

DYNAMISCHE SIMULATIONEN FÜR DEN ENTWURF UND ZUR VALIDIERUNG VON FLUGGASTSITZEN

C. Olschinka, olschinka ingenieurbüro, 20535 Hamburg, Deutschland
A. Schumacher, HAW Hamburg, 20099 Hamburg, Deutschland
H. Krüger, AIDA Development, 21079 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Trotz einiger Schwierigkeiten kann die dynamische Simulation heute einen wesentlichen Beitrag in der Entwicklung von Fluggastsitzen leisten. Gerade die Auslegung der Sitze hinsichtlich der zu erwartenden Eigenschaften unter Notlandebedingungen ist ohne die dynamische Simulation nicht denkbar oder zumindest sehr teuer. Dieser Beitrag beleuchtet die Möglichkeiten aber auch die Schwächen der Crash-Simulation bei der Entwicklung der Fluggastsitze. Es werden die zulassungs- und entwicklungsbegleitenden Einsatzmöglichkeiten der Crash-Simulation zur Validierung von Sitzkonstruktionen beschrieben. Des Weiteren wird ein Ausblick auf den Einsatz von Optimierungsmethoden im Entwurfsprozess hinsichtlich der Crash-Eigenschaften des Sitzes gegeben.

1. ÜBERBLICK

Mit dem weltweit zunehmenden kommerziellen Flugverkehr steigen auch beständig die Anforderungen an die Luffahrtsicherheit. Eine wichtige Rolle hierbei spielt seit einigen Jahren auch die passive Sicherheit eines Flugzeugs, die sich verstärkt in den Zulassungsanforderungen für Fluggastsitze widerspiegelt. Die Entwicklung von Fluggastsitzen ist von einer Reihe restriktiver technischer Anforderungen insbesondere an das mechanische Verhalten der Sitzstrukturen unter Notlandebedingungen begleitet. Heute weiß man, dass ein Fluggast bei einem Unfall gute Überlebenschancen hat, wenn er nach dem Unfall in der Lage ist, das Flugzeug selbstständig zu verlassen [1]. Daher fokussieren die gesetzlichen Vorschriften für das Crash-Verhalten von Fluggastsitzen im Wesentlichen auf nachzuweisende Verletzungskriterien und der Gewährleistung von Überlebensraum für den Passagier.



BILD 1. Forschungssitz in 3er-Konfiguration

Bild 1 zeigt eine typische Fluggastsitzkonfiguration. Die technische Entwicklung eines solchen Sitzdesigns, insbesondere im Bereich der Sitzbeine, ist maßgeblich durch die vorgenannten Anforderungen getrieben. Die zuverlässige

Prognose des mechanischen Verhaltens eines Sitzes unter Notlandebedingungen ist daher für die Sitzentwicklung essentiell und wird derzeit im Wesentlichen durch aufwändige Tests auf Crash-Bahnen validiert. Um Zeit und Kosten in diesem Prozess zu sparen, können die Werkzeuge der dynamischen Simulation („Crash-Simulation“) und der Strukturoptimierung in Zukunft einen wichtigen Beitrag leisten. Im Folgenden ist zunächst der Einfluss der Sitzzulassung auf den Entwurfsprozess erläutert.

2. ASPEKTE DER SITZZULASSUNG

2.1. Gesetzliche Vorschriften

Die Zulassung von Fluggastsitzen für die zivile Luftfahrt unterliegt im europäischen Raum der European Aviation Safety Agency (EASA) und im nordamerikanischen Raum der Federal Aviation Administration (FAA). Die teilweise harmonisierten Vorschriften dieser Behörden definieren unter anderem die so genannten „Airworthiness Standards“ in CS/FAR Part 25. Die Paragraphen 25.561 und 25.562 legen die für die Sitzentwicklung entscheidenden Emergency Landing Conditions fest, denen ein im Flugzeug eingebauter Sitz widerstehen muss. In Paragraph 25.561 sind im Wesentlichen die nachzuweisenden statischen Lasten zusammengefasst, die nach aktueller Zulassungssituation durch dynamische Lasten in Paragraph 25.562 erweitert wurden. Bild 2 gibt einen Überblick über die Zulassungslandschaft. Während nach der veralteten, so genannten 9g-Regel die Tests mit statischen Ersatzlasten durchgeführt wurden, sind nach der aktuellen 16g-Regel dynamische Tests Teil des Zulassungsverfahrens. Die weniger kritischen statischen Tests bleiben nahezu unveränderter Bestandteil der Zulassung. Beide Regeln unterscheiden die reine Sitzzulassung (seat certification) und die Sitzzulassung im Flugzeug (seat in A/C certification). Die CS/FAR-Vorschriften regeln lediglich die Zulassung der Sitze im Flugzeug. Nach CS/FAR zugelassene Sitze sind in einer einmal zugelassenen Sitzanordnung (seat layout) im Flugzeug nicht veränderbar, ohne dass

die Zulassung erlischt. Daher werden Sitze in der Regel nach Minimalanforderungen gemäß TSO C127a zugelassen, deren Gegenstand lediglich der Sitz als solcher ist. Ein so zertifizierter Sitz kann in einem veränderten, aber zertifizierbaren Sitzlayout nachträglich für den Einbau in ein Flugzeug zugelassen werden.

Zulassungsrahmen	9g-Regel (alt)		16g-Regel (neu)	
	Sitz	Einbau	Sitz	Einbau
Zulassungsvorschrift	TSO C39b	FAR 25.561	TSO C127a	25.561/25.562 FAR
Referenzdokument	NAS 809	-	SAE AS 8049b	AC 25.562-1A
Statischer Test	9g vorwärts	9g vorwärts	9g vorwärts	9g vorwärts
	3g seitwärts	3g seitwärts	4g seitwärts	4g seitwärts
	2g aufwärts	3g aufwärts	3g aufwärts	3g aufwärts
	6g abwärts	6g abwärts	6g abwärts	6g abwärts
	-	1,5g rückwärts	1,5g rückwärts	1,5g rückwärts
Dynamischer Test	-	-	16g vorwärts	16g vorwärts
	-	-	14g abwärts	14g abwärts

BILD 2. Übersicht der Zulassungsvorschriften (aus [2])

Sowohl der Zulassung nach CS/FAR 25.561/562, als auch der Zulassung nach TSO C127a liegen nach derzeit anzuwendender 16g-Regel dynamische Tests zugrunde, denen der Sitz widerstehen muss und die gegenüber der statischen Zulassung deutlich verschärft sind. Die aktuell gültigen Verweisdokumente, die die Zulassungsanforderungen inhaltlich detaillieren, sind für die CS/FAR25.562 das Advisory Circular AC-25.562-1A und für die TSO C127 A die Vorschrift SAE AS-8049b der Society of Automotive Engineers (Performance Standards for Seats in Civil Rotorcraft, Transport Aircraft and General Aviation Aircraft). Beiden Vorschriften liegen ein 16g-Forward-Test und ein 14g-Downward-Test zum Nachweis der Crash-Sicherheit zugrunde. Die Spezifikation der dynamischen Tests ist nach beiden Vorschriften im Wesentlichen identisch. Für die Zulassung nach TSO C127a werden nachzuweisende Verletzungskriterien jedoch nur für eine Standardsitzreihe mit führender Sitzreihe ermittelt. Für die Zulassung im Flugzeug nach Paragraph 25.562 muss dies grundsätzlich für jeden Sitz der Anordnung nachgewiesen werden. Die genannten Versuche stellen die gesetzliche Basis für die Zulassung im kommerziellen Flugverkehr dar. Eine Reihe weiterer Spezifikationen und Anforderungen außerhalb dieses Rahmens definieren die Fluggesellschaften und die Fluggesellschaften, etwa bezüglich maximaler Interface-Lasten am Kabinenboden. Die gesetzlich geforderten dynamischen Tests sind im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

2.2. Zulassungstests

In der Zulassung der Sitze stellt vor allem der dynamische 16g-Forward-Test eine erhebliche Hürde dar. Bild 3 zeigt den in Bild 1 dargestellten Forschungssitz in einem 16g-Strukturtest (zur Ermittlung der HIC-Verletzungskennwerte wird der Sitz allerdings in „Row-To-Row“-Anordnung mit führender Sitzreihe getestet). Die Tests werden typischerweise auf einer Crash-Bahn und häufig als Inverstest durchgeführt. Dazu wird eine Sitzreihe (hier 3er-Sitz) auf einem Schlitten montiert, mit Dummies besetzt und mit dem vorgeschriebenen Puls entgegen der Sitzrichtung beschleunigt.

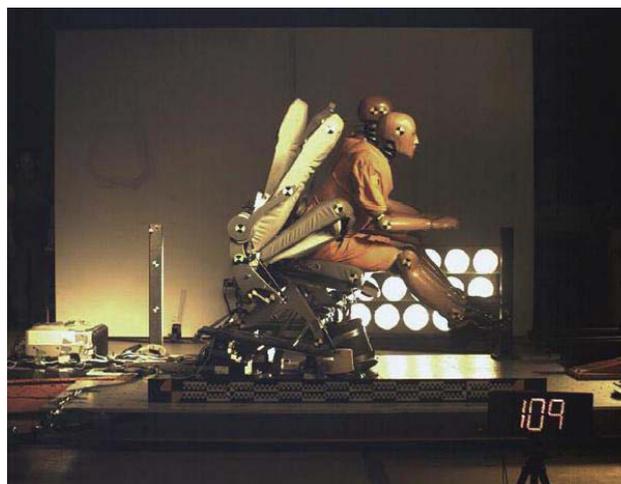


BILD 3. Dynamischer 16g-Test auf der Crash-Bahn

Der 14g-downward-Test wird in einer ganz ähnlichen Konfiguration durchgeführt, nur dass hier der Sitz mit einer Neigung von 60° zur Horizontalen montiert wird, um die Abwärtsbeschleunigung auf der horizontalen Crash-Bahn zu realisieren. Bild 4 gibt eine Übersicht über die zu realisierenden Crash-Szenarien. Der dreieckige Beschleunigungspuls von 16g bzw. 14g muss innerhalb der Peak Time t_p erreicht werden. Im 16g-Forward-Lastfall wird der Sitz um 10° gedreht um die Hochachse auf dem Schlitten montiert, um einen schrägen Auftreffwinkel in einer Notlandesituation zu simulieren.

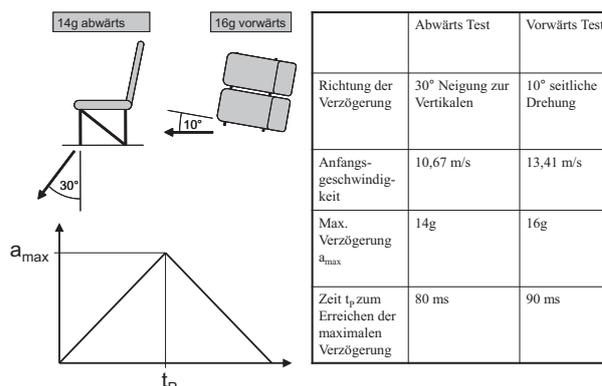


BILD 4. Detaillierte Versuchsszenarien 14g/16g-Test

Zusätzlich ist im 16g-Forward-Lastfall eine Vorverformung des Kabinenbodens zu berücksichtigen. Dazu muss im Versuch eine Sitzschiene am Kabinenboden um 10° nach vorn geneigt werden, die jeweils andere Seite um 10° nach innen gerollt. Der Sitz wird so verformt auf dem Versuchsschlitten montiert. Diese Vorverformung stellt in der Regel schon eine erhebliche Strukturbeanspruchung dar, so dass der 16g-Crash auch deutlich kritischer zu bewerten ist als der 14g-Test. Bild 5 zeigt schematisch die vorgeschriebene Vorverformung des Sitzes.

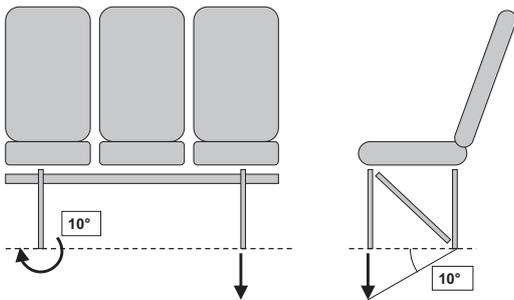


BILD 5. Vorverformung im 16g-Test schematisch

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, muss ein dynamisch zugelassener Sitz den Belastungen aus den dynamischen Tests widerstehen, sowie die zulässigen Grenzen für Verletzungskennwerte einhalten.

Kennwert	Kritisch für
Deformation/Vorverlagerung	16g fwd
HIC-Wert	16g fwd
max. Wirbelsäulenbelastung	14g dwd
max. Oberschenkelbelastung	16g fwd

TAB 1. Übersicht Kennwerte der dynamischen Tests

Für die beiden dynamischen Tests sind dabei unterschiedliche Kennwerte entscheidend. Grundsätzlich muss in beiden Tests der primäre Lastpfad intakt bleiben, d.h. ein Kollabieren der Sitzstruktur unter den gegebenen Belastungen ist unbedingt zu vermeiden und die Funktionsfähigkeit und Position der Gurte ist sicherzustellen. Die wichtigsten Kennwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Während im 14g-Downward-Lastfall hauptsächlich die Druckbeanspruchung der Wirbelsäule des Passagiers interessant ist, muss der 16g-Lastfall einer Reihe von herausfordernden Ansprüchen genügen. Gerade im 16g-Test besteht eine erhebliche Gefahr für Kopfaufschläge an der jeweils führenden Sitzreihe. Aus langjähriger Erfahrung mit Automobil-Crashtests weiß man, dass ein Kopfaufschlag zu Verletzungen vor allem durch starke, kurzzeitige Beschleunigungen des Kopfes führen kann. Ein Maß für das Risiko einer solchen Verletzung ist der HIC-Wert (Head Injury Criterion), der als gewichtetes Integral über den zeitlichen Verlauf der Kopfbeschleunigung eines Dummies im 16g-Test ermittelt wird. Ein Maximalwert von 1000 gilt hier als überlebbar, dazwischen existieren Abstufungen zur Einschätzung der wahrscheinlichen Verletzungsschwere. Weiterhin ist nachzuweisen, dass ein Knieaufschlag an der führenden Sitzreihe zu nicht zu übermäßigen Drucklasten im Oberschenkel führt. Zur Gewährleistung von Fluchtraum für Passagiere ist weiterhin die Vorverlagerung des Sitzes auf 3" zu begrenzen und ein verbleibender Mindestabstand zur führenden Sitzreihe von 6" nicht zu unterschreiten.



BILD 6. Sitzanordnung mit Dummys für 16g-Test

Um all diese Faktoren für verschiedene Sitzkonstruktionen einheitlich bewertbar zu machen, muss ein Sitzhersteller im Vorfeld der Zulassung die für die Strukturbeanspruchung kritische Besetzung des Sitzes festlegen und sinnvoll nachweisen können. Bild 6 zeigt einen Schlittenaufbau für den 16g-Test mit Dummybesetzung. Im dargestellten Szenario ist die für den Test der Sitzstruktur kritische Besetzung eine asymmetrische mit nur zwei Dummys, wodurch die Strukturbeanspruchung in Verbindung mit der um 10° seitlich wirkenden Beschleunigung linksseitig verstärkt wird (vgl. Bild 4).

3. DYNAMISCHE SIMULATION

3.1. Potenzial

Die dynamische Simulation wird neben vielen anderen Bereichen seit Jahrzehnten erfolgreich in der Crash- und Insassensimulation in der Automobilentwicklung eingesetzt, um die Fahrzeugsicherheit und Verletzungsrisiken bei einem Unfall zu prognostizieren und zu bewerten. Die Methode beruht wesentlich auf der Berechnung numerischer, d.h. zeitlich und räumlich diskretisierter Modelle von Bauteilen und Personen.

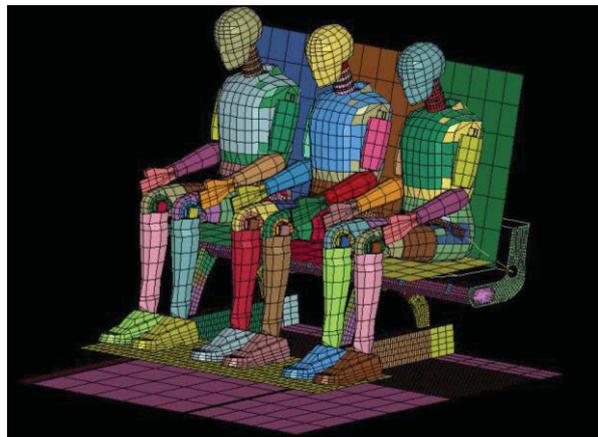


BILD 7. Einfaches Finite-Elemente-Modell für 16g-Versuch

Die räumliche Diskretisierung erfolgt mit der Methode der finiten Elemente (FEM), die zeitliche Diskretisierung führt mathematisch auf die Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungssysteme. Bild 7 zeigt ein einfaches numerisches Berechnungsmodell. Zur Berechnung solcher Systeme gibt es eine Reihe kommerzieller Software. Für die Simulationen aus diesem Beitrag wurde als Berechnungssoftware LS-DYNA® der Firma LSTC verwendet. Mit der dynamischen Simulation lässt sich das zeitabhängige Verhalten einer Sitzstruktur hochauflösend für den Bereich der etwa 180ms Versuchsdauer eines 16g-Tests (vgl. Bild 4) verfolgen. Das Rechenmodell liefert in diesem Zeitraum grundlegende mechanische Aussagen über die Belastung des Sitzes und den Einfluss auf den Passagier. Es wird damit zu einer Bewertungsgrundlage zum Beispiel für

- Deformationen und Beanspruchungen in ausgewählten Strukturbereichen,
- die Lasteinleitung in den Kabinenboden (Interface-Lasten) während des Crashes,
- Verletzungskriterien (HIC-Wert, Belastungen der Extremitäten) und
- die Abschätzung von Kopftrajektorien.

Manche dieser Kriterien werden typischerweise mit statischen Berechnungsverfahren näherungsweise beurteilt (Interface-Lasten und lokale Beanspruchungen), andere können mit statischen Berechnungsverfahren überhaupt nicht erfasst werden (Verletzungskriterien, Kopftrajektorien). Die Komplexität der physikalischen Zusammenhänge zeigt außerdem, dass die Aussagen aus statischen Simulationen häufig zu ungenau sind, da deren Annahmen nicht die physikalische Beschaffenheit des dynamischen Versuchs widerspiegeln.

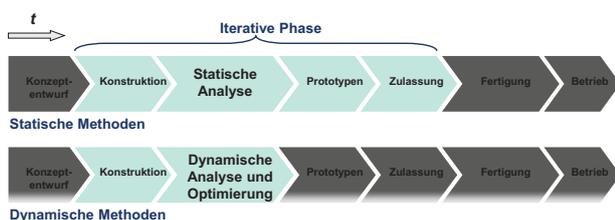


BILD 8. Entwicklungsprozess mit und ohne dynamische Simulation

Bild 8 zeigt schematisch den Entwicklungsablauf für einen Fluggastsitz. Da der Entwicklungserfolg eines Fluggastsitzes wesentlich von der Performance im dynamischen Zulassungstest abhängt, kann der Einsatz der dynamischen Simulation schon während des Entwicklungsprozesses notwendige Prozessschleifen reduzieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Sitzentwurf den Zulassungstest besteht, steigt durch Nutzung der dynamischen Simulation merklich. Daneben kann die dynamische Simulation effizient für Konzeptstudien, Toleranzanalysen (Einfluss von Streuungen zum Beispiel in der Fertigung) und Entwurfsoptimierungen eingesetzt werden.

3.2. Sitzzulassung in der Zukunft

Um das Problem der hohen Kosten- und Zeitaufwendungen der Sitzentwickler für Zulassungstests beherrschbar zu machen, schlagen die Zulassungsbehörden Simulationen, insbesondere die dynamische Simulation mithilfe der Finite-Elemente-Methode als Ergänzung für die aufwändigen physikalischen Zulassungstests vor (Advisory Circular AC-20146). Die Zulassung erfordert

dabei allerdings sehr gut validierte Modelle sowohl für die Sitzstruktur als auch für die Dummies. Die Simulation kann dabei eingesetzt werden, um die kritische Sitzkonfiguration und Installation im Flugzeug zu ermitteln, sowie um Sitzvarianten anhand eines mittels physikalischen Tests validierten Basissitzkonzepts nur über Simulationsmodelle zuzulassen. Die folgenden Abschnitte detaillieren exemplarisch die Einsatzmöglichkeiten der Simulation in diesem Zusammenhang.

3.3. Simulation des dynamischen 16g-Tests

Der 16g-Test stellt vor allem an die Mechanik der Sitzbeine die größeren technischen Anforderungen. Die zwei wichtigsten konkurrierenden Ziele bei der Abstimmung des Sitzverhaltens sind die Maximierung der Steifigkeit und gleichzeitig eine bestmögliche Energieabsorption. Eine ausreichende Steifigkeit des Sitzes ist erforderlich, um genügend Überlebensraum nach dem Crash zu gewährleisten (vgl. Tabelle 1). Zu große Deformationen oder gar ein Kollabieren der Sitzstruktur aufgrund geringer Steifigkeit können ein Einklemmen des Passagiers zur Folge haben. Gleichzeitig besteht die Gefahr, dass ein zu steifer Sitz wenig Energie absorbiert und so zu hohe Lasten in den Kabinenboden einleitet.

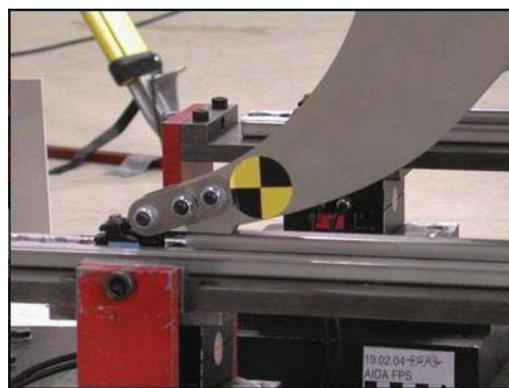


BILD 9. Sitzschiene im 16g-Test

Bild 9 zeigt eine Standard-Sitzschiene eines Flugzeugs (hier beim Test Setup). Die über die Fittings in den Kabinenboden einzuleitenden maximalen Lasten werden seitens der Flugzeughersteller streng begrenzt. Ein Abriss des Sitzfußes an der Sitzschiene oder ein Ausriss der Sitzschiene selbst führt unweigerlich zur Nichterteilung der Sitzzulassung. Bild 10 zeigt den 16g-Test eines Forschungssitzes, der im Nachgang zum Versuch simuliert wurde. Der Sitz war für die Sitzschienenanbindung zu steif, so dass ein einseitiger Abriss erfolgte. In der Folge des Abrisses war am anderen Sitzbein ein Rissversagen im Bereich der Querrohranbindung zu beobachten, das zum Kollabieren der gesamten Sitzstruktur führte.

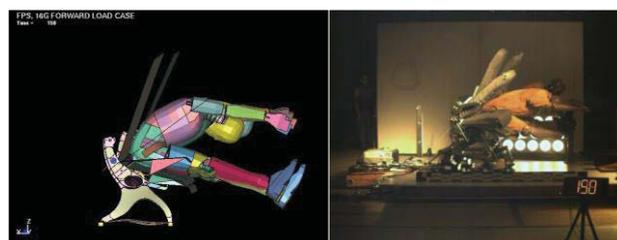


BILD 10. Vergleich 16g-Test in Simulation und Versuch

Der Sitz wurde mittels statischer Berechnungsverfahren ausgelegt. Die kritischen Interface-Lasten an der Sitzschiene und damit ein wahrscheinliches Ausreißen des Sitzbeins hätten mit der dynamischen Simulation vorhergesagt werden können. Bild 11 zeigt das Verhalten des Sitzes in der Simulation im Detail. Aufgrund der geringen Detaillierung der Sitzschiene im Modell konnte der Abriss am Boden nicht unmittelbar nachvollzogen werden, ein wahrscheinliches Versagen des Sitzbeins im Bereich des Querrohrs hätte aber ebenfalls mit der Simulation prognostiziert werden können.

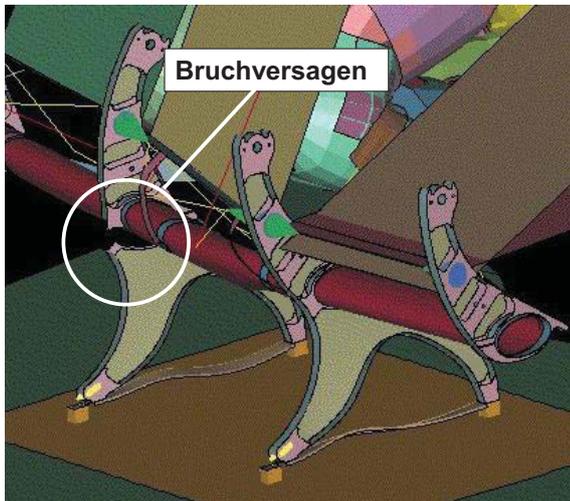


BILD 11. Versagen des Sitzbeins an der Querrohr-Anbindung

Der dargestellte Test ist nicht zum Nachweis des HIC-Werts geeignet, da lediglich eine Sitzreihe getestet wurde (hier: Strukturtest; die nicht validierten Dummies sind hauptsächlich zur Lasteinleitung in den Sitz geeignet). Da die Kopfbeschleunigungen aber in den Versuchsergebnissen vorlagen, konnte ein Maximalwert von etwa 25g mit der Simulation nachvollzogen werden.

3.4. Simulation von Vorverformungen

Für den 16g-Zulassungsversuch ist der Sitz einer Vorverformung zu unterziehen (vgl. Bild 5), die für die Sitzstruktur bereits eine erhebliche Beanspruchung darstellt. Dazu wird der Sitz entsprechend vorgespannt auf dem Versuchsschlitten montiert. Das zur Simulation des eigentlichen Crash-Vorgangs verwendete Verfahren (explizite Lösung der Bewegungsgleichungen) ist aufgrund hohen Rechenzeitbedarfs nur zur Berechnung für extrem kurze Zeiträume geeignet („high velocity impact“). Der Rechenaufwand steigt dabei vereinfacht etwa linear mit der Länge des betrachteten Zeitraums für den Crash. Die Vorverformung ist ihrer Natur nach anders als der eigentliche 16g-Puls ein statischer Lastfall. Um die Vorverformung zu realisieren, wird dazu ein gekoppeltes Berechnungsverfahren angewandt, das geeignet ist, beide Belastungen adäquat darzustellen. Dabei wird die Vorverformung mit einem impliziten Verfahren in einem Zeitraum von 60 Sekunden quasistatisch aufgebracht. Hierbei wird ein Sitzbein auf eine um 10° geneigte Kontaktfläche am Boden gezogen. Die so verformte Struktur wird mit einem expliziten Verfahren dem 16g-Puls unterzogen. Bild 12 veranschaulicht den zeitlichen Verlauf der Simulation. Der Wechsel des Berechnungsverfahrens wird in LS-DYNA innerhalb eines Berechnungslaufs automatisch vollzogen.

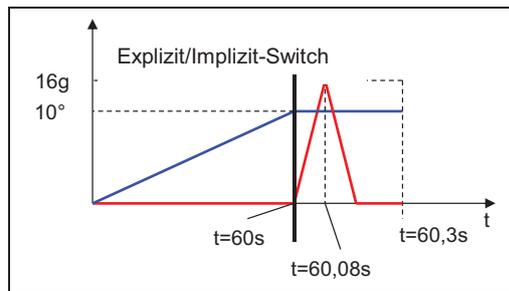


BILD 12. Vorverformung und 16g-Lastfall in gekoppelter Berechnung

Um die prinzipielle Eignung einer gekoppelten Analyse für 16g-Lastfälle mit Vorverformung nachzuweisen, wurde ein Sitz mit Ersatzmassen für die Dummy-Modelle simuliert. Das Modell, das Bild 13 zeigt, ist für die Untersuchung der Wirkungen des 16g-Pulses auf die Sitzunterstruktur unter Berücksichtigung der Vorverformungen geeignet. Es kann etwa verwendet werden, um die Vorverlagerung des Sitzes und lokale Beanspruchungen abzuschätzen.

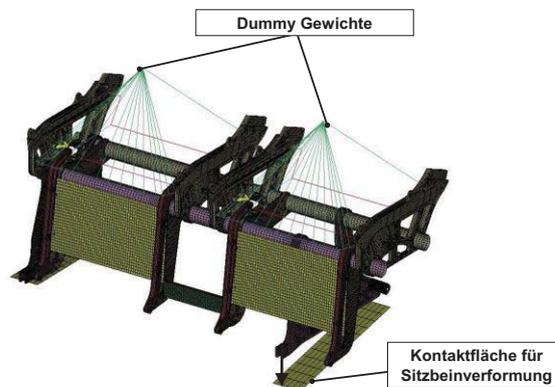


BILD 13. Berechnungsmodell für gekoppelte Analyse

In dem Modell entfallen die numerisch sehr sensiblen Kontakte zwischen Dummies und Sitzschalen. Außerdem wurde die Vorverformung aus numerischen Gründen zunächst nur einseitig aufgebracht. Bild 14 zeigt das Deformationsbild dieses Modells bei Erreichen der größten Vorverlagerung des Sitzes im 16g-Lastfall. Deutlich sichtbar ist, dass ein großer Anteil der Deformation aus dem vorderen Querrohr resultiert und hier offenbar eine zu geringe Steifigkeit problematisch ist.

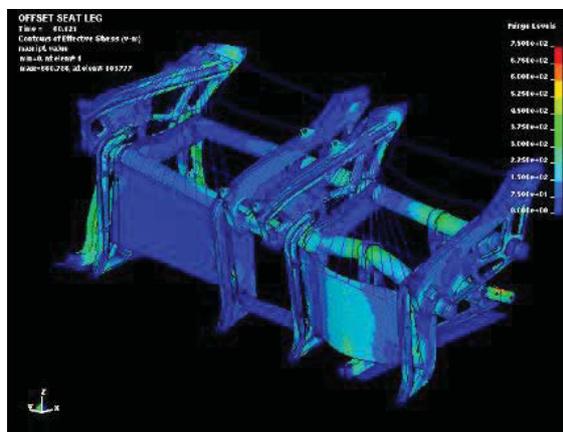


BILD 14. Deformationsbild des 16g-Lastfalls mit Vorverformung

Die Zuglasten aus den Sicherheitsgurten würden hier die hohen Kräfte in die hintere Bodenbindung einleiten, während sich im vorderen Bereich eine kritische Vorverlagerung aus der geringen Steifigkeit ergibt. In der Entwicklung des Sitzes wäre hier bereits frühzeitig eine konstruktive Maßnahme angezeigt.

3.5. Bestimmung von Kopftrajektorien

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Zulassung eines Sitzes ist die Ermittlung HIC-kritischer Bereiche. Diese resultieren im Wesentlichen aus dem Seat Layout, der Anordnung der Sitze im Flugzeug. Um Sitzreihen zu identifizieren, die bedingt durch den Sitzreihenabstand sehr wahrscheinlich zu einem kritischen Kopfaufschlag in „harten“ Strukturbereichen führen, wird die Kopftrajektorie des Dummies benötigt. Statt hierfür einen physikalischen Versuch durchzuführen, kann eine einhüllende Kopfkurve aus den Weg-Zeit-Kurven definierter Punkte am Kopf des Dummymodells in der Simulation ermittelt werden.

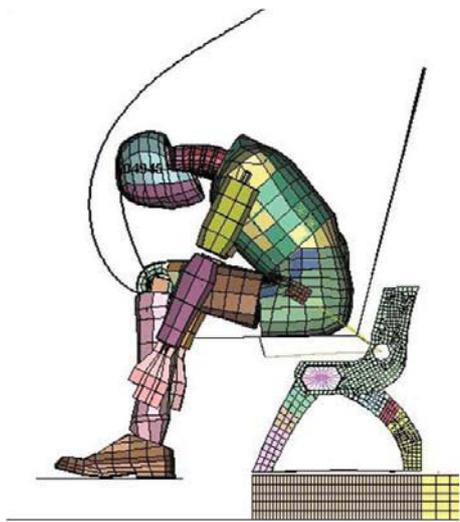


BILD 15. Kopfkurve eines Dummys im 14g-Test

Mit dieser Kopfkurve können die kritischen zu testenden Sitzreihenlayouts ermittelt werden. Bild 15 zeigt ein Simulationsmodell des 14g-Downward-Versuchs mit Weg-Zeit-Kurve eines ausgewählten Kopfpunktes.

Im Bild 16 ist die Kopfkurve in einem Diagramm aufgetragen. In dieses Diagramm können die einhüllenden Geometrien zweier Sitzreihen bei verschiedenen Sitzreihenabständen aufgenommen und Bereiche des Kopfaufschlags ermittelt werden. Im Zulassungsprozess kann damit die kritische zu testende Sitzreihe identifiziert werden. In der Entwicklung ist dieses Wissen etwa zur Positionierung von Anbauteilen der Rückenlehne, zum Beispiel Tisch und Tischverriegelung, sinnvoll nutzbar.

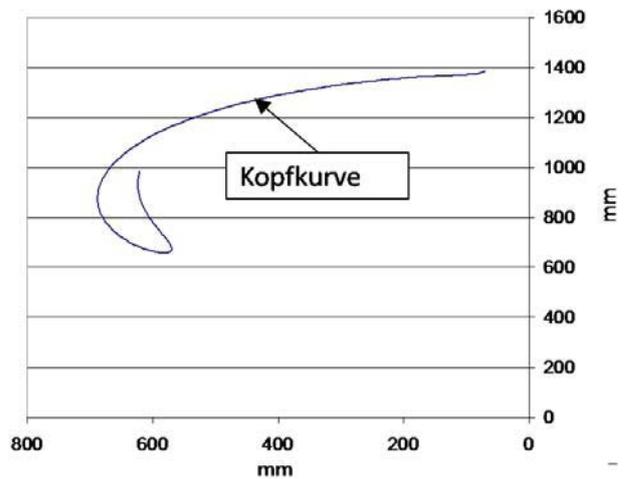


BILD 16. Ermittlung der Kopfkurve aus der Simulation

4. STRUKTUROPTIMIERUNG

4.1. Dimensionierung und Gestaltoptimierung

In den letzten Jahren haben sich mathematische Optimierungsverfahren zur Dimensionierung und zur Gestaltoptimierung immer mehr durchgesetzt. Auch in dem mechanisch anspruchsvollen Gebiet der dynamischen Auslegung bzw. der Crash-Auslegung werden Verfahren der Strukturoptimierung eingesetzt [3]. Hierbei hat man es allerdings mit folgenden Problemen zu tun [4]:

- keine glatten Struktureigenschaften,
- wenig verlässliche Materialdaten,
- Streuung der Materialdaten,
- netzabhängige Ergebnisse,
- physikalische Verzweigungspunkte,
- rechnerische Verzweigungspunkte,
- Simulationsmodelle gelten nur für ein bestimmtes Design.

Hierbei werden folgende Ziel- und Restriktionsfunktionen verwendet:

- Berücksichtigung spezieller Beschleunigungswerte, z.B. HIC-Wert
- Energieabsorption,
- spezielle Kraftniveaus,
- glatte Kraft-Weg-Kurven,
- glatte Beschleunigungs-Zeit-Kurven,
- spezielle Lastpfade
- hohe Steifigkeiten in speziellen Bereichen, z.B. Komponenten im Kraftfluss im Fahrgastbereich
- reduzierte Steifigkeiten in bestimmten Bereichen, z.B. an möglichen Kopfaufprallpositionen,
- spezielle Sicherheitskriterien, z.B. Ermöglichung der Evakuierung

4.2. Topologieoptimierungsverfahren

Topologieoptimierungsverfahren zur Bestimmung eines Strukturkonzepts sind derzeit nur auf dem Gebiet der Strukturauslegung unter Berücksichtigung linearer Struktureigenschaften effizient einsetzbar. Mit ihnen wird der Entwurfsraum in viele kleine Bereiche eingeteilt und mit

Hilfe von Sensitivitätsinformationen durch den Optimierungsalgorithmus festgelegt, an welchen Punkten sich Material befinden soll. Diese Verfahren haben sich in den Entwicklungsprozessen etabliert.

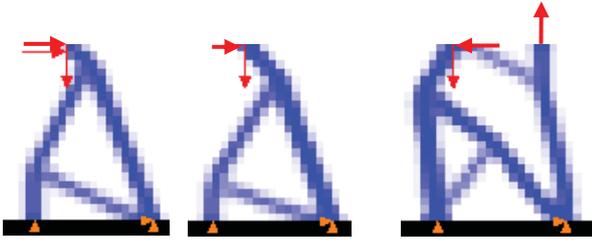


BILD 17. Topologieoptimierungen zur Steifigkeitsmaximierung

Bild 17 zeigt einige grobe Ergebnisse der Steifigkeitsmaximierung bei gegebenem Materialeinsatz und mechanischen Lasten. Hier wurde ein großer Topologieraum zugelassen. In Bild 18 ist das Ergebnis einer statischen Topologieoptimierung bei einem eingeschränkten Entwurfsraum zu sehen. Als Entwurfsraum wurde hier das Sitzbein des Forschungssitzes aus Bild 11 gewählt. Die dynamische Auslegung bzw. der Crash-Auslegung kann allerdings nur extrem eingeschränkt auf solche Topologieoptimierungsverfahren zurückgreifen, vor allem, weil die benötigten Sensitivitätsinformationen fehlen [5]. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die komplette Prozesskette der Crash-Berechnung in den Optimierungsprozess zu integrieren.

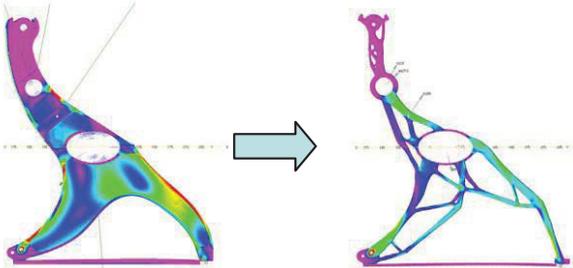


BILD 18. Topologieoptimierung eines Sitzbeins

4.3. Prozesskette zur Topologieoptimierung in der Crash-Auslegung

Zur flexiblen Beschreibung des Entwurfs wird die Graphentheorie herangezogen, mit deren Hilfe ein Design über Knoten und Linien dargestellt wird. Der Graph besteht aus Untergraphen, die wiederum Teilstrukturen, wie zum Beispiel Balken, darstellen können. Die Knoten im Graphen besitzen Merkmale, die dazu genutzt werden, entsprechende Entwurfsvariablen zu spezifizieren. Diese Entwurfsvariablen, wie z.B. die Dicke eines Balkens, können dann während der Optimierung verändert werden. Während des Optimierungsprozesses werden topologische Veränderungen des Graphen als topologische Änderungen in den Entwurf übertragen. Die Topologieoptimierung einer Struktur ist daher eine Topologieoptimierung des zugrunde liegenden Graphen. Zusätzlich kann in einer inneren Schleife zwischen zwei Iterationen der Topologieoptimierung ein Gestaltoptimierungsprozess integriert werden. Die Anzahl der möglichen Entwürfe ist theoretisch unbegrenzt, da die topologischen Änderungen

durch Konstruktionsregeln kontrolliert werden. Diese können auch nacheinander in den jeweils aktuellen Entwurf eingebracht werden. Bild 19 zeigt eine Beispielstruktur für einen quadratischen Rahmen aus vier Balken (jeweils bestehend aus B1, BG und B2), die über Verbindungsknoten (L) miteinander verbunden sind. Die Fixierung im Raum erfolgt über Koordinatenknoten (C). Mit diesem Repertoire lassen sich prinzipiell bereits Entwürfe wie der in Bild 18, rechts brauchbar annähern.

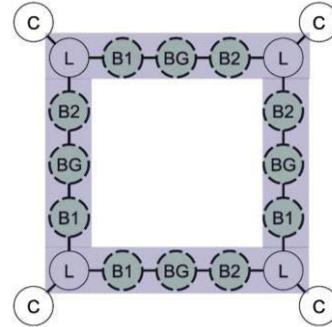


BILD 19. Graphenbasierte Darstellung eines quadratischen Rahmens aus Balken

Die Veränderungen des zugrunde liegenden Graphen führen zu neuen topologischen Entwürfen. Die geometrische Darstellung der Struktur wird durch ein JAVA-Kontrollprogramm, das die Informationen des Graphen nutzt, in CATIA® erzeugt (siehe Bild 20).

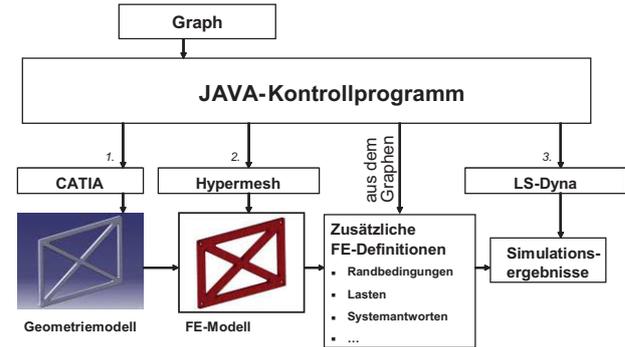


BILD 20. Erzeugung des geometrischen Modells aus Informationen des Graphen

Des Weiteren fließen die Informationen aus dem Graphen sowohl in die Erzeugung des FE-Netzes in Hypermesh® als auch in die Erzeugung der Lasten und Randbedingungen für die Berechnung in LS-DYNA mit ein. Eine erste Anwendung ist die Optimierung der abstrahierten Tragstruktur eines Fluggastsitzes. Es geht um die kombinierte Topologie- und Gestaltoptimierung einer Tragstruktur (Entwurfsraum), die wie in Bild 21 dargestellt belastet wird. Das Optimierungsziel ist die Minimierung des Gewichtes unter Berücksichtigung von Verschiebungs- und Dehnungsrestriktionen. Die Werte für die Lagerkraft, Verschiebungsrestriktion und Trägheitslast werden an fixen FE-Knotenpositionen ausgewertet bzw. aufgebracht. Die Ausgangsstruktur ist ein rechteckiger Rahmen, bestehend aus Balken (und einigen kleinen Flächen an den Ecken mit Bohrungen, die jedoch in der Optimierung nicht weiter betrachtet werden).

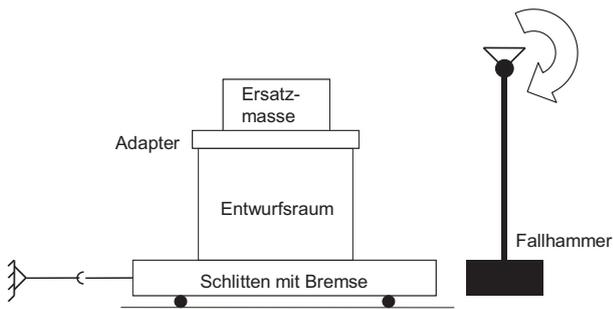


BILD 21. Lastfall und Randbedingungen

In Bild 22 ist der Graph einer Tragwerksstruktur der Topologiekategorie 1 mit Anschlussgeometrien (P3- und P4-Knoten im Bild) für Lasteinleitungen und Lagern dargestellt.

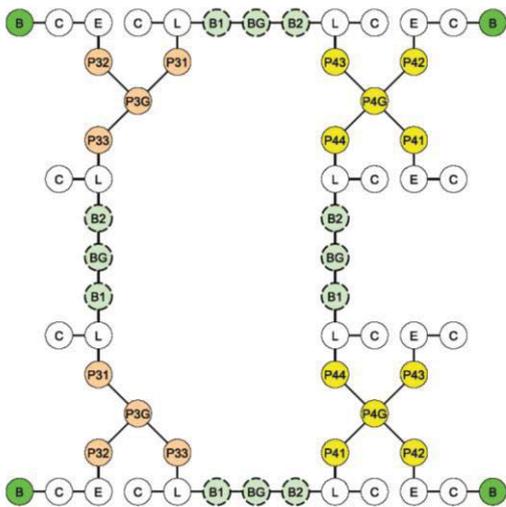


BILD 22. Darstellung des Graphen für einen rechteckigen Rahmen, Topologiekategorie 1

Bild 23 (a) zeigt das Anfangsdesign, welches dem Graphen der Topologiekategorie 1 aus Bild 22 zugeordnet ist. In der topologischen Iteration in Topologiekategorie 1 sind die Balkendicken und die horizontale Position des „Knie“-Elementes (im rechten Bereich der Struktur) die Entwurfsvariablen. Der Einfachheit halber sind die Balkendicken miteinander verknüpft, sodass die Dicke nur eine Designvariable darstellt. In der Gestaltoptimierung läuft die horizontale Position des „Knie“-Elementes an die rechte Grenze, die Balkendicken des Rechteckrahmens werden dabei reduziert (Bild 23 (b)).

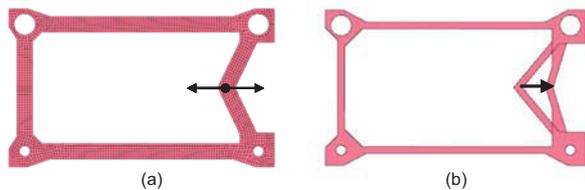


BILD 23. Gestaltoptimierung der Struktur der Topologiekategorie 1

Die Anwendung einer Konstruktionsregel „Diagonale in rechteckigen Rahmen einsetzen“ führt, wie in Bild 24 dargestellt, zu einer neuen Topologie (Topologiekategorie 2).

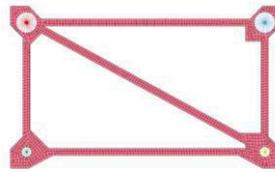


BILD 24. Anfangsdesign der topologischen Variante 2 (Topologiekategorie 2)

In Bild 25 sind einige Verformungsbilder weiterer Strukturvarianten dargestellt, die mit dem in Bild 20 dargestellten Prozess erzeugt wurden und verschiedene Ideen für Deformationselemente zur Energieaufnahme und zur Beeinflussung der Rechtsverlagerung der Struktur enthalten.

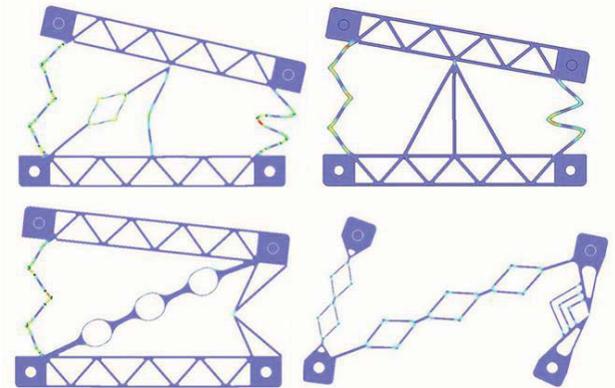


BILD 25. Verformungsbilder verschiedener Strukturvarianten

5. FAZIT

Die dynamische Simulation kann heute einen wichtigen Beitrag in der Entwicklung und im Vorfeld der Zulassung von Fluggastsitzen leisten. Alle zulassungsrelevanten Kriterien können mit der dynamischen Simulation bereits vor der Prototypenphase bewertet und unnötige Entwicklungsschleifen, wie im Beispiel des 16g-Lastfalls gezeigt, vermieden werden. Durch die Nutzung von Berechnungsmodellen und eine geeignete Prozesskette können mechanisch optimale Sitzentwürfe prinzipiell algorithmisch mit den Methoden der Strukturoptimierung erschlossen werden.

6. DANKSAGUNG

Die vorgestellten Ergebnisse basieren zum großen Teil auf dem abgeschlossenen Forschungsprojekt „Dynamische Simulation und Optimierung von Fluggastsitzen“, das von der Behörde für Wirtschaft und Arbeit der Stadt Hamburg gefördert wurde. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.

7. ABKÜRZUNGEN

AC	Advisory Circular
CS/FAR	Certification Specification/ Federal Aviation Regulation
EASA	European Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FE/FEM	Finite Elemente/ Finite-Elemente-Methode
HIC	Head Injury Criterion
SAE	Society of Automotive Engineers
TSO	Technical Standard Order

8. REFERENZEN

- [1] Geiwiz, W.; Breuer, J.; Müller, K. M.; Schrempp, C.: „Dynamische Zulassung von Fluggastsitzen“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2004, 20.-23. September 2004, Dresden
- [2] Miehke, P.: “Der Fluggastsitz – vom Konzept zum Produkt“, DGLR-Praxis-Seminar Luftfahrt, HAW Hamburg, 13. Oktober 13 2005
- [3] Schumacher, A.: „Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen“, Springer-Verlag, Heidelberg, 2005
- [4] Schumacher, A.; Olschinka, C.: “Robust Design considering highly nonlinear structural behavior”, Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2008, Band 35, Seiten 263-272
- [5] Patel, N.M.; Kang, B.-S.; Renaud, J.E.; Tovar, A.: “Crashworthiness Design Using Topology Optimization”, Journal of Mechanical Design Juni 2009, Band 131