

ATD-H350 ein Hybrid-III-Modell mit den Qualitätsanforderungen der PDB

Peter Schuster *, Christian Gehre **

* ATD-MODELS GmbH
Rohne, Deutschland

** PDB – Partnership for Dummy Technology and Biomechanics
Ingolstadt, Deutschland

Zusammenfassung:

Die derzeitigen Ansprüche an die Aussagegüte einer Insassensimulation im Frontcrash fordern ein Dummymodell, welches als Messinstrument in der Lage sein muss, sowohl Verletzungskriterien als auch Interaktionen mit den Rückhaltesystemen und Interieur genau zu erfassen.

Um weitere Potentiale der Finite-Elemente-Berechnung und damit die Vorteile einer realitätsnäheren Abbildung auszuschöpfen, wurde ein Hybrid-III-Modell konsequent daraufhin aufgebaut.

Welche Modellierungstechniken notwendig werden, um diesen Anforderungen zu genügen, zeigt diese Arbeit an einigen Beispielen.

Der frühe Modellstand wird mit Hilfe einer Methode zur objektiven Kurvenbewertung analysiert und mit anderen Modellierungstechniken und Berechnungsmethoden an einem Schlittentest verglichen.

Keywords:

Hybrid-III, ATD-H350, Dummy, Objektive Kurvenbewertung, Frontcrash, CORA, PDB, ATD-MODELS

1 Hardware

Obwohl der Hybrid-III-50% (H350) in seiner Urform schon seit einigen Jahrzehnten eingesetzt wird, ist er durch Weiterentwicklungen und neue Messstellen auch in absehbarer Zukunft noch das vorgeschriebene Messinstrument zur Bestimmung der Verletzungsgrößen im Frontcrash.

Da sich die „Gebrauchslast“ des Dummys, also die Beaufschlagung durch die Crashbelastung, aufgrund besserer Fahrzeugstrukturen und moderner Rückhaltesysteme deutlich reduziert hat, ergeben sich dadurch gestiegene Anforderungen an die Messtoleranzen in diesem Arbeitsbereich.

2 Simulation

Gerade kombinierte Verletzungsgrößen aus Kräften und Momenten verlangen nach einem Hybrid-III-Modell, das in der Lage ist, dieses Lastspektrum im Rahmen der Versuchstoleranz genau zu ermitteln. Besonders im Bein- und Halsbereich gibt es Schutzkriterien, welche für die Fahrzeughersteller zulassungsrelevant sind und damit frühzeitig in der CAE-Entwicklung belastbare Ergebnisse liefern müssen.

2.1 Interaktionen zwischen Dummy und Umgebung

FE-Simulationen ermöglichen es, detaillierte Interaktionen des Dummys mit seiner Umgebung zu erfassen. Dadurch bestimmen sich die Einwirkungsgrößen auf den Dummy selbst, aber auch die Belastungen der Interieurteile im Crashfall.

Dazu zählen in erster Linie direkte Rückhaltesysteme wie:

- Airbags im Thorax-, Kopf- und Kniebereich
- Gurtsystem
- Sitz

aber auch indirekte Rückhaltesysteme des Interieurs:

- laufende Lenksäule, Instrumententafel
- entkoppelte Fußstütze, Teppich, Pedalerie
- Verkleidungsteile.

Dabei handelt es sich hier nicht mehr um „ideale“ und „robuste“ Lastgrößen, wie etwa in den Zertifizierungsversuchen des Dummys, sondern um wechselnde Lasten in Größe, Vorzeichen und Richtung.

2.2 Anforderungen an die Modellierungstechniken des Dummys

Die genannten Interaktionen führen zu lokalen Energieeinträgen am Dummy, die über die gesamte Zeit des Crashes variieren. Neben den Wechselwirkungen zur Umgebung kommt es auch zu erheblichen Interaktionen zwischen den einzelnen Dummybauteilen.

Die als Eingangsgrößen für verschiedene kombinierte Verletzungskriterien von Hals und Beinen verwendeten Kräfte und Momente neigen zu Schwingungen und weisen lokale Maxima und Minima auf. Nur bei exakter Abbildung dieses Schwingverhaltens werden auch diese kombinierten Kenngrößen exakt abgebildet. In Bild 1 bis Bild 4 sind exemplarisch Kräfte und Momente von Hals und Unterschenkeln dargestellt.

Alle in diesem Abschnitt gezeigten Signale stammen aus einer Schlittenversuchsreihe, die in Abschnitt 4.1 beschrieben ist.

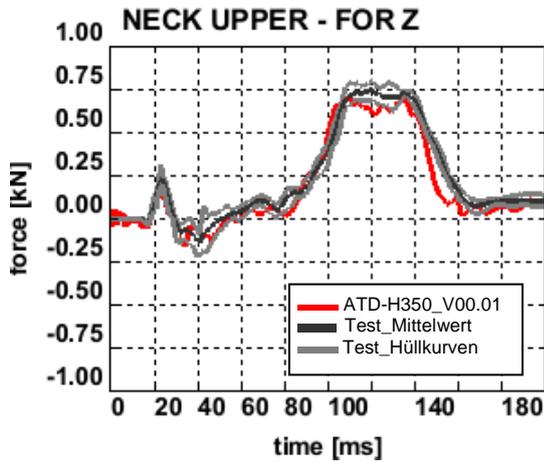


Bild 1: Eingangsgröße Nij – Kraft

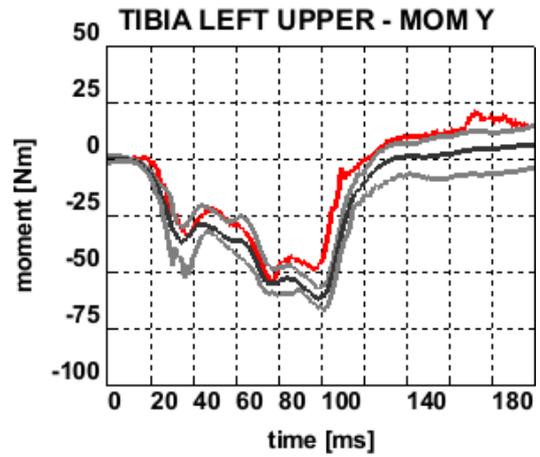


Bild 2: Eingangsgröße Nij – Moment

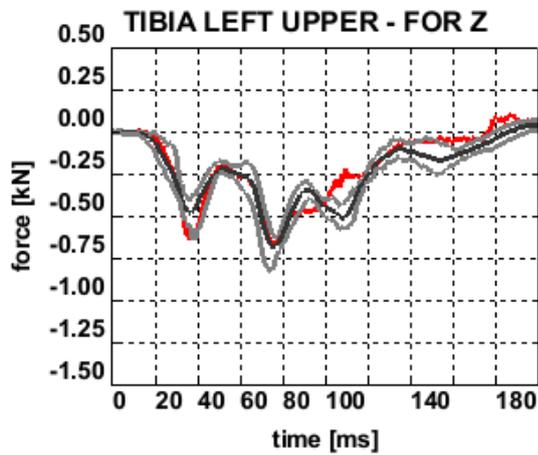


Bild 3: Eingangsgröße Tibia-Index – Kraft

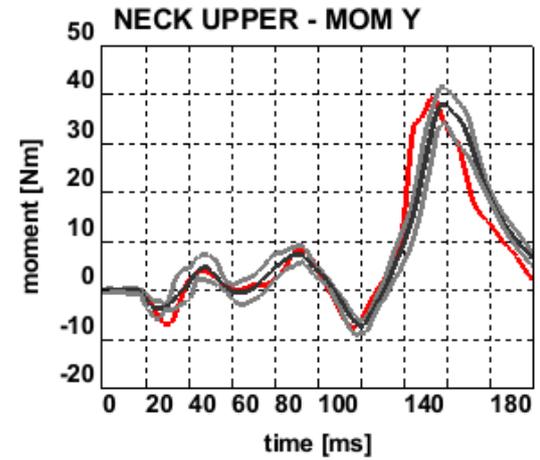


Bild 4: Eingangsgröße Tibia-Index – Moment

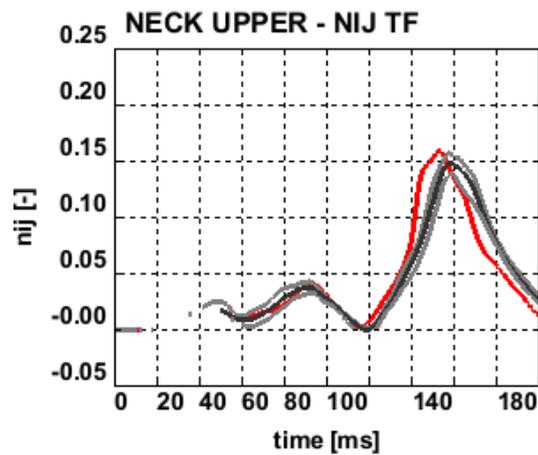


Bild 5: Kombinationswert Hals – Nij

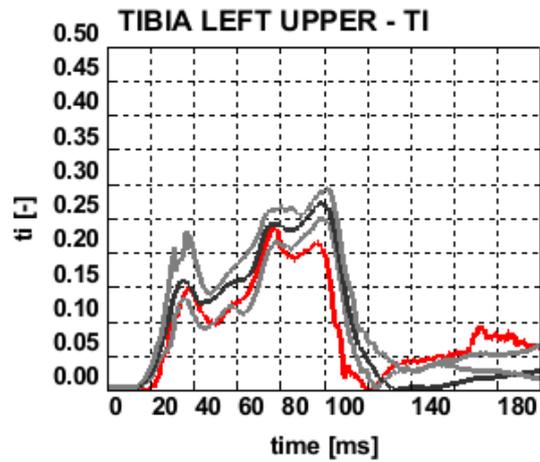


Bild 6: Kombinationswert Bein – Tibia-Index

Um die in Bild 5 und Bild 6 dargestellten Kombinationswerte mit einem Dummymodell exakt abbilden zu können, muss das Steifigkeitsverhalten für die „Frequenzen“ und „Amplituden“ der Signale gut erfasst werden.

Dafür sind bisher angewandte Modellierungstechniken zu hinterfragen:

- Vereinfachung von Knochen als Starrkörper
- Idealisierung von Gelenkverbindungen mittels Starrkörper und Penalty-Joints
- Gelenksteifigkeiten und -dämpfung über diskrete Kurvenvorgaben
- Anfangssteifigkeiten durch Verbindungstechniken

Im Folgenden wird auf einzelne dieser Modellierungstechniken exemplarisch eingegangen.

3 ATD-H350

Da eine stetige Verbesserung der Prognosegüte des Hybrid-III-50%-Modells gefordert wird, wurden gemeinsam von der PDB und ATD-MODELS die Vorgaben für ein neues Modell definiert:

- konsequent als Neuaufbau
- damit keine Übernahme von Altlasten
- exakte Geometrieabbildung mit neuen Modellierungstechniken
- Synergien durch Nutzung bereits vorhandener Versuchsdaten (Material, Komponenten, Schlitten, Zertifizierung)
- Nutzen aktueller Technologien der FE-Solver

Diese Vorgaben ermöglichen es neue Validierungspotentiale zu erschließen.

3.1 Basisdaten – Geometrie

Um die geplanten Modellierungstechniken umsetzen zu können, war es zwingend erforderlich, exakte Geometrien zu erfassen. Die von der PDB zur Verfügung gestellte Hardware wurde in der hauseigenen Messwerkstatt bei ATD-MODELS dafür präpariert.

Die Geometrie wurde vom Zusammenbau, über Baugruppen bis hin zum Einzelteil mit einem 3D-Laserscannarm mit einer Genauigkeit von 5/100 mm aufgenommen und anschließend durch eine Flächenrückführung in einem CAD-Modell exakt abgebildet. Anschließend wurden mit einem 3D-Messarm Fixpunkte und Verbindungstechniken auf einem Messtisch erfasst. Sie ermöglichen den präzisen Zusammenbau in der virtuellen Welt.

Eine parallel durchgeführte Wiegung der Bauteile, eine Fotodokumentation sowie die Erfahrungen mit der Hardware bilden die Ausgangsbasis für einen exakten Modellaufbau und die spätere Modellvalidierung.

3.2 Basisdaten – Versuche

Um die Qualität der bislang verwendeten Hybrid-III-Modelle zu verbessern, wurden in der Vergangenheit im Rahmen von FAT- und PDB-Projekten eine Vielzahl an Material-, Komponenten- und Schlittenversuchen durchgeführt:

- Materialversuche bis in hohe Dehnratenbereiche: Zug, Druck, Schub, Druck-Schub
- Komponentenversuche: Thorax, Hals, Tibia
- Schlittenversuche im Fahrzeuglastbereich
- Zertifizierungstests aus verschiedenen Dummylaboren.

Mit Hilfe dieser Datenbasis und weiterer Unterstützung der deutschen OEM entstand unter konsequenter Anwendung verbesserter Modellierungstechniken der ATD-H350.

3.3 Besonderheiten Modellaufbau

3.3.1 Vorspannung Brustkorb und Sternum

Um Modellantworten, wie z.B. den überhöhten Strafferpeak der Brusteindrückung zu vermeiden, wurde ein realitätsnaher Anfangszustand des Modells errechnet. Für die in Bild 7 und Bild 8 dargestellten Vorspannungen sind exakte Vorsimulationen im Modellaufbau durchgeführt worden.

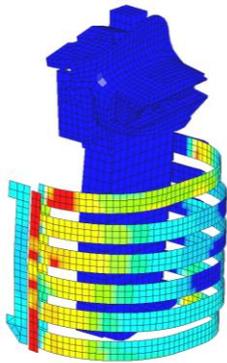


Bild 7: Vorspannung Rippenbögen

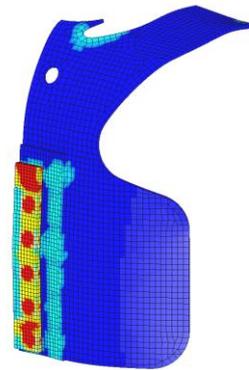


Bild 8: Vorspannung Bib

Hierzu war es notwendig, die Einzelteile des Brustkorbs in der CAD-Position zu modellieren und den Montageprozess, so wie er im Dummylabor durchgeführt wird, durch eine Vorsimulation als Zusammenbau nachzufahren. In Bild 9 bis Bild 12 ist das Vorgehen exemplarisch dargestellt.

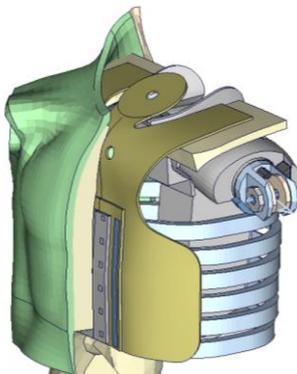


Bild 9: Montagesimulation Jacke

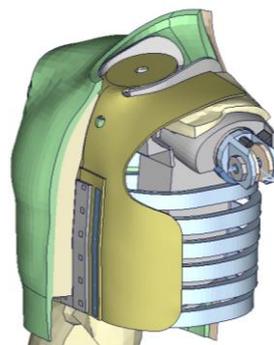


Bild 10: Endzustand Montagesimulation

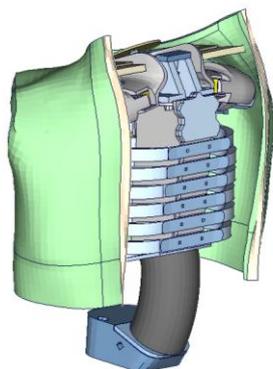


Bild 11: Montagesimulation Jacke

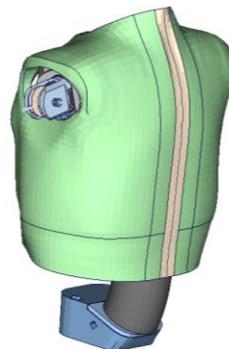


Bild 12: Endzustand Montagesimulation

Das Ergebnis der Vorsimulation liefert eine Startgeometrie, in der alle nachfolgend aufgeführten Bauteile im Spannungsgleichgewicht sind:

- Jacke
- Sternumverschraubung
- Führung des Brustpotentiometers
- Bib mit Schulterschäum
- Rippenbänder
- Clavicle.

3.3.2 Vorspannung der Gelenk-Bumper

Gelenksteifigkeiten, die mittels Lastkurven diskret in einem bestimmten Arbeitsbereich des Gelenkes gut abgebildet werden können, genügen nicht immer dem vielfältigen Lastspektrum in einem Frontcrash.

Um Gelenke, in denen Bumper den Momentenverlauf beeinflussen, exakt abzubilden, wurden diese ebenfalls vorgespannt. Dadurch ist es möglich, die dehnratenabhängigen Materialeigenschaften als „ursächliche“ Größe der Steifigkeit zu erfassen.

In Bild 13 sind beispielhaft die Bumper zwischen Hals und Upper Neck-Kraftmessdose dargestellt. In Bild 14 und Bild 15 sind Ergebnisse dieser Modellierungstechnik im anspruchsvollen Zertifizierungstest (Korridore: Peak, Peakzeit, Nulldurchgang) und vergleichend im Schlittentest aufgetragen (Bild 16).

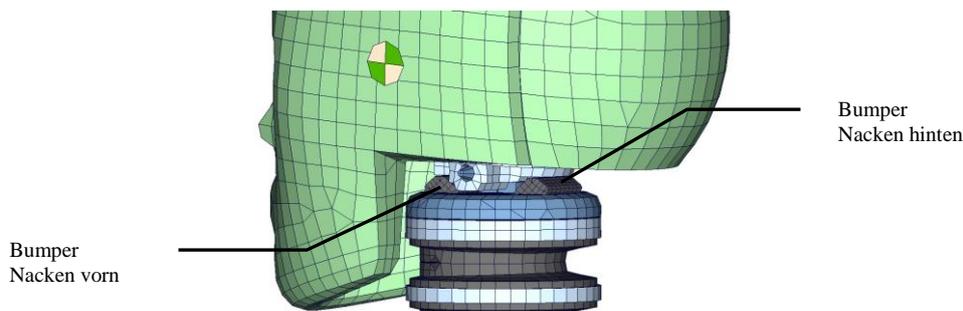


Bild 13: Bumper als steifigkeitsrelevante Komponente im Nackengelenk

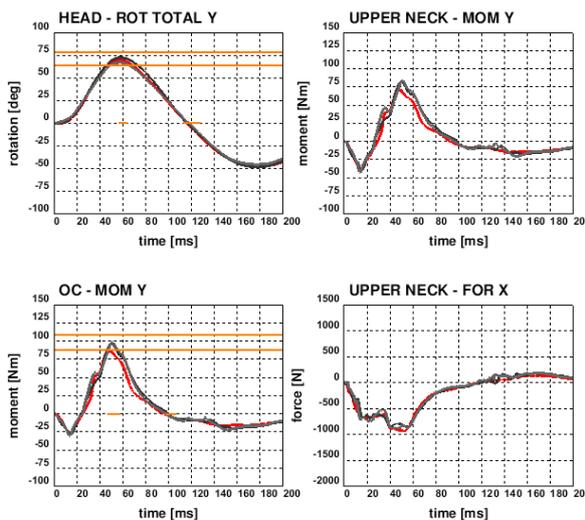


Bild 14: Zertifizierungstest – Neck Flexion

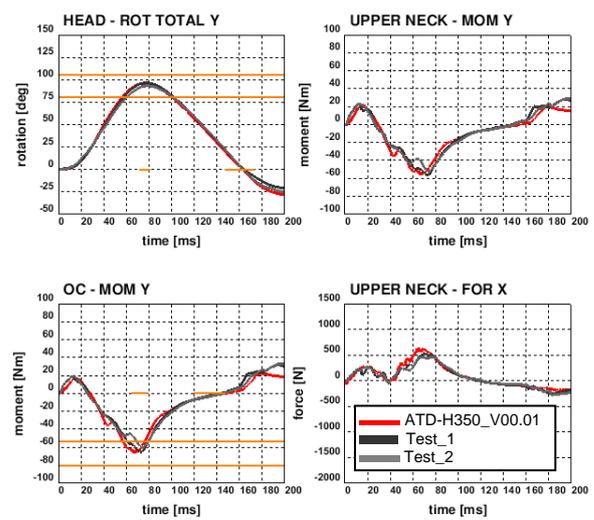


Bild 15: Zertifizierungstest – Neck Extension

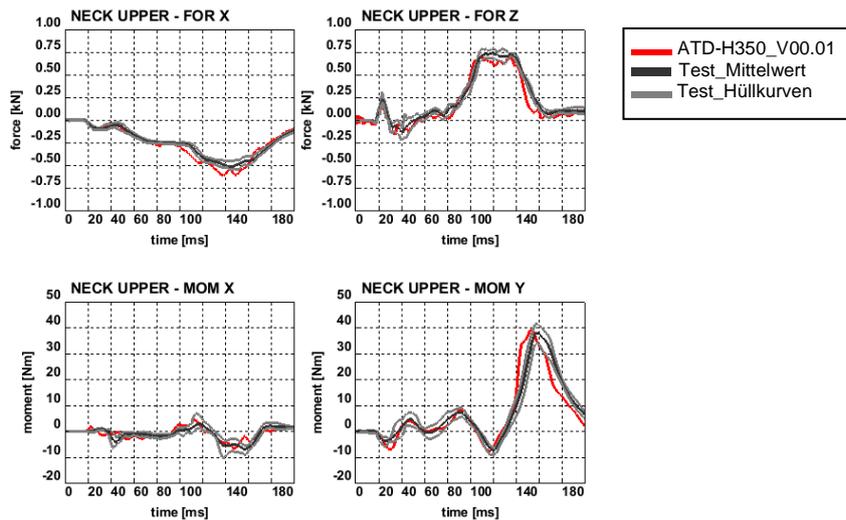


Bild 16: Schlittentest – Ergebnisse Upper Neck

3.3.3 Modellierung Gelenkanschläge

Um die Modellierungstechnik „ursächlicher“ Steifigkeiten konsequent weiterzuentwickeln, wurden ebenfalls Gelenkanschläge realitätsnah ausmodelliert. Das sorgt einerseits im Lastspektrum für robustere Signale sobald der Gelenkanschlag erreicht wird, andererseits kann der Benutzer in der Animation Signalverläufe besser nachvollziehen.

Exemplarisch zeigt Bild 17 diese Modellierungstechnik und ausmodellierte Verbindungen, wie hier am Clavicle und Yoke. Dadurch wird sowohl das Aufbauverständnis der verschiedenen Gelenkverbindungen erhöht als auch die Kinematik durch sichtbare Verbindungen plausibilisiert.

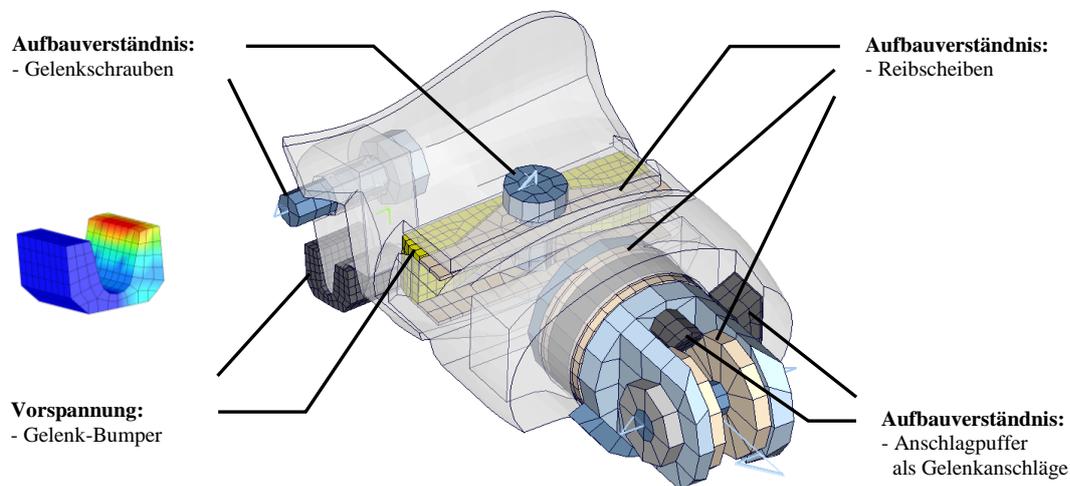


Bild 17: Clavicle mit vorgespannten Gelenk-Bumpers und Gelenkanschlägen

Die in hier abgebildeten Modellierungstechniken zeigen nur einen kleinen exemplarischen Ausschnitt des Gesamtmodells. Gerade im Knie-, Tibia-, und Knöchel-Bereich wurde der Aufbau mit exakter Geometrie und „ursächlichen“ Steifigkeiten konsequent weitergeführt.

4 Bewertung der Modellgüte

Neben der subjektiven Bewertung der Modellqualität über Vergleiche mit Zertifizierungs-, Komponenten- und Schlittenversuchen sowie über die Überprüfung der Plausibilität der Signale wurde ein repräsentativer Referenzlastfall definiert, dessen Ergebnisse mit Hilfe einer Methode zur objektiven Berechnung der Modellgüte analysiert und ausgewertet wurden.

4.1 Referenzversuch

Das Setup des Referenzversuchs wurde ursprünglich für die Verbesserung bereits etablierter H350-Modelle entwickelt. Ziel war es, einen möglichst einfachen jedoch von der Art der Dummybelastung realistischen Lastfall zu definieren. Der Fokus lag dabei auf der Dummykinematik sowie der Brustbelastung. Für die Brusteindrückung wurde ein Zielwert von 25 mm definiert.

Der Versuchsaufbau wurde soweit wie möglich vereinfacht, um die Einflüsse auf den Dummy möglichst genau kontrollieren zu können. So sitzt der Dummy auf einem starren ECE-R16-Sitz und wird nur von einem Dreipunktgurt mit Retraktorstraffer und Kraftbegrenzer gesichert. Die Füße wurden auf einer starren Fußstütze fixiert. Bild 18 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau.

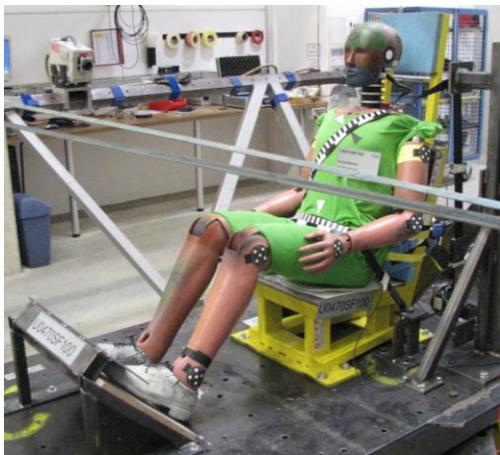


Bild 18: Aufbau des Referenzversuchs

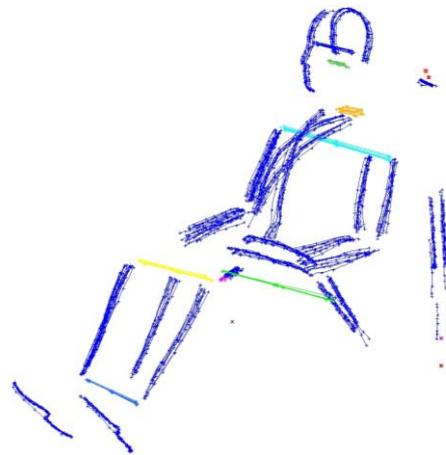


Bild 19: 3D-Vermessung von Dummy und Gurtsystem

Im Versuch wurde das Becken soweit nach vorn verschoben, dass Becken- und Torsowinkel vergleichbar mit denen aus Fahrzeugversuchen sind. Aufgrund der starren Versuchsumgebung sowie des fehlenden Airbags musste der Schlittenpuls skaliert werden, damit die Dummybelastungen im Zielbereich liegen. Die Pulsform wurde von einem typischen EuroNCAP-Frontalcrashpuls abgeleitet. Insgesamt wurden mit drei verschiedenen Dummies je drei Versuche durchgeführt. Die Sitzposition wurde dabei mit Hilfe des 3D-Meßsystems dokumentiert. In Bild 19 sind die Messpunkte, die zur besseren Visualisierung mit Linien verbunden wurden, dargestellt.

Aufgrund der Vereinfachungen im Versuchsaufbau reduzieren sich die externen Einflüsse auf die Versuchsergebnisse im Wesentlichen auf die Dummypositionierung sowie das Gurtsystem.

4.2 Bewertungsmethode

Bislang wurde die Korrelation von zwei Signalen entweder subjektiv bewertet oder es wurden charakteristische Merkmale miteinander verglichen. Diese Merkmale können beispielsweise Maxima, Minima sowie Nulldurchgänge der Signale sein. Sie geben allerdings nur einen unvollständigen Eindruck der kompletten Korrelationsgüte wieder. Für eine umfassende und zuverlässige Bewertung der Korrelation ist jedoch die Analyse des gesamten, beziehungsweise des relevanten Signalverlaufs notwendig.

Inzwischen wurden die verschiedensten Algorithmen zur Bewertung der Korrelation von Signalen entwickelt. Einige dieser Algorithmen werden für spezielle Fragestellungen erfolgreich eingesetzt. Oft verhindern jedoch die spezifischen Besonderheiten einen universellen Einsatz.

Im Rahmen eines PDB-Projekts wurde ein neuer Ansatz zur objektiven Bewertung der Korrelation von Signalen entwickelt [1]. Dabei werden verschiedene Bewertungsalgorithmen so miteinander kombiniert, dass die Nachteile jeder verwendeten Methode von einer anderen kompensiert werden. Damit erhöht sich die Robustheit der Korrelationsbewertung deutlich.

Die Korrelationsbewertung reicht von 0 (keine Korrelation) bis 1 (perfekte Korrelation). Bei einer Bewertung von 1 sind die Signale nicht zwangsläufig identisch. Da jede der verwendeten Methoden eine Toleranz für eine 1-Bewertung zulässt, reicht es aus, wenn das zu bewertende Signal in diesem Toleranzbereich liegt.

Die Software CORA dient als Demonstrator des neu entwickelten Bewertungsansatzes. Mit Hilfe dieser Software ist es ebenso möglich, Einzelkanalbewertungen zu einer Gesamtbewertung zusammenzufassen. Dabei können den einzelnen Kanälen Wichtungsfaktoren zugewiesen werden. Die Bewertung kompletter Dummymodelle inklusive der Berücksichtigung verschiedener Lastfälle steht jedoch erst am Anfang. So müssen vor allem die Wichtungsfaktoren der einzelnen Signale und Lastfälle sinnvoll ausgewählt werden. Für die Bewertung des neuen H350-Modells wurden deshalb zunächst nur die wichtigsten Signale eines Lastfalls herangezogen.

4.3 Bewertung

Die Modellbewertung wurde zweigeteilt. Zunächst wurden die Gurtsignale bewertet. Nur bei einer korrekten Gurtmodellierung kann das Dummymodell gut arbeiten. In der zweiten Bewertung wurden die wichtigsten Signale des Dummys zusammengefasst. Die Messstellen der Beine wurden dabei nicht bewertet, da das Lastniveau im Referenztest nicht repräsentativ für eine Fahrzeugumgebung ist. Die Messstellen von Ober- und Unterschenkel können erst in Versuchen mit Kontakten zum Armaturenbrett oder mit Fußraumdeformationen zuverlässig bewertet werden.

Vom Gurtsystem wurden die Kräfte nach dem D-Ring, am Gurtschloss und am Gurtendbeschlag sowie der Gurtauszug am Retraktor bewertet. Die Dummybewertung setzt sich aus den Beschleunigungen von Kopf, Brust und Becken, den Kräften und Momenten von Hals (oben und unten) und der Lendenwirbelsäule sowie der Brusteingdrückung zusammen. Dabei wurden nur die Signale der Hauptachsen ausgewertet.

Um die ermittelten Korrelationsbewertungen des neuen H350-Modells besser einschätzen zu können, wurden zum Vergleich zwei etablierte FE-Modelle des H350 herangezogen (CAE 1 und CAE 2). Alle drei Modelle wurden unter Verwendung der gleichen Methoden und Parameter bewertet. Die drei Modelle wurden nicht speziell auf den Referenzlastfall hin optimiert. In allen Modellen ist das Gurtsystem weitgehend baugleich.

4.4 Ergebnisse und Diskussion

In Tabelle 1 ist die Bewertung der Gurtsysteme und Dummys dargestellt. Die Bewertung aller drei Modelle ist sehr hoch und stellt deshalb eine solide Grundlage für eine gute Korrelation der Dummysignale dar. In der Dummygesamtbewertung liegt der ATD-H350 vor den beiden anderen Modellen. Diese beiden haben zwar eine ähnliche Bewertung, weisen jedoch unterschiedliche Stärken und Schwächen auf (Bild 21, Bild 23).

	ATD-H350 V00.01	CAE 1	CAE 2
Gurtsystem	0,98	0,95	0,93
Dummy	0,80	0,71	0,69

Tabelle 1: Korrelationsbewertung von Gurtsystem und Dummy

Die Einzelbewertung der Signale des Gurtsystems ist in Bild 20 dargestellt. CAE 2 fällt im Vergleich zu den beiden anderen Modellen etwas ab. Dennoch sollten diese geringen Unterschiede nicht überschätzt werden. Sie sind nicht die maßgebliche Ursache für die schlechtere Bewertung der Dummysignale von CAE 2.

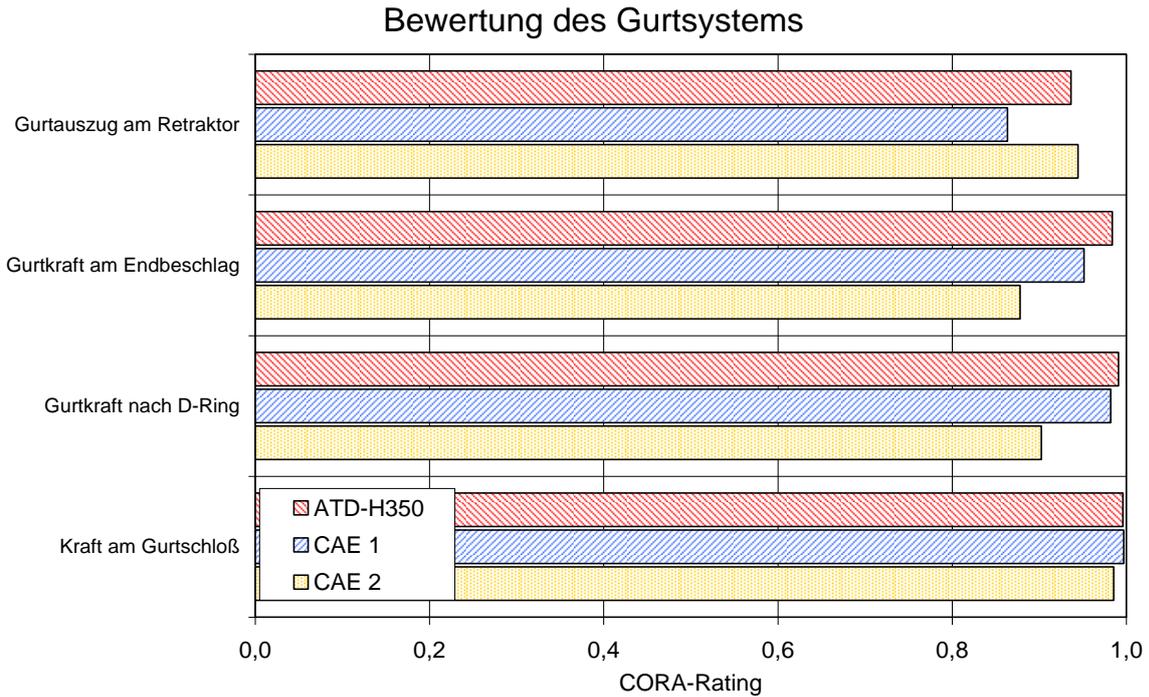


Bild 20: Korrelationsbewertung des Gurtsystems

Die Wertung der verwendeten Dummybeschleunigungen sowie der Brusteindrückung sind in Bild 21 dargestellt. In nahezu allen Bewertungen liegt der ATD-H350 vor den beiden anderen Modellen. Die Korrelation der Beschleunigungen von CAE 1 fällt im Vergleich zum ATD-H350 und CAE 2 teilweise deutlich ab. Im Gegenzug liegen die Bewertungen der Kräfte und Momente von CAE 1 zum Teil über denen von CAE 2 (Bild 23)

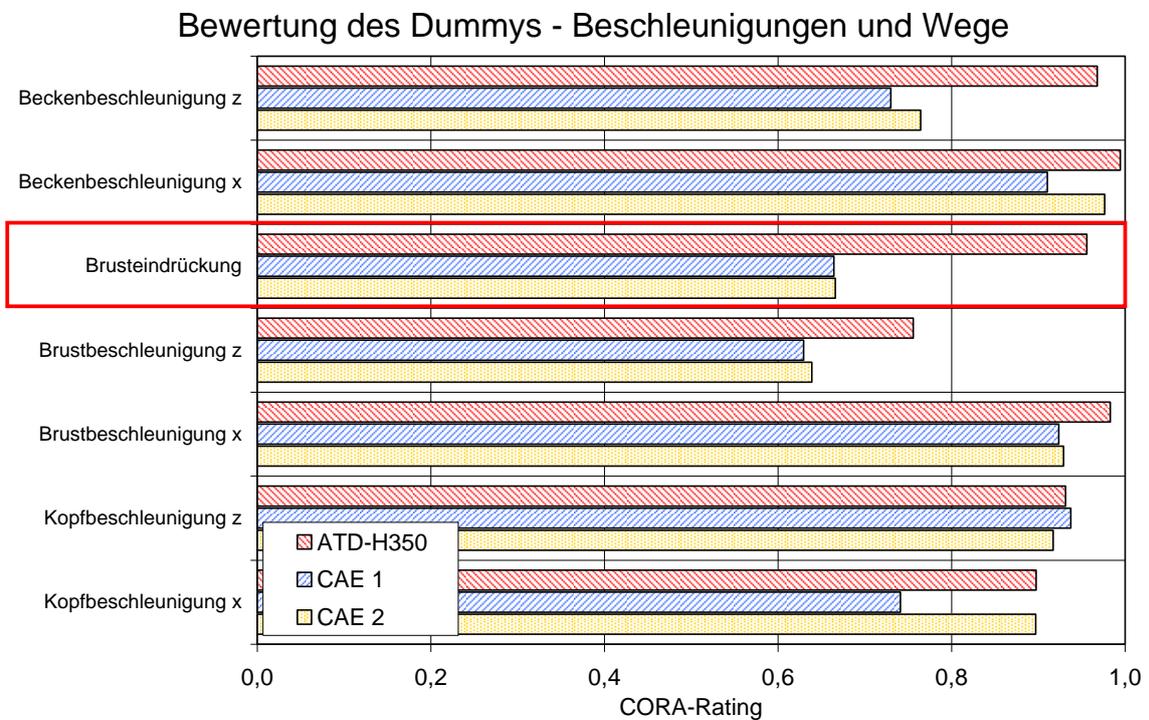


Bild 21: Korrelationsbewertung der Dummybeschleunigungen und -wege

Die Brusteindrückung vom ATD-H350 korreliert deutlich besser mit dem Versuch als die der beiden etablierten Modelle (Bild 22). Besonders die erste Belastungsspitze bei zirka 25 ms, hervorgerufen durch den Gurtstraffer, wird gut abgebildet. Die bisherigen Modelle zeigen in der Regel während der Gurtstraffung zu hohe Brustdeformationen (CAE 1). Auch im weiteren Verlauf wird der Versuch gut getroffen. Das Maximum wird zum richtigen Zeitpunkt erreicht. Die Entlastung der Brust fällt im Vergleich zum Versuch noch zu schnell ab. Hier muss die Modellierung des Gurtsystems nochmals geprüft werden.

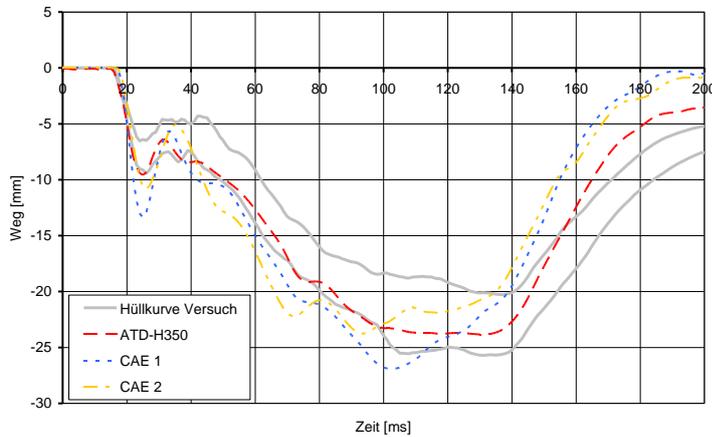


Bild 22: Brusteindrückung in Versuch und Simulation

Auch bei der Bewertung der im Dummy gemessenen Kräfte und Momente liegt der ATD-H350 bei den meisten Kanälen vor seinen beiden Konkurrenten (Bild 23). Er zeichnet sich besonders durch die gute Korrelation der y-Momente von Hals und Lendenwirbelsäule aus. Diese sind ein guter Indikator für die korrekte Abbildung der Dummykinematik.

Bewertung des Dummies - Kräfte und Momente

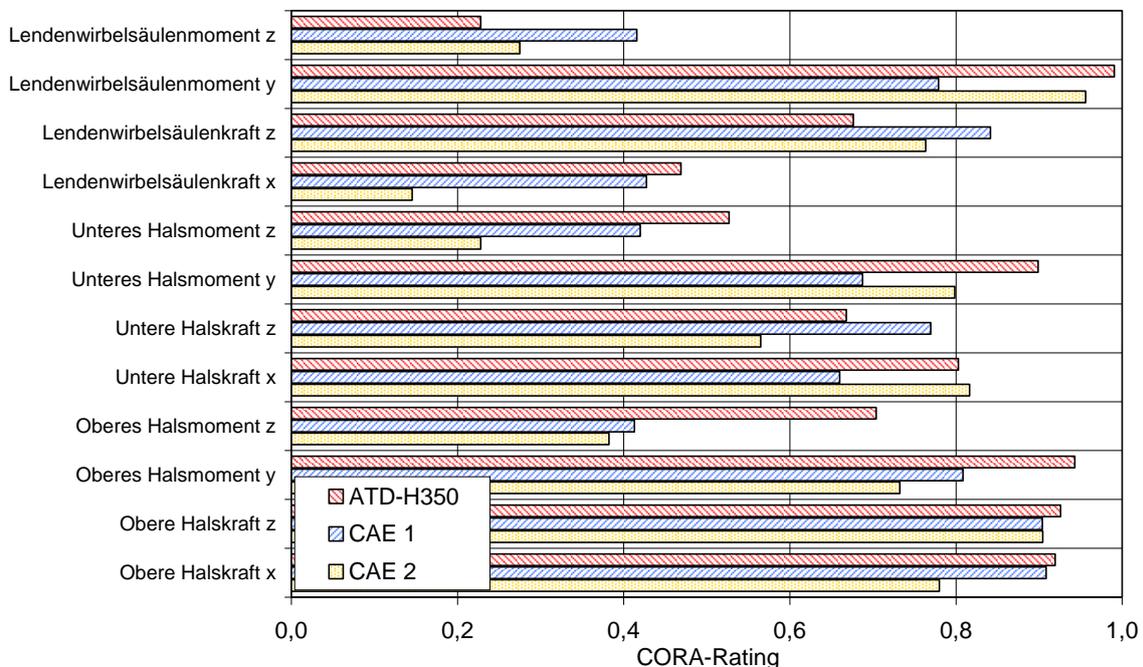


Bild 23: Korrelationsbewertung der Dummykräfte und -momente

Nachholbedarf besteht für alle drei Modelle bei der Korrelation der Momente um die Hochachse (M_z). Generell sind die absoluten M_z -Momente deutlich kleiner als die dominierenden M_y -Momente. Dennoch eignen sie sich als Indikator für die z-Rotation des Dummies aufgrund des unsymmetrischen Rückhaltesystems. Exemplarisch ist in Bild 24 das Moment M_z der Lendenwirbelsäule dargestellt. Der

Anstieg des Moments ab zirka 120 ms beim ATD-H350 ist sehr wahrscheinlich auf eine Versteifung innerhalb des Gurtsystems zurückzuführen.

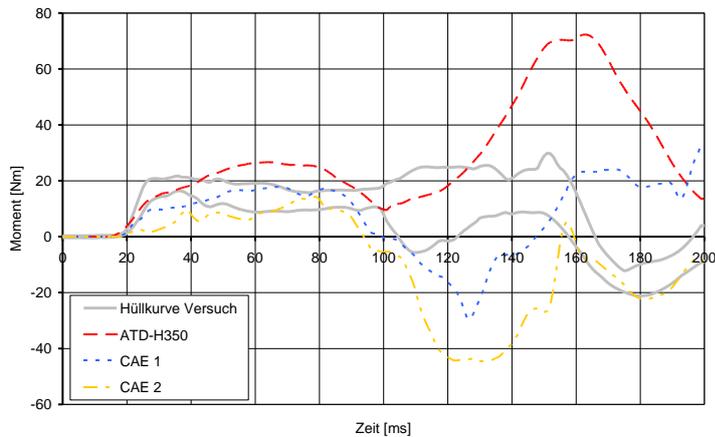


Bild 24: Lendenwirbelsäulenmoment M_z in Versuch und Simulation

Insgesamt zeigen die Ergebnisse jedoch schon eine gute Prognosegüte des ATD-H350 im Vergleich zu den beiden etablierten Modellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich dieses Dummymodell noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet und die Möglichkeiten für Modellverbesserungen noch nicht ausgeschöpft sind.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigt, wie mit bereits vorhandenen Versuchsdaten und unter konsequenter Anwendung aktueller Modellierungstechniken ein Modell des H350 aufgebaut werden konnte, das bereits in einer frühen Entwicklungsphase Vorteile gegenüber den etablierten Modellen aufzeigt. Der Neuaufbau ohne behindernde Altlasten, die detaillierte Abbildung der Dummygeometrie sowie die Berücksichtigung von Vorspannungen sind die Basis für die guten Ergebnisse.

In einem nächsten Schritt werden die umfangreichen Versuchsdaten von Unterschenkeln und Brustkorb mit dem ATD-H350 gerechnet, um die guten Ergebnisse zu bestätigen bzw. weiter zu verbessern. Derzeit werden Simulationen in Fahrzeugumgebungen durchgeführt, um einen Eindruck vom Modell unter Produktionsbedingungen zu erlangen und die Erfahrungen rückwirkend in das Modell einzuarbeiten.

Nach den derzeitigen Planungen wird dieses nochmals verbesserte und durch umfangreiche Simulationen abgesicherte Modell ab Ende 2010 verfügbar sein.

6 Literatur

- [1] Gehre, C., Gades, H., Wernicke, P.: Objective Rating of Signals using Test and Simulation Responses, 21st International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Stuttgart, Deutschland, 2009