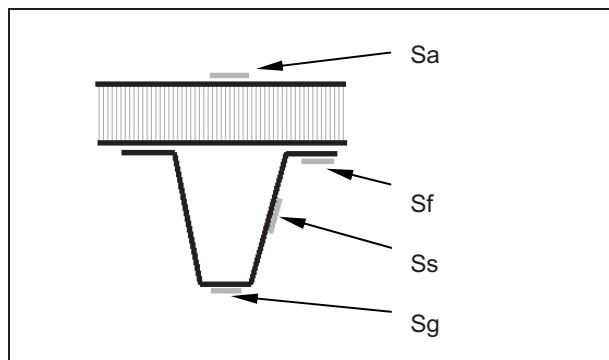


BILD 15. Anordnung der Dehnmeßstreifen im Spantbereich

Der erreichte Grad der Umsetzung ist anhand einer kleineren Auswahl der in Diagrammen BILD 14 erfaßten Meßdaten geschildert. Zum besseren Verständnis wurden in BILD 15 die radial verschiedenen Meßpositionen für Umfangsdehnungen in Spantnähe skizziert.

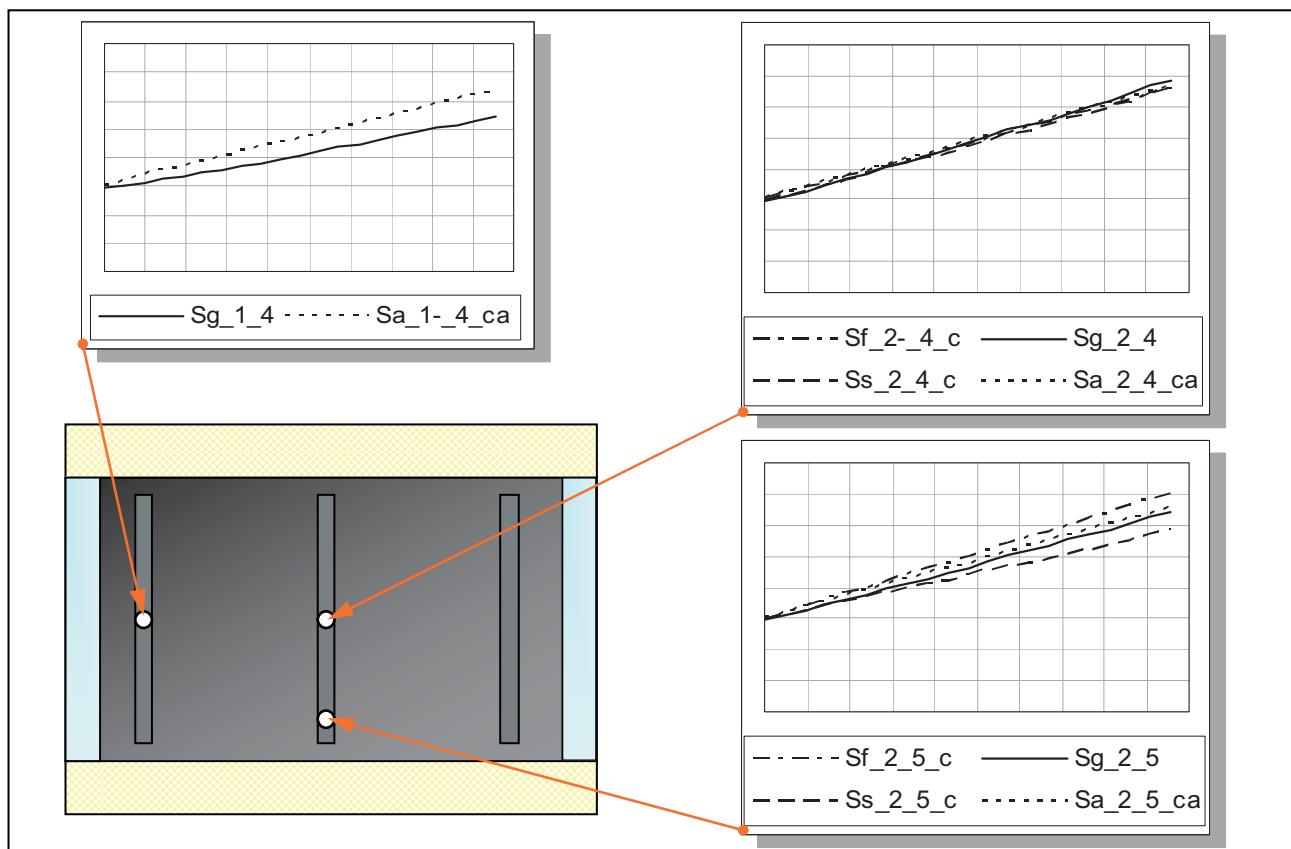


BILD 14. Position der Meßstellen; Dehnungsverlauf über Laststufen des Überdrucks aufgetragen

Es stellte sich für jede der drei Lastkomponenten ein gleichmäßiger Dehnungszustand an über die gesamte Schalenhaut verteilten Meßstellen ein. Die Hautbiegung konnte als unbedeutend eingeschätzt werden. Insbesondere beim Überdrucklastfall gelang die Lastverteilung zwischen Haut und Spannen entsprechend den Erwartungen aus der Konzepterstellung sowie den entwicklungsbegleitenden numerischen Simulationen.

#### 4.4. Intuitiv orientierte Auswertehilfen lokal erfaßter Meßdaten

Die zweidimensionale Erfassung und Darstellung von Verschiebungen respektive Dehnungen an der Bauteiloberfläche setzt sich mit Einführung der digitalen optischen Meßsysteme zunehmend durch. In diesem Prozeß werden Auswertealgorithmen geschaffen, die den komfortablen der numerischen Simulationen immer ähnlicher werden. Das reicht bis zur Gegenüberstellung der Ergebnisse in gemeinsamen Ansichten. Grundvoraussetzung

für den Einsatz dieser optischen Verfahren ist jedoch die freie Sicht auf die interessierenden Bereiche des Prüfkörpers. Ist dies gegeben, lassen sich beispielsweise Dehnungsgradienten über Steifigkeitsänderungen oder an Stellen konzentrierten Kraftfluß' eindrucksvoll und sinnlich darstellen (siehe auch BILD 8). Bisher war eine ähnlich sinnliche Präsentation lokaler Meßdaten, akquiriert von Dehnmeßstreifen oder Glasfasergittern, unüblich. Vielmehr füllen unzählige Diagramme die Anlagen der Prüfberichte über Untersuchungen an komplexen Strukturen. In BILD 14 wurde diese klassische, automatisierte Art der Datenaufbereitung genutzt.

Im Unterschied dazu entstand während der Inbetriebnahme des vorgestellten Schalenprüfstands ein vorerst intern genutztes Werkzeug, welches die Koordinaten der Meßstellen als Ursprung für die in Meßrichtung orientierten Diagramme der einzelnen Sensoren nutzt. Es kann ebenfalls einen räumlichen Eindruck der erfaßten Meßwerte, ähnlich dem der optischen Verfahren, wiedergeben. Darüber hinaus ist es dem Betrachter gestattet, ähnlich wie in der numerischen Simulation, sich interaktiv über die Oberfläche des Teils zu bewegen, sich Details vergrößert zu betrachten und, besonders hilfreich, mit dem Mauszeiger Einzelwerte abfragen zu können. Unterstützende graphische Funktionalitäten, wie das Ausblenden weiter entfernt liegender Diagrammgitter, sind bereits enthalten. Dies verbessert besonders die Aussagekraft einer Überblicksdarstellung, für die die permanent sichtbaren Achsen und Kurven Schlüsse auf die räumliche Verteilung der Beanspruchung zulassen.

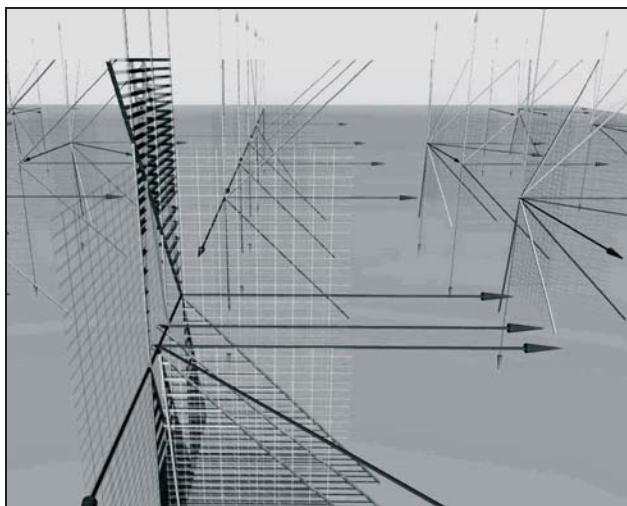


BILD 16. Lokale Dehnungsverläufe über Lastschritten; räumliche Anordnung gemäß der Applikation auf der Rumpfschale

Im hier abgebildeten Diagramm (BILD 16) wurden Laststufen eines statischen Überdruckversuchs über den Dehnungswerten aus Messungen mit Dehnmeßstreifen aufgetragen. Auch hier liegt der Ursprung des jeweiligen Diagramms in der Position des Sensors. Die Abszisse ergibt sich aus der Meßrichtung und liegt tangential zur Oberfläche. Die Oberflächennormale dient als Ordinate. Für ortsgleiche Sensoren wie Rosetten von Dehnmeßstreifen liegen mehrere Diagrammsprünge ineinander. Die Abszissenrichtungen spiegeln entsprechend die erfaßten Komponenten wider.

## 5. AUSBLICK

Anknüpfend an die Ausführungen zur Datenauswertung ist festzustellen, daß die derzeit interaktiv lesbaren Meßwerte im Einzelfall mit Ergebnissen numerischen Simulationen o.ä. ausschließlich händische Vergleiche ermöglichen. Zukünftig ist eine Zusammenführung mit den Ergebnissen sowohl der optischen Verfahren als auch der numerischen Simulation angestrebt. Somit könnten effizient Bereiche für detailliertere Untersuchungen identifiziert werden. Ideal er Weise soll das Werkzeug später noch die Ausgabe in klassischer Diagrammform unterstützen, welche für Eingeweihte unbestritten die detailliertesten Rückschlüsse zuläßt.

Die Entwicklung von Technologien zur Prüfung einzelner Rumpfschalen wird auch zukünftig fortgesetzt werden. Der bisherige Stand beweist deutlich, daß Untersuchungen an Einzelschalen, die durchaus Unregelmäßigkeiten wie Fenster aufweisen können, sinnvolle Aussagen liefern. Das liegt nicht zuletzt an den kontinuierlich verbesserten Randbedingungen innerhalb der experimentellen Simulation. Der direkte Schluß daraus ist, den nutzbaren Untersuchungsbereich zu vergrößern, indem die Prüforschalen vergrößert werden. Dadurch ließe sich der Anwendungsbereich erweitern und Öffnungen rücken stärker in den Vordergrund der Aufgaben. Denkbar erscheinen aus heutiger Sicht Einzelschalensuchen mit unskalierten Notausstieg. Diese Entwicklungsrichtung entspricht der kontinuierlichen Fortsetzung historisch gewachsener Konzepte.

Diese gewachsenen Konzepte sind insbesondere durch die Bemühung, sehr gleichmäßige Randbedingungen für den gesamten Umfang bereitzustellen, charakterisiert. Den obigen Gedanken der größeren Prüforschalen aufgreifend könnte die Simulation einsatznaher Lastbedingungen aber auch etwas anderes bedeuten. Es scheint sich daraus die Notwendigkeit zu ergeben, definierte Schnittlastverläufe auch in einem Schalenprüfstand aufprägen zu können. Im einfachsten Fall handelt es sich um den Längslastgradienten der Seitenschalen, welcher sich durch die Rumpfbiegung einstellt. Ob und in welchem Umfang daraus Bewertungseinflüsse entstehen, müssen Diskussionen über die aktuell bei Flugzeugherstellern angewandten rechnerischen Nachweismethoden zeigen.

## 6. REFERENZEN

- [1] H. Schmidt, B. Schmidt-Brandecker, N. Ohrloff, Th. Fleischer (1999) in: *Current status of research and development activities for the fuselage of a large Airbus aircraft*, proceedings of the 20<sup>th</sup> ICAF symposium, Seattle
- [2] B. Borgonje, M. Escobedo Medina (2007) in: *Lessons learnt from the Full-Scale Fatigue Test 'Megaliner Barrel' – F&DT Analysis of the Glare Structure*, Proceedings of the 24<sup>th</sup> ICAF Symposium, vol. I, p. 400, L. Lazzeri and A. Salvetti (Ed.), Publ. Pacini, Naples
- [3] L. le Tellier, F. Repiton (2007) in: *Full-scale testing and analysis of Falcon 7X curved fuselage panels with Butt-joints*, Proceedings of the 24<sup>th</sup> ICAF Symposium, vol. I, p. 340, L. Lazzeri and A. Salvetti (Ed.), Publ. Pacini, Naples

- [4] D. R. Ambur, J. A. Cerrof, J. Dickson (1995) in: *D-Box Fixture for Testing Stiffened Panels in Compression and Pressure*, AIAA Journal of Aircraft, vol. 32-6, p. 1382
- [5] R. W. A. Vercammen, H. H. Ottens (1998) in: *Full-scale fuselage panel tests*, Proceedings of the 21st ICAS Congress, TP 98148