

KONSTRUKTIVER ENTWURF UND DIMENSIONIERUNG EINER FLUGZEUGSEITIGEN SCHNITTSTELLE ZWISCHEN FAHRWERKLOSEN VERKEHRSFLUGZEUGEN UND EINEM BODENGEBUNDENEN FAHRWERKSYSTEM

E. Chowson

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Stiftstraße 69

20099 Hamburg

in Kooperation mit

mb+Partner

Harburger Schloßstraße 6-12

21079 Hamburg

Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeit eines Flugzeuges hängt in hohem Maße vom Verhältnis zwischen Nutzlast- und Betriebsleermasse ab. Das Fahrwerksystem nimmt bei modernen Verkehrsflugzeugen etwa acht Prozent der Betriebsleermasse ein und wird während des Reisefluges ungenutzt mitgeführt. Der Austausch des konventionellen Flugzeugfahrwerks durch möglichst massenarme Schnittstellen, die in ein flughafenseitig installiertes bodengebundenes Fahrwerksystem (Projektname: GroLaS - Ground-based Landing Gear System) einkoppeln, reduziert die Betriebsleermasse und erhöht damit die Wirtschaftlichkeit. Die Hauptaufgaben des konventionellen Fahrwerksystems werden dabei durch das bodengebundene System übernommen.

Die hier zusammengefasste Bachelorarbeit behandelt die konstruktive Auslegung und Dimensionierung der flugzeugseitigen Schnittstelle mittels methodischen Konstruierens. Nach der Identifikation der Anforderungen und der Abstraktion des Problemkerns folgen zur Lösungssuche eine Literaturrecherche sowie die Auswertung eines Gruppenbrainstormings. Das anschließend nach einer Nutzwertanalyse ausgewählte Schnittstellenkonzept wird zu einer mechanischen Kupplung für das Bug- und Hauptfahrwerk weiter entwickelt, dessen Dimensionierung auf analytischen und numerischen Berechnungen basiert. Die numerischen Berechnungen erfolgen durch diskretisierte Volumenelemente nach der Finiten-Elemente-Methode. Die dabei zugrunde liegenden Lastfälle richten sich nach der Bauvorschrift CS-25 für große zivile Luftfahrzeuge.

Die Masseneinsparungen durch den Einsatz der Fahrwerkskupplungen werden qualitativ und quantitativ für ein Langstreckenflugzeug untersucht. Mit den in der Arbeit konstruierten Kupplungen kann die Flugzeugbetriebsleermasse um 5,8 Prozent gesenkt werden. Die Schnittstellen für das Haupt- und Bugfahrwerk sind etwa 70 Prozent leichter als das bisherige Fahrwerk. Das gefundene Konzept für die Schnittstellen kann als potentielle Lösung gesehen werden, das als Basis für weitere Untersuchungen dienen kann.

1. EINLEITUNG

Der internationale Luftverkehr hat eine erhebliche Bedeutung für das Wirtschaftswachstum und den Wohlstand in unserer globalisierten und arbeitsteiligen Welt. Wie andere Verkehrsträger auch, verursacht der Luftverkehr durch die Verbrennung von Kerosin, u.a. CO₂- sowie Lärmemissionen. Die global wirkenden Emissionen des internationalen Luftverkehrs tragen mit großer Wahrscheinlichkeit zum anthropogenen Klimawandel bei [1].

Zukünftig wird mit einem Anstieg der klimarelevanten Luftverkehrsemissionen gerechnet, weil die weltweite Luftverkehrsnachfrage um 4,7 % pro Jahr [2] wachsen soll. Dies bedeutet eine Verdopplung des Luftverkehrsaufkommens in den nächsten 15 Jahren.

Der europäische Luftverkehr wird ab dem Jahr 2012 in das seit dem Jahr 2005 bestehende CO₂-Emissionshandelssystem mit einbezogen. Das EU-Emissionshandelssystem soll dazu beitragen, das in der Vision 2020 vereinbarte ACARE-Ziel, 50 % [3]

der CO₂- und Lärmemission im Vergleich zu den Emissionen des Jahres 2000 zu erreichen.

Die ACARE-Ziele lassen sich mit evolutionären Verbesserungen kaum erreichen, da die konventionelle Flugzeugkonfiguration bereits so ausgereift ist, dass nennenswerte Fortschritte in der Wirtschaftlichkeit hauptsächlich durch den Einsatz besserer Einzeltechnologien, zum Beispiel Werkstoffe und Antrieb, erzielt werden können. Dies wird bei einem angemessenen Verhältnis von Aufwand zu Nutzen immer schwerer realisierbar.

Die heute verwendeten Verkehrsflugzeuge besitzen ein Fahrwerksystem, das bis zu 15 % von der Betriebsleermasse unter Berücksichtigung von sogenannten Schneeballeffekten ausmacht. Der Schneeballeffekt beschreibt verkettete Auswirkungen auf der Gesamtflugzeugebene, die durch den Primäreffekt ausgelöst werden. Mit dem revolutionären Fahrwerkskonzept GroLaS (siehe Bild 1), bei dem auf das schwere Flugzeugfahrwerk verzichtet wird und das Flugzeug auf einem bodengebundenen Fahrwerksystem startet, landet und rollt, ergeben sich ökonomische (z.B. bis 12% weniger Betriebskosten), ökologische (z.B. bis 25% weniger CO₂, bis 35% weniger Lärm) und operationelle Vorteile (z.B. Seitenwindlandungen inkl. Windvorhaltewinkel).

2. BODENGBUNDENES FAHRWERK- SYSTEM

GroLaS (Ground-based Landing Gear System) ist ein bodenbasiertes Fahrwerksystem, das den regulären Start-, Lande- und Rollvorgang für fahrwerklose Verkehrsflugzeuge ermöglichen soll.

In einer Konzeptstudie im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Spitzenclusterforschungsprojektes „Airport 2030“ soll die Machbarkeit unter systemtechnischen, ökonomischen, ökologischen und operationellen Aspekten überprüft werden.

2.1. Aufbau und Funktionsweise

Das derzeitige Systemkonzept von GroLaS (siehe Bild 2) hat zwei translatorische Freiheitsgrade (entlang der Bahn und quer zur Bahn) sowie einen rotatorischen Freiheitsgrad um die Hochachse. Bei einer Landung synchronisiert sich GroLaS mit dem anfliegenden Flugzeug und positioniert sich selbstständig darunter, damit dieses auf das bodengebundene Fahrwerksystem landen kann.

Die Bewegungen längs und quer zur Bahn und die Rotation um die Hochachse wurden auf die drei Baugruppen des Fahrwerksystems aufgeteilt, die folgende Eigenschaften besitzen:

1. Schlitten
 - Bewegung längs zur Landebahn auf Schienen mit einem Antriebssystem, das dem des Transrapid ähnelt
 - Synchronisierung mit der Landegeschwindigkeit des Flugzeuges parallel zur Fahrbahn
 - Positionierung in Fahrbahnrichtung
 - Umwandlung von Bremsenergie in elektrische Energie
 - Unterstützung bei der Beschleunigung des Flugzeugs auf die Startgeschwindigkeit
 - Aufnahme des Wagens
2. Wagen
 - Bewegung und Positionierung zum Flugzeug quer zur Bahn
 - Aufnahme des Bodenfahrwerkes
3. Bodenfahrwerk
 - Drehbare Lagerung um die Hochachse und damit ermöglichen von Landungen mit Windvorhaltewinkel
 - Positionierung um die Gierachse des Flugzeuges
 - Verknüpfung über eine Schnittstelle mit dem Flugzeug
 - Aufnahme des Landestoßes.

Es wären keine wesentlichen Änderungen der bestehenden Betriebsabläufe notwendig, da der Pilot bzw. der Autopilot landen würde wie auch bei Flugzeugen mit Fahrwerk; denn GroLaS stellt sich dynamisch auf das Flugzeug ein.

Durch die geplante Anordnung des Systems bleibt die Landebahn in ihrer herkömmlichen Beschaffenheit bestehen, so dass die duale Benutzbarkeit der Landebahn möglich ist. Das bedeutet, dass konventionelle und fahrwerklose Flugzeuge gemeinsam die Landebahn nutzen können.

Nach der Landung wird das Bodenfahrwerk mit dem Flugzeug von dem Wagen abgekoppelt und rollt mit einem im Bodenfahrwerk integrierten Antrieb zum Terminal.

2.2. Systemauswirkungen

Vorteile:

- Große Masseneinsparpotential
 - Kraftstoff- und CO₂-Reduktion pro Nutzlast
- Kosteneinsparpotential
 - Wegfall eines der teuersten Zukaufteile nach den Triebwerken
 - Geringerer flugzeugseitiger Wartungsaufwand

- Triebwerksschonung
- Operationelle Vorteile
 - Aufsetzen mit Wind-Vorhaltewinkel
 - Vermeidung von Bahnüberschiebungen
 - Unabhängigkeit von der Bahnbeschaffenheit.

Die Bremsenergie könnte mithilfe eines transrapidähnlichen Antriebssystems in elektrische Energie umgewandelt werden. Der Lärm wird reduziert und die Triebwerke geschont, weil auf den Umkehrschub bei der Landung verzichtet werden könnte. Das Flugzeug wird nicht nur gebremst, sondern auch von dem System beim Start zur Anfangsbeschleunigung bis zum Rotieren unterstützt. Somit kann der Startschub auf 75 Prozent [5] der Triebwerksleistung reduziert werden (Derated T/O).

Nachteile:

- Hoher Entwicklungs- und Kostenaufwand für die Installation des bodenseitigen Fahrwerksystems
- Hoher Zertifizierungsaufwand
- Eingeschränkte operationelle Flexibilität fahrwerkloser Flugzeuge für die Airline.

Das GroLaS Projekt ist eine Studie, die sich am Anfang befindet. Es sind noch große organisatorische und technische Herausforderungen zu meistern, bevor das komplexe bodengebundene Fahrwerksystem marktreif ist.

3. SCHNITTSTELLEN

3.1. Anforderungen

Herkömmliche Fahrwerke haben fünf Hauptaufgaben [6]:

1. Absorption des Landestoßes und Stöße, die beim Rollen auftreten
2. Ermöglichen von Bodenmanövern: Rollen, Startrollen, Landerollen und Lenken
3. Bremsen
4. Erlauben des Schleppen von Flugzeugen
5. Verhinderung von übermäßigem Verschleiß der Fahrbahnoberfläche.

Die Aufgaben eins bis fünf werden bei GroLaS von dem Bodenfahrwerk übernommen, wobei der Wagen und Schlitten auch die Bremsaufgabe hat (vergleiche Abschnitt 2.1).

Nachfolgend sind die Anforderungen an die Schnittstelle zusammengefasst:

- Austauschbarkeit zu den bisherigen Fahrwerken muss gegeben sein

- Die Belastungen an den Anschlusspunkten müssen kleiner/gleich den bisherigen Belastungen sein
- Die Schnittstelle muss deutlich leichter sein als die bisherigen Fahrwerke
- Die Komplexität der Schnittstelle ist so gering wie möglich zu halten
- Das System sollte wartungsarm und kostengünstig sein
- Das Rotieren bei Start und Landung und das einseitige Aufsetzen mit einem Fahrwerksbein müssen möglich sein
- Die Schnittstelle muss mit dem bisherigen GroLaS Konzept kompatibel sein (siehe Bild 2).
- Die auftretenden Kräfte, die im nächsten Absatz erläutert werden, müssen von der Schnittstelle übertragen werden.

Die Lasten lassen sich in drei verschiedene Arten gliedern [6]:

1. Vertikale Lasten
2. Longitudinallasten
3. Laterale Lasten.

Die vertikalen Lasten werden hauptsächlich durch den Landestoß, der Gewichtskraft des Flugzeugs und das Rollen über unebene Oberflächen verursacht. Longitudinallasten wirken horizontal in Längsrichtung des Flugzeugs und werden vorwiegend durch den Drehbeginn (Spin-up) der Räder beim Aufsetzen, die Bremslasten und den Widerstand beim Rollen verursacht. Laterale Lasten treten bei Landungen und Rollen mit Seitenwind sowie bei Kurvenfahrten auf.

3.2. Funktionsanalyse

Für Flugzeuge ohne Fahrwerksystem ist die reguläre Landung nur auf Flughäfen mit einem bodengebundenen Fahrwerksystem möglich. Dabei fliegt der Pilot wie auch bei Flugzeugen mit konventionellem Fahrwerk an. Bei einer Landung synchronisiert sich GroLaS vor dem Aufsetzen mit dem Flugzeug. Beim Airbus A380 beträgt die Landeanfluggeschwindigkeit ungefähr 72 m/s (260 km/h). Diese Geschwindigkeit entspricht mindestens der 1,23-fachen Stallgeschwindigkeit v_s (siehe CS 25.125). Bei der Landung muss eine sichere Verbindung zwischen Flugzeug und Bodenfahrwerk über die Schnittstelle trotz den hohen Geschwindigkeiten und eventuelle Störgrößen, wie zum Beispiel Seitenwind oder Böen, möglich sein.

Die Schnittstellen am Flugzeug und Bodenfahrwerk müssen zueinander ausgerichtet werden. Dennoch können Positionsabweichungen durch kurzfristig auftretende Störgrößen nicht ausgeschlossen werden. Daher müssen sich die flugzeugseitigen und

bodenseitigen Schnittstellen zusätzlich zu der Regelungstechnischen Ausrichtung mechanisch zueinander zentrieren. Nach der erfolgreichen Verbindung der Schnittstelle vom Hauptfahrwerk rotiert das Flugzeug bei einer tail-down Landebedingung (Zweipunktlandung) bis dieses mit dem Bugfahrwerk auf die Fahrbahn aufsetzt. Diese Rotation um die Querachse wird Nickbewegung genannt. Für den Fall der Landung mit Seitenwind wird das Flugzeug in den Wind gedreht und es kann passieren, dass das Flugzeug mit einem Rollwinkel aufsetzt. Das rechte und linke Hauptfahrwerk setzen in diesem Fall nicht gleichzeitig auf.

Die Einzelfunktionen der mechanischen Schnittstelle werden wie folgt in den drei Punkten zusammengefasst:

1. Zentrieren der mechanischen Schnittstelle
2. Rotieren bei Start und Landung und das einseitige Aufsetzen mit einem Fahrwerksbein
3. Übertragung der vertikalen und horizontalen Kräfte.

Es muss durch Flugsimulation und -tests überprüft werden, ob die Schnittstelle vertikal arretiert werden muss. Beim Landestoss tritt nach dem Impulserhaltungssatz ein Rückstoß auf, der ein eventuelles Lösen der Verbindung hervorrufen könnte.

3.3. Lösungsprinzipien zu den Einzelfunktionen

Für die ermittelten Einzelfunktionen wurden mittels geeigneter Ideenfindungsmethoden Realisierungsmöglichkeiten gesucht. Eine Methode ist das Brainstorming, bei der in einer Gruppe nach Ideen gesucht wird. Die neuen Ideen entstehen durch gegenseitiges Anregen. Für eine erfolgreiche Konferenztechnik muss das Problem vorher klar definiert sein. Die Gruppenteilnehmer äußern spontan ihre Idee zum Thema. Dabei ist es wichtig, dass zunächst keine Bewertung stattfindet.

Eine wertvolle Hilfe sind auch Lösungskataloge, wie zum Beispiel aus der Bionik. Sie enthalten eine umfassende Sammlung von Wirkprinzipien für eine bestimmte Funktion.

Die Analyse von bereits vorhandenen ähnlichen Produkten ist Ausgangspunkt für die Lösungssuche, zum Beispiel ein Fangtrichter zur Luftbetankung (siehe Bild 3). Die Trichterform erfüllt die Funktion Zentrieren.

Gelenke ermöglichen Rotationsbewegungen. Sie werden in ihrer Beweglichkeit in drei Rotationsfreiheitsgraden unterschieden. Das einfachste technische Gelenk ist das Scharniergelenk. Es kann nur

um eine Achse rotieren. Das Kugelgelenk ist ein dreiachsiges Gelenk, das verhältnismäßig einfach aufgebaut ist. Das bekannteste Kugelgelenk der Technik ist wohl das fotografische Kugelgelenk, mit dem man eine Kamera um jede Raumachse drehen kann (siehe Bild 4).

Vertikale Kräfte lassen sich am materialeffizientesten über eine ebene Fläche aufnehmen. Es wirken aber noch horizontale Kräfte wie Seiten- und Bremskräfte. Diese Kräfte lassen sich z.B. durch formschlüssige Verbindungen aufnehmen. Ein Beispiel hierfür ist eine Anhängerkopplung aus den PKW- und Traktorenbereich. Eine Kugel in einer Kugelkalotte überträgt die Kräfte normal zur Oberfläche.

3.4. Kombination der Einzellösungen

Mit Hilfe einer Übersichtsmatrix, einem sogenannten morphologischen Kasten, können die geeignetsten Lösungsvarianten für ein Problem ermittelt werden. Dazu wird aus jeder Zeile der Matrix ein Lösungsprinzip zur Erfüllung einer Teilfunktion ausgewählt und miteinander verbunden. Der entstehende Linienzug ergibt eine Lösungskombination aller verschiedenen Teilfunktionen zur Erfüllung der geforderten Gesamtfunktion.

Es sollen nun zwei Konzeptvarianten kurz vorgestellt werden (siehe Bild 5):

Die Variante A ist die Kugel-Trichter-Lösung, bei der die Kugel über eine Verbindung zum Bodenfahrwerk verbunden ist. Die Variante B ist die Kegel-Kreuzgelenk-Lösung. Der Kegel besitzt zusätzlich ein Kreuzgelenk, um das Rotieren und das seitliche Kippen wie bei Variante A zu ermöglichen.

Die im morphologischen Kasten festgelegten ersten beiden Konzeptvarianten werden mit Hilfe der Punktbewertungsmethode mit Gewichtung der Bewertungskriterien nach [7] beurteilt. Die Beurteilungskriterien werden wie folgt gewichtet:

- Sicherheit mit 0,3
- Vertikale und horizontale Kräfte übertragen mit 0,2
- Zentrieren mit 0,15
- Nicken und Rollen mit 0,15
- geringe Komplexität mit 0,1
- Kosten mit 0,1.

Das Kriterium Kosten enthält die Herstellungs- und Wartungskosten der Schnittstelle. Die Gewichtersparnis wurde nicht als Kriterium mit aufgeführt, weil sich beide Varianten sehr stark ähneln und etwa das gleiche Massenersparnispotential besitzen.

Die Wertigkeit w einer Lösung lässt einschätzen, inwieweit sich eine Lösung eignet. Richtzahlen für den Wertigkeitsgrad sind nach [8]: $0,8 < w \leq 1$ ist sehr gut; $0,6 < w < 0,8$ ist gut bis brauchbar und $w \leq 0,6$ ist nicht befriedigend.

Die Variante B ist eine gute Lösung, schneidet aber in den Bereichen Komplexität und Sicherheit schlechter ab als die Kugel-Trichter-Lösung. Die Variante A hat eine Wertigkeit von 0,83 und somit einen Vorsprung von 0,13. Dieses Konzept ist im Vergleich der gefundenen Lösungen das mit der höchsten Wertigkeit und wird daher weiter verfolgt.

3.5. Integration in Langstreckenfrachtflugzeuge

Bei Langstreckenflugzeugen ist der Fluganteil im Verhältnis zu den Bodenzeiten höher als bei Kurzstreckenflugzeugen. Mit längerer Flugzeit steigt die relative Flugzeugnutzung und somit machen sich die Ersparnisse durch das geringere Gewicht oder durch den erhöhten Nutzlastanteil schneller bemerkbar. Zum anderen besteht bei Langstreckenfrachtflugzeugen das größte Potential, weil diese oftmals die gleichen Flugrouten fliegen und somit weniger Ausweichflughäfen mit einem Notlandesystem vorhanden sein müssten. Aus diesen Gründen sollen zunächst in erster Linie Langstreckenfrachtflugzeuge mit dem neuen System ausgestattet werden.

Es wird sich in dieser Arbeit auf Langstreckenflugzeuge von Airbus konzentriert, weil für diese Masseninformationen teilweise verfügbar waren, die ausgewertet werden konnten. Für eine erfolgreiche Etablierung des Systems müssen natürlich auch Flugzeuge von anderen Herstellern, wie zum Beispiel Boeing analysiert werden.

Der Airbus A380-800 ist eines der größten Verkehrsflugzeuge der Welt mit einer maximalen Abflugmasse von 569 Tonnen [9], wobei das komplette Fahrwerksystem etwa 25 Tonnen (ca. 8 Prozent von Flugzeugbetriebsleermasse) wiegt. Dieses besteht aus einem Bugfahrwerksbein (I) (siehe Bild 6) und vier Hauptfahrwerksbeinen. Das Hauptfahrwerk setzt sich zusammen aus zwei Rumpffahrwerken (II) in Triple-Twin-Tandem-Konfiguration (sechs Räder) und zwei Dual-Twin-Tandem Flügelfahrwerken (III). Die hintere Achse des Rumpffahrwerkes ist lenkbar und nicht bremsbar. Insgesamt besteht das Hauptfahrwerk aus 20 Rädern. Die Hauptfahrwerkslast wird zu 40 Prozent auf das Flügelfahrwerk und zu 60 Prozent auf das Rumpffahrwerk verteilt.

Dieses Flugzeug wird für die Auslegung der Schnittstelle herangezogen, weil es derzeit eines der schwersten und größten Verkehrsflugzeuge ist. Es

ist denkbar, dass leichtere Flugzeuge unter Verwendung eines angepassten Bodenfahrwerks auch GroLaS nutzen könnten. Zum anderen ist der A380 ein relativ neues Flugzeug, das voraussichtlich noch in den nächsten 20 Jahren fliegen wird.

3.6. Schnittstelle Flügelfahrwerk

Die Baugruppe *Schnittstelle Flügelfahrwerk* besteht aus folgenden Einzelteilen (siehe Bild 7) mit entsprechenden Merkmalen:

1. Flügelfahrwerkskupplung mit drei Befestigungsarmen
2. Lagerbuchsen mit Dämpfungselementen und Bolzen.

Die *Flügelfahrwerkskupplung* wurde in den verfügbaren Bauraum so eingepasst, dass ein maximaler Durchmesser von 1100 mm für den Trichter möglich ist. Die Strukturkomponente *Befestigungsarm* erfüllt mehrere Aufgaben:

- Verstärkung der Fahrwerkskupplungen
- Kraftweiterleitung zu den Lagerbuchsen.

Die Befestigungsarme wirken wie Rippen, die die Kugelkalotte mit Trichter verstetigen. Die Materialstärke der Kalotte konnte dadurch auf 20 mm reduziert werden. Die vertikalen und horizontalen Kräfte werden über die Arme in die Bolzen und in die Primärstruktur des Flugzeugs geleitet.

Es werden kurze und direkte Lastübertragungswege zwischen Kugelkalotte und vorhandenen Bolzen angestrebt, um unnötiges Gewicht durch Verstärkungsmaßnahmen zu sparen. Die Befestigungsarme zu den Haupt- und Nebenbolzen (HB und NB) mussten aber auf Grund der bestehenden Anbindung an den Rahmen des Flugzeugs gekrümmmt ausgeführt werden. Dadurch entstehen Spannungskonzentrationen an den Krümmungsbereichen, die eine Materialerhöhung dieser Bereiche zur Folge hat.

Der Befestigungsarm zum Seitenstrebenanschlusspunkt (SA) ist einer Biegebeanspruchung ausgesetzt. Um einen möglichst großen Flächenträgheitsmoment zu realisieren, wird das Material in den äußeren hoch belasteten Zonen angeordnet.

Die *Dämpfungsbuchsen* aus Elastomeren sollen axiale als auch radiale Bewegungen dämpfen.

3.7. Schnittstelle Rumpffahrwerk

Die Baugruppe *Schnittstelle Rumpffahrwerk* (siehe Bild 8) besteht aus:

1. Schubwandträger

2. Rumpffahrwerkskupplung
3. Fachwerkverstrebung
4. Dämpfungselementen und Bolzen.

Die *Rumpffahrwerkskupplung* ist symmetrisch aufgebaut. Die sechs Versteifungsrippen verteilen die Kraft von der Lagerbuchse auf die Oberfläche von Trichter und Kugelkalotte. Eine Lagerbuchse muss jedoch als Festlager ausgeführt werden, damit das System statisch bestimmt ist. Der Durchmesser des Trichters beträgt 1440 mm. Dieser ist größer als der Durchmesser von der *Flügelfahrwerkskupplung*, weil zum einen ausreichend Platz dafür in dem Rumpffahrwerksschacht vorhanden ist und zum anderen weil diese Schnittstelle sich zuerst bei einer Zweipunktlandung mit dem Bodenfahrwerk verkuppelt. Die Wandstärke ist 33 mm.

Der *Schubwandträger* ist ähnlich einem Doppel-T-Träger aufgebaut. Dieser besitzt zwei Flansche oben und unten, die das Biegemoment übertragen. Der untere Flansch ist dicker, weil durch diesen die Hauptspannungen „fließen“. Das Schubfeld zwischen den Flanschen wird durch die zwei Verstrebungen in drei Schubfelder geteilt. Die Verstrebungen verstehen zusätzlich das Schubfeld.

Die *Fachwerkverstrebung* hat zwei Hauptkraftübertragungsstreben, die die Kraft von der Augenlasche zum Anschlusspunkt der Flugzeugstruktur übertragen. Der versteifte Schubwandträger und die Fachwerkverstrebung werden über Bolzen und Dämpfungselemente mit der Schnittstelle verbunden.

3.8. Schnittstelle Bugfahrwerk

Die Baugruppe *Schnittstelle Bugfahrwerk* ist eine Kombination aus den Schnittstellen Flügel- und Rumpffahrwerk. Diese besitzt Elemente von den bereits vorgestellten Schnittstellen, die jedoch an die Lastfälle für das Bugfahrwerk angepasst wurden. Zum Beispiel gibt es *Befestigungsarme* von der *Flügelfahrwerkskupplung* und eine *Fachwerkverstrebung* von der *Schnittstelle Rumpffahrwerk*. Die Baugruppe besteht aus (siehe Bild 9):

1. Bugfahrwerkskupplung
2. Fachwerkverstrebung
3. Dämpfungselemente und Bolzen.

Die Rippenanzahl ist von sechs auf acht im Vergleich zur *Rumpffahrwerkskupplung* gestiegen. Allerdings haben diese eine geringe Stärke von 15 mm. Der Durchmesser des Trichters beträgt 1000 mm und besitzt eine Materialstärke von 15 mm.

4. ERGEBNISSE

Die einzelnen Schnittstellen sind im Vergleich zu den jeweiligen konventionellen Fahrwerksbeinen erheblich leichter:

- Schnittstelle Flügelfahrwerk um 87 Prozent
- Schnittstelle Rumpffahrwerk um 59 Prozent
- Schnittstelle Bugfahrwerk um 76 Prozent.

Die Massenersparnis bei der Schnittstelle am Flügelfahrwerk ist mit 87 Prozent am größten. Ein Grund hierfür ist die günstige Anbindung an die Struktur. Es bedarf keiner Zusatzstruktur, die den Spannungsverlauf verlängert.

Insgesamt kann mit den Schnittstellen die Fahrwerksmasse des A380 von etwa 25 Tonnen auf 6,7 Tonnen reduziert werden. Dies bedeutet eine Massersparnis von ca. 18,3 Tonnen (ca. 70 Prozent). Die Betriebsleermasse könnte somit um ca. 6 Prozent reduziert werden.

Die Effizienz von Flugzeugen berechnet sich aus dem Kraftstoffverbrauch pro Nutzlast pro geflogener Strecke. Die Effizienz kann bei Reduzierung der Leermasse um die eingesparte Fahrwerksmasse auf zwei Arten erhöht werden:

1. Erhöhung der Nutzlast
2. Fliegen mit geringerer Betriebsleermasse.

Da die Nutzlasterhöhung durch die maximale Leertankmasse (MZF - Maximum Zero Fuel Weight) begrenzt ist, wurden in Absprache mit der Airbus Gewichtsabteilung beide Arten kombiniert betrachtet. Dabei ergibt sich eine Effizienzsteigerung von bis zu 16,5 Prozent. Der nutzlastbezogene CO₂-Ausstoß reduziert sich analog um den gleichen Wert.

Die Schnittstellen erfüllen nahezu alle die in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen. Jedoch müssen die Anbindungspunkte der vorhandenen Struktur, beispielsweise die Bolzenhalterung vom Seitenstrebenanschlusspunkt (Side Strut) vom Flügelfahrwerk, verändert werden. Die Schnittstellen sind nicht ausfahrbar und benötigen keine Hydraulik. Die Schnittstellen müssen geschmiert werden. Durch die geringere Teilanzahl reduziert sich der Montage- und Herstellungsaufwand flugzeugseitig. Die Schnittstellen übertragen vertikale und horizontale Kräfte und ermöglichen durch die Kugelform Nick- und Rollbewegungen bei Start und Landung.

5. AUSBLICK

Es wurden erste Abschätzungen über die Masseneinsparungen durch Austausch des Fahrwerksys-

tems mit den in dieser Arbeit konzeptionierten Schnittstellen aufgezeigt. Dies entspricht der geringstmöglichen Integrationstiefe. Weiteres Einsparpotential bietet sich auf der Struktur- und Systemebene bei einem neuen Flugzeugentwurf. Die Einsparung in größeren Integrationstiefen kann somit noch steigen. Folgende Einsparungen könnten möglich sein:

- Der Lastübertragungsweg zur Schnittstelle ist kurz, so dass dadurch die Anzahl der Teile (z.B. Fachwerkverstrebung) und damit die zusätzliche Masse reduziert werden könnten
- Die Flugzeugsysteme, wie Hydraulikerzeugung, -verteilung könnten kleiner dimensioniert werden, da die Systeme ohne das Fahrwerkssystem geringere Leistungsanforderungen haben
- Eine leichtere Rumpfstruktur könnte realisiert werden, weil der Flugzeugrumpf nicht mehr durch den voluminösen Hauptfahrwerksschacht und die damit verbundene Unterbrechung der röhrenförmigen Außenstruktur geschwächt wird
- Des Weiteren ist der Fahrwerksschacht nicht druckbeaufschlagt und muss daher zur Druckkabine abgedichtet werden. Dafür werden Pressure Bulkheads benutzt, die eingespart werden könnten, wenn bei einem neuen Flugzeugentwurf der Biegetorsionskasten ein integraler Bestandteil der druckbeaufschlagten Schalenstruktur wird
- Die Belly Fairing und der Kink könnten wegfallen, was produktionstechnische, aerodynamische und Kostenvorteile hätte. Der Kink ist der hintere Knickpunkt bei einem typischen Flügel
- Die Schubumkehrer könnten entfallen, weil GroLaS das Flugzeug verzögert.

Es bleiben einige Fragen im Rahmen dieser Arbeit offen. Genauer zu betrachten sind die neuen Risiken, die mit der Nutzung von fahrwerklosen Flugzeugen entstehen. Es ist mit weiteren statischen- und Ermüdungsfestigkeit FEM-Rechnungen durch den Flugzeughersteller zu prüfen, ob die eingeleiteten Kräfte durch die Schnittstellen die maximal zulässigen Werte nicht überschreiten.

Als Material für die Schnittstellen wurde hochlegierter Stahl gewählt. Die hohe Dichte macht die Konstruktion schwer. Es können andere Werkstoffe geprüft werden, wie zum Beispiel aushärtbares Aluminium oder Sandwich Materialien.

Es muss durch Flugsimulation oder Versuche überprüft werden, ob eine vertikale Arretierung der Schnittstellen vorhanden sein muss.

Für eine detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse müssen die Herstellungskosten ermittelt werden.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT e.V. (DLR) (Hrsg.): *Einbeziehung des Luftverkehrs in den CO2-Emissionshandel*. 2010 – URL: http://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/pdf_dokumente/5PR_01_LF_Emissionshandel.pdf (2010-07-10)
- [2] AIRBUS INDUSTRIES: *Global Market Forecast 2009 – 2028*, 2009 – URL: <http://www.airbus.com/en/corporate/gmf/> (2010-02-17)
- [3] ARGÜELLES, Pedro; BISCHOFF, Manfred; BUSQUIN, Philippe; et al.: *European Aeronautics: A Vision For 2020*. Luxemburg : European Communities, 2001
- [4] BINNEBESEL, Jan: *Expertenbefragung zu GroLaS im Rahmen des Forschungsprojektes "Airport 2030" AP 1.2*. Präsentation, 2010
- [5] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (Hrsg.): *Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25, AMC 25-13*. 2006
- [6] ROSKAM, Jan: *Airplane design Part 4, Layout design of landing gear and systems*. Ottawa, Kan. : Roskam Aviation and Engineering Corp., 1989
- [7] ZANGEMEISTER, Christof: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik : Eine Methodik zur multi-dimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. München : Wittemannsche Buchhandlung, 1970
- [8] GERHARD, Edmund: *Entwickeln und Konstruieren mit System : ein Handbuch für Praxis und Lehre*. Renningen-Malmsheim : expert-Verl., 1998
- [9] AIRBUS INDUSTRIES: *AIRPLANE CHARACTERISTICS*, 2010 – URL: <http://www.airbus.com/en/services/customer-services/maintenance-engineering/tech-data/aircraft-characteristics/> (2010-02-19)
- [10] STEPHENS, Christopher: *Luftbetankung*. Defense Imagery Management Operations Center, 2010. – Bild-Nr. 060510-N-9621S-032, 2006, URL: <http://www.defenseimaging.mil/imagery.html# a=search&s=s-3%20viking&guid=4b232e5c967fa475fd4b0e4022a78535bbcf78f6> (2010-06-10)

- [11] GREINER, Ralph: *Kugelgelenk*. Eigene Webseite, 2002 – URL: <http://www.greiner-ralph.de/kugelgelenk.htm> (2010-07-20)
- [12] STOTT, Glenn: *Harte A380 Landung*. AIR&SPACE Magazine, 2009. – URL: <http://www.airspacemag.com/snapshot/53730737.html> (2010-07-21)

Anhang



Bild 1 Derzeitiges Konzept vom bodengebundenem Fahrwerksystem GroLaS

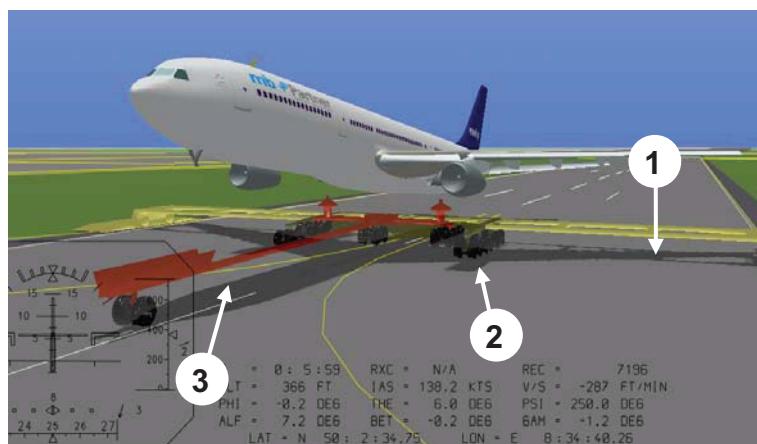


Bild 2 Aufbau von GroLaS



Bild 3 Fangtrichter zur Luftbetankung [10]

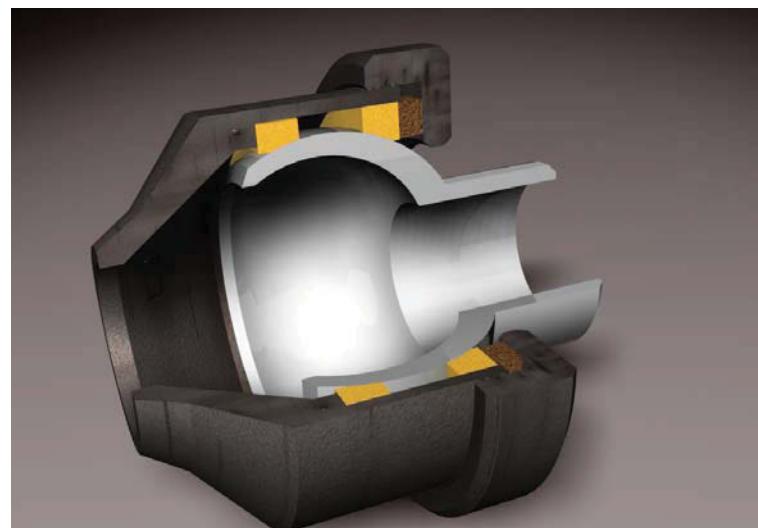


Bild 4 Kugelgelenk zum Rotieren und Kräfteübertragen [11]

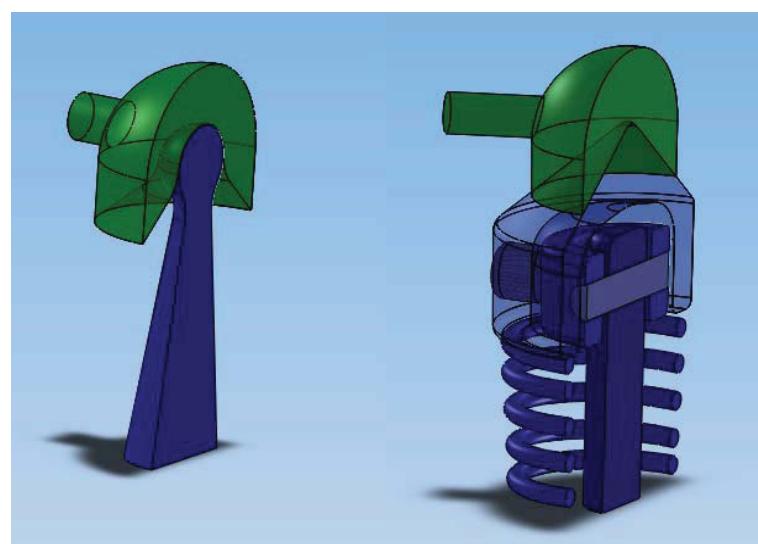


Bild 5 Kugel – Trichter Lösung (links) und Kegel – Kreuzgelenk-Lösung (rechts)

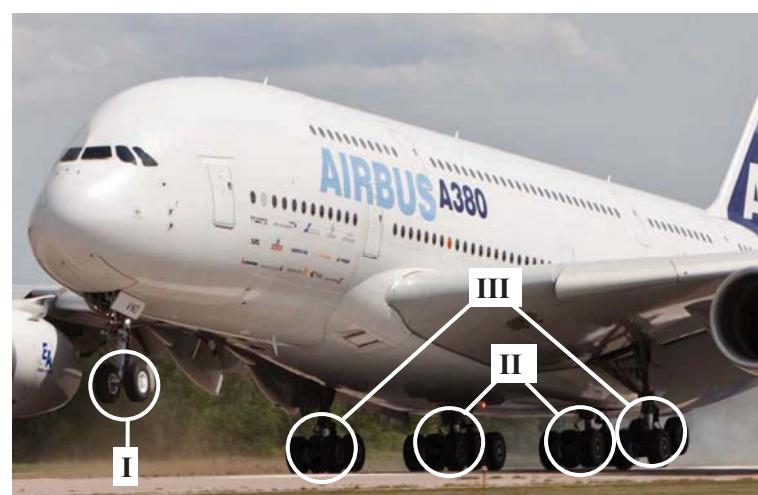


Bild 6 Fahrwerksaufbau des Airbus A380 [12]

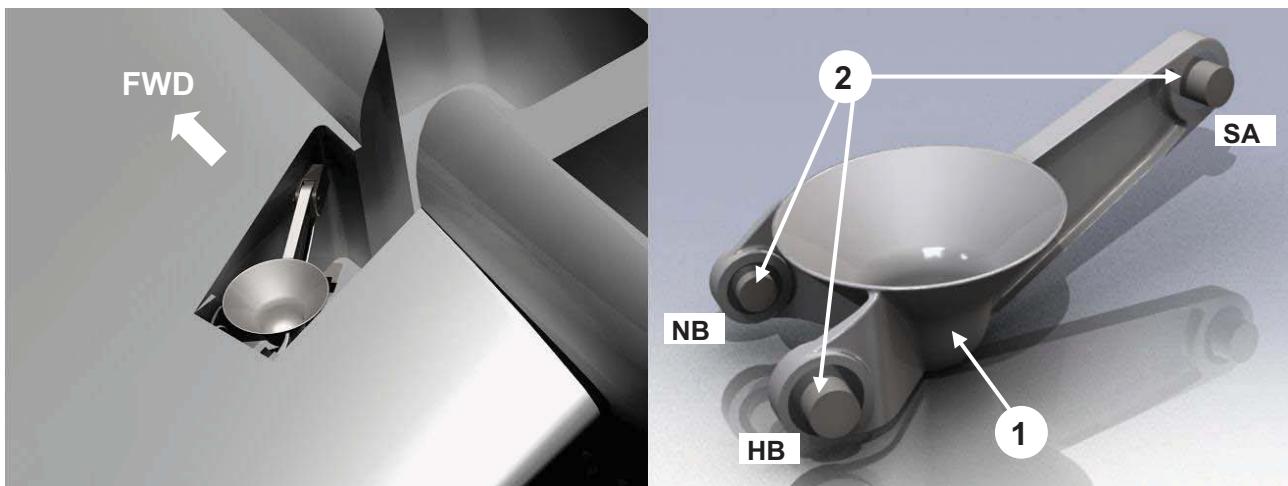


Bild 7 Schnittstelle Flügelfahrwerk

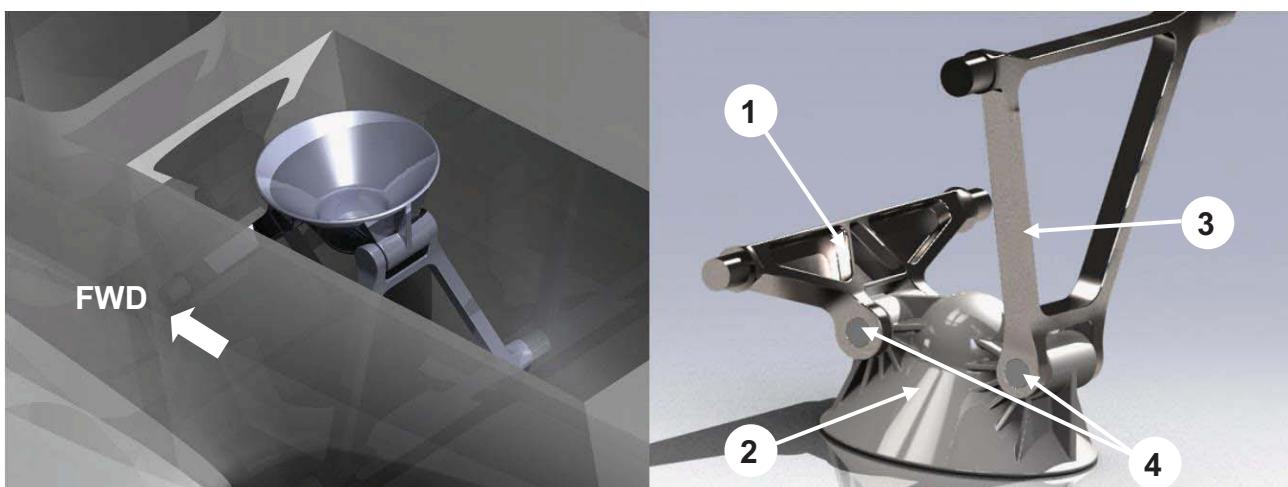


Bild 8 Schnittstelle Rumpffahrwerk

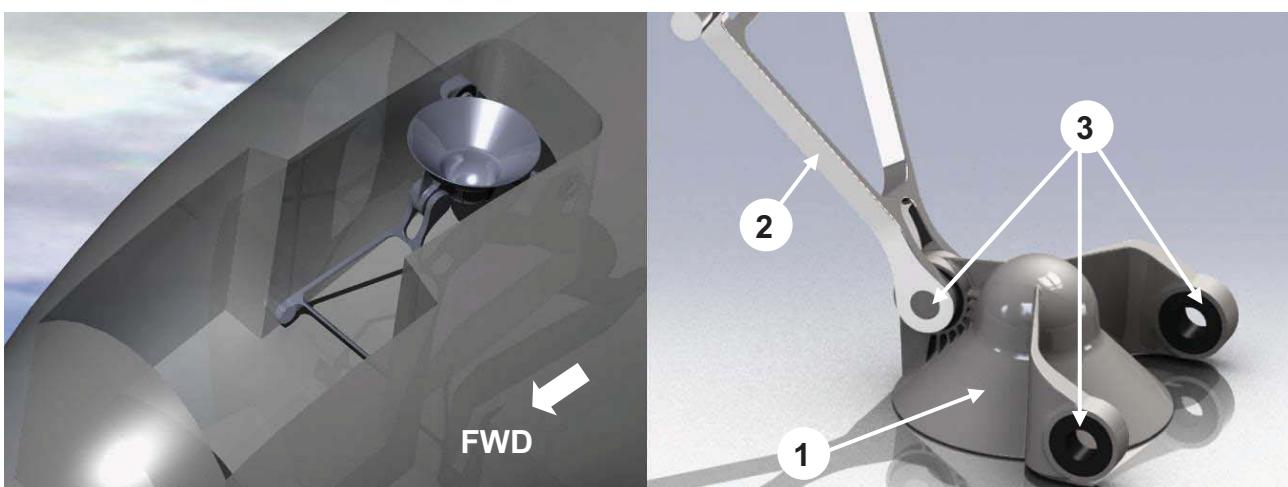


Bild 9 Schnittstelle Bugfahrwerk