

Entwicklung und Festigkeitsbewertung einer Patiententrage für den Einsatz in der Flugrettung

Kurzfassung—Die Patiententrage ist ein zentrales Ausrüstungsteil in der Luftrettung. Sie ermöglicht den Transport des Patienten vom Unfallort zum Luftfahrzeug und seine sichere Fixierung im liegenden Zustand im Hubschrauber. Der Einsatzort ist häufig einige Meter vom Landeplatz entfernt, weshalb die Trage von den Rettungskräften getragen werden muss. Das Gewicht des Produkts spielt dabei eine entscheidende Rolle, da leichtere Tragen die Belastung für die Einsatzkräfte verringern und einen schnelleren und effizienteren Transport des Patienten ermöglichen.

Durch den Einsatz von Kohlefaserwerkstoffen soll im Vergleich zu üblichen Aluminiumkonstruktionen eine Gewichtsreduktion erzielt werden, während gleichzeitig die Funktionalität verbessert wird. Angesichts der hohen Anforderungen in der Flugrettung, die sowohl die strukturelle Integrität als auch die funktionale Vielseitigkeit der Trage betreffen, konzentriert sich diese Arbeit auf die Entwicklung eines neuen Tragenkonzepts. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind umfangreiche Festigkeitsberechnungen sowohl unter statischer als auch unter dynamischer Belastung notwendig.

Ein entscheidender Bestandteil ist die Erfassung der dynamischen Belastungen direkt im Einsatzszenario. Dazu werden Beschleunigungssensoren in einem Hubschrauber installiert, um die auftretenden Schwingungen während des Flugbetriebs zu messen. Diese realen Daten fließen direkt in die Festigkeitsberechnungen ein und ermöglichen eine Aussage über die Dauerfestigkeit der Trage.

Der methodische Ansatz umfasst die Umsetzung der Konstruktion in der CAD-Software CATIA®, gefolgt von einer detaillierten Analyse der Belastungen und Betriebsbedingungen. Abschließend wird die Festigkeit der Konstruktion mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) unter Einsatz der Software ANSYS® bewertet. Durch diesen integrativen Ansatz soll die Effizienz und Sicherheit des Patiententransports in der Luftrettung signifikant gesteigert werden.

Schlagwörter—Patiententrage, Strukturanalyse, Flugrettung.

I. EINLEITUNG

Die Patiententrage ist ein unverzichtbares Ausrüstungsteil in der Luftrettung, das entscheidend zur schnellen und sicheren Versorgung von Notfallpatienten beiträgt. Seit den frühen Tagen der Luftrettung hat sich die Technologie erheblich weiterentwickelt, wobei moderne Patiententragen heute eine hohe Funktionalität und Sicherheit bieten. Diese Entwicklung ist eng mit den Fortschritten in der Materialwissenschaft und Konstruktionstechnik verbunden.

Die Luftrettung spielt eine zentrale Rolle im Gesundheitswesen, indem sie schnelle und effiziente Transporte von Patienten ermöglicht, besonders in schwer zugänglichen oder weit entfernten Gebieten. Technologische Innovationen, wie leichtere und robustere Materialien, haben die Effizienz und Sicherheit dieser Transporte weiter verbessert. Insbesondere der Einsatz von Kohlefaserverbundwerkstoffen stellt einen bedeutenden Fortschritt dar, da sie eine erhebliche Gewichtsreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung der Festigkeit ermöglichen. In dieser Arbeit soll eine neue Trage aus Kohlefaser entwickelt werden, die diese Vorteile optimal nutzt.

Die Ausrüstung für die Luftrettung muss extremen Bedingungen standhalten. Dies betrifft nicht nur die strukturelle Integrität während des Fluges, sondern auch die Fähigkeit, bei Crash-Situationen den Belastungen standzuhalten.

Die geplante Trage wird in ein bestehendes Beladungssystem des H135-Helikopters integriert, indem sie über schwenkbare Scharniere an vier Bolzen fixiert wird. Diese Integration ermöglicht einen schnellen und sicheren Transport des Patienten vom Unfall-

ort zum Hubschrauber und weiter ins Krankenhaus.



Abbildung 1. Helikopter EC 135 [1]

Regulatorische Anforderungen und Zertifizierungen spielen eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung und Zulassung von Luftfahrtbauteilen. Die Einhaltung von Richtlinien, wie den CS-27-Richtlinien der Europäischen Luftfahrtbehörde, stellt sicher, dass die Tragen sowohl unter normalen als auch extremen Bedingungen zuverlässig den Belastungen standhält. [2]

Ergonomie und Design sind ebenfalls kritische Aspekte. Eine gut gestaltete Trage erleichtert nicht nur den Transport und die Handhabung durch die Rettungskräfte, sondern erhöht auch den Komfort und die Sicherheit für den Patienten. In der Praxis haben sich ergonomische und benutzerfreundliche Designs als entscheidend erwiesen, um die Effizienz und Sicherheit der Rettungsmissionen zu maximieren.

Durch diese umfassende Betrachtung der technologischen, regulatorischen und ergonomischen Aspekte wird die Bedeutung der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Patiententragen für die Luftrettung deutlich. Insbesondere die Entwicklung einer neuen Trage aus Kohlefaser könnte einen wichtigen Beitrag zur Effizienz und Sicherheit dieser lebenswichtigen

Rettungseinsätze leisten.

II. KONZEPTENTWICKLUNG UND BEWERTUNG

Faserverbundwerkstoffe bieten aufgrund ihrer herausragenden geometrischen Anpassungsfähigkeit vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten für die Entwicklung einer Trage. Diese Werkstoffe ermöglichen die Integration komplexer Freiformflächen, die nicht nur optisch ansprechend sind, sondern auch eine gezielte Anpassung der strukturellen Steifigkeit an die jeweiligen Belastungsanforderungen erlauben.

Um eine fundierte Grundlage für die geometrische Optimierung der Trage zu schaffen, wird das Verfahren der Topologieoptimierung eingesetzt. Dieses rechnergestützte Verfahren ermöglicht es, die Materialverteilung innerhalb eines definierten Bauraums so zu gestalten, dass das resultierende Bauteil unter den gegebenen Lastfällen eine maximale Steifigkeit bei minimalem Materialeinsatz aufweist.

Nach ersten Erkenntnissen über geeignete Gestaltungsgeometrien wurden verschiedene Konzepte für die optimale Umsetzung der Tragenkonstruktion definiert. Die Konzeptentwicklung umfasst drei Varianten:

Das erste Konzept, das Rohrprofil-Konzept, verwendet Faserverbundwerkstoffe in Form von Rohrprofilen, die mit Aluminium-Frästeilen verbunden werden. Diese Bauweise bietet eine hohe Stabilität und eine modulare Bauweise, die Reparaturen erleichtert.

Das zweite Konzept, die Integralbauweise, ist eine Konstruktionsmethode, bei der mehrere Bauteile zu einem einzigen Bauteil zusammengeführt werden. Dadurch entsteht eine nahtlose Struktur ohne zahlreiche separate Verbindungsstellen, was die Gesamtkonstruktion steifer und leichter macht.

Das dritte Konzept, das hybride Konzept, kombiniert Faserverbundwerkstoffe mit Metallkomponenten und vereint so die Vorteile beider Materialien. Die Metallverbindungen erhöhen die Präzision und Stabilität der Konstruktion, während der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen das Gewicht reduziert.

Die Bewertung der Varianten erfolgt nach mehreren Kriterien. Ein zentrales Kriterium ist das Gewicht, da eine leichtere Trage die körperliche Belastung des Personals verringert und die Manövrierbarkeit verbessert. Die Fertigungskosten spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, da die Produktionsmethoden für kleine Serien wirtschaftlich sein müssen. Die Reinigung der Trage ist ein weiteres zentrales Kriterium, da sie leicht zu desinfizieren und abwaschbar sein muss. Im Versagensfall darf die Struktur bei punktuellen Schäden nicht komplett versagen, um die grundlegende Funktionalität zu gewährleisten. Auch die Reparaturfreundlichkeit ist ein wichtiger Aspekt, damit beschädigte Teile schnell und kostengünstig ersetzt werden können. Schließlich ist die Ergonomie entscheidend, damit die Trage sicher und bequem von mehreren Personen getragen werden kann.

Eine anschließende Nutzwertanalyse ergab, dass die hybride Bauweise die meisten Vorteile bietet und deshalb weiterverfolgt wurde.

III. KONSTRUKTION

Das ausgewählte Konzept wird mit der Computer Aided Design (CAD)-Software Catia® erstellt. Bei der Konstruktion wurde besonders darauf geachtet, den Grundsätzen des konstruktiven Leichtbaus zu folgen. Dabei wurde die Materialverteilung innerhalb der Struktur so optimiert, dass die Belastungen effizient entlang der Lastpfade aufgenommen werden können. Stark belastete Bereiche wurden gezielt verstärkt, während in weniger belasteten Bereichen die Wandstärken reduziert wurden, um Gewicht zu sparen. Zusätzlich kamen spezifische Leichtbaumaßnahmen wie das Aufbringen von Stringern, der Einsatz von Sandwichstrukturen und gekrümmten Schalen zum Einsatz, um die Biegesteifigkeit zu erhöhen, ohne das Gewicht wesentlich zu steigern. Diese Techniken tragen entscheidend dazu bei, sowohl das Gewicht zu minimieren als auch die strukturelle Leistung zu maximieren. [3]

Für die Konstruktion ist es wichtig, das geeignete Fertigungsverfahren zu berücksichtigen, um die Geometrie bestmöglich für den späteren Formenbau

vorzubereiten und gleichzeitig sicherzustellen, dass das Material problemlos verarbeitet werden kann. Bei der Herstellung der Kohlefaserbauteile für die Patiententrage wird das Prepreg-Verfahren verwendet. Prepreg steht für "pre-impregnated fibers" und bezeichnet faserverstärkte Kunststoffe, bei denen die Fasern bereits mit Harz vorimprägniert sind. Dieses Verfahren bietet eine hohe Kontrolle über das Harz-Faser-Verhältnis, was zu verbesserten mechanischen Eigenschaften und gleichmäßiger Qualität der Bauteile führt.

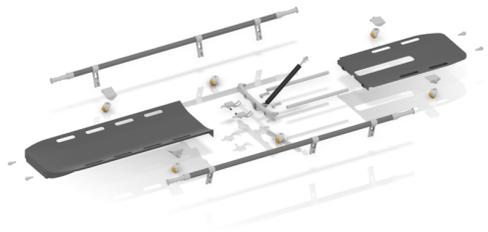


Abbildung 2. Explosionsdarstellung Tragenkonstruktion

Im Prepreg-Verfahren werden die vorimprägnierten Fasern in Lagen in eine einseitige Form eingelegt, die nur auf einer Seite eine Formoberfläche hat. Zunächst wird die Form mit einem Trennmittel behandelt, um das spätere Entformen zu erleichtern. Die Prepreg-Lagen werden dann nach einem festgelegten Muster in die Form eingelegt. Nach dem Einlegen wird das Laminat mit einer Vakuumfolie abgedeckt und luftdicht verschlossen. Durch Anlegen eines Vakuums werden überschüssiges Harz entfernt und die Lagen dicht zusammengepresst. Anschließend wird das vakuumverpackte Laminat in einem Autoklaven unter kontrollierten Temperatur- und Druckbedingungen ausgehärtet. Nach der Aushärtung wird das Bauteil aus der Form genommen und gegebenenfalls nachbearbeitet. [4]

Durch dieses Verfahren entstehen qualitativ hochwertige und leichte Kohlefaserbauteile, die den hohen Anforderungen der Luftrettung gerecht werden.

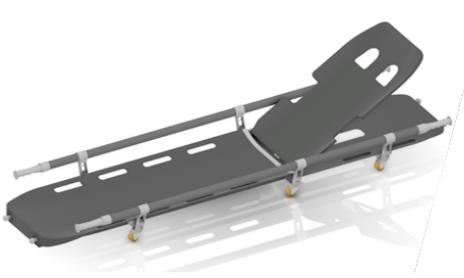


Abbildung 3. Isometrische Darstellung des CAD Modells

Die gesamte Konstruktion des Prototyps ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Trage wurde in drei große Hauptbauteile aufgeteilt: ein Fußteil, ein Oberkörperteil und die Rückenlehne. Abbildung 4 zeigt den Aufbau des Fuß Teilbereichs. Deutlich erkennbar sind das Hauptteil aus Faserverbund sowie die metallischen Anbindungselemente an die Krafteinleitungspunkte und die Anschlüsse zu den nebenliegenden Strukturteilen. Die Metallteile werden auf das Hauptteil verklebt und anschließend mit zusätzlichen Versteifungsrippen abgedeckt, welche ebenfalls verklebt werden, um die Stabilität weiter zu erhöhen.

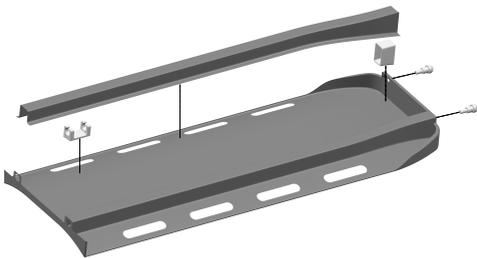


Abbildung 4. Explosionsdarstellung der Unterseite des Fußteils

IV. DATENERFASSUNG

Die Herstellung von Composite-Bauteilen erfordert teure Formen, weshalb die Produktion mehrerer Prototypen für reale Belastungstests unwirtschaftlich

ist. Daher ist eine Simulation der Konstruktion entscheidend. Neben statischen Simulationen ist auch die Untersuchung der Bauteillebensdauer von Bedeutung, wofür reale Messdaten erforderlich sind.

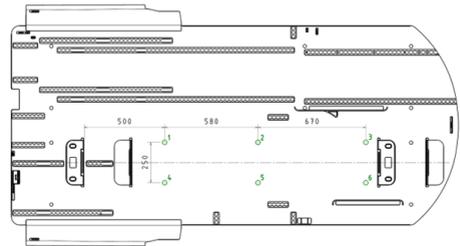


Abbildung 5. Sensorplatzierung auf dem Helikopterboden

Die Bauteile des Hubschraubers sind verschiedenen Schwingungen ausgesetzt, die zum Beispiel durch die Rotation der Rotorblätter oder der Triebwerke entstehen. Zur Messung dieser Schwingungen werden an den Kontaktpunkten der Trage Beschleunigungssensoren angebracht. Diese Sensoren erfassen die Schwingungen unter verschiedenen Flugbedingungen, die üblicherweise im Einsatz eines Rettungshubschraubers auftreten.

Es wurden verschiedene Betriebszustände wie Schweben, das Fliegen von steilen Kurven und Messungen im Geradeausflug bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt.

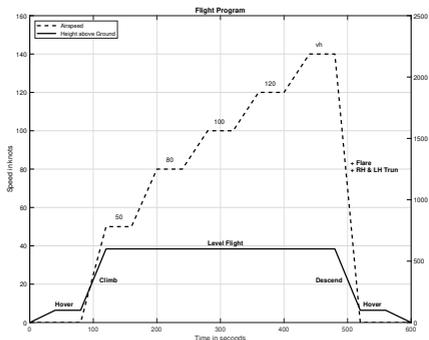


Abbildung 6. Grafische Darstellung des Flugprogramms

Für die Messung wurden triaxiale piezoelektrische Sensoren verwendet, die mithilfe eines Clips direkt auf den Hubschrauberboden geklebt wurden. Jeder Sensor verfügt über drei unabhängige Ausgänge für simultane Messungen in drei senkrecht zueinander stehenden Richtungen.

Der Messflug zur Datenerfassung wurde am 6. Juni 2024 im Raum Innsbruck durchgeführt. Dabei kam ein Hubschrauber vom Typ EC135 T2+ mit der Seriennummer 327 und der Registrierung OE-XVD zum Einsatz. Der Flug startete am Heliport Innsbruck (LOJO) und dauerte nur wenige Minuten, bis alle relevanten Betriebszustände erfasst werden konnten, wie in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7. GPS Tracking Messflug

Die erfassten Daten wurden anschließend mithilfe der Software Matlab[®] aufbereitet und analysiert. Dabei konnte die Erregerfrequenz des Hauptrotors

eindeutig durch eine Fourier-Transformation in den Messdaten identifiziert werden, wohingegen andere Erregerfrequenzen nicht klar detektiert werden konnten.

V. MODELLBILDUNG

Die Modellbildung umfasst mehrere Schritte, um eine präzise Simulation zu ermöglichen. Zunächst werden die Kohlefaserbauteile aus dem im CAD-Programm generierten Volumenmodell in ein Flächenmodell umgewandelt. Aufgrund der dünnwandigen Struktur und der großen Fläche werden diese Bauteile mit Schalenelementen modelliert, während die Verbindungselemente aus Aluminium als Solid-Elemente dargestellt werden.

Ein wichtiger Aspekt der Modellbildung ist die Diskretisierung der Bauteile, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden. Für dünnwandige Strukturen, wie die Faserverbundmaterialien, wurden Shell181-Elemente verwendet, die speziell für die Modellierung von dünnen Strukturen konzipiert sind. Volumetrische Bauteile, wie die Aluminiumverbindungen, wurden mit Solid187-Elementen modelliert. Diese 10-Knoten-Tetraederelemente sind besonders gut für komplexe Geometrien und nichtlineare Analysen geeignet. Um eine hohe Genauigkeit in kritischen Bereichen zu gewährleisten, wurde das Netz lokal verfeinert. Abbildung 8 zeigt die Vernetzung der Geometrie.

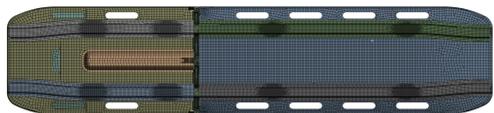


Abbildung 8. Vernetzung der Geometrie

Um den Rechenaufwand gering zu halten, wurden die Kontakte als starrer Verbund modelliert und mithilfe der Multi-Point-Constraint-Formulierungen (MPC) umgesetzt. Zusätzlich wurden die Randbedingungen mit der Remote Displacement-Funktion fest-

gelegt, um Bewegungen und rotatorische Freiheitsgrade gezielt einzuschränken und die Verbindungen zum Helikopterboden korrekt abzubilden.

Die Belastungen in der Simulation wurden durch Punktmassen modelliert, die als Ersatz für den menschlichen Körper auf den relevanten Flächen definiert und durch Beschleunigungen belastet wurden.

Die Modellierung der CFK-Bauteile war besonders anspruchsvoll aufgrund ihrer anisotropen Eigenschaften und variierenden Materialstärken innerhalb des Bauteils. Die Faserverbundbauteile wurden in monolithische Bereiche und Bereiche mit Sandwich-Bauweise unterteilt. In den Sandwich-Bereichen wurden zur Erhöhung der Steifigkeit bei geringem Gewicht Wabenstrukturen (Nomex® Honeycomb) integriert. Abbildung 9 zeigt die Richtungsabhängigkeit des E-Moduls und des Schubmoduls für eine 200g Lage.

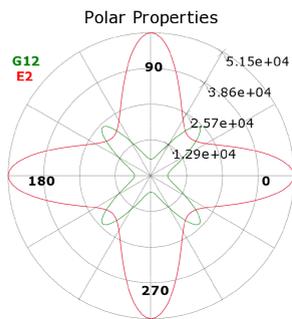


Abbildung 9. Richtungsabhängigkeit von E-Modul und Schubmodul (Einheiten in MPa) einer 200g Lage (F-T28 200/1270 CP0021 45)

Um optimale mechanische Eigenschaften zu gewährleisten, wurde der Lagenaufbau der Bauteile durch mehrere Parameterstudien analysiert und angepasst. Dabei wurden Dicke, Faserwinkel und Schichtanzahl so optimiert, dass die gewünschten Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf Elastizitätsmodul und Schubmodul, erreicht werden.

Tabelle I
LAGENAUFBAU HAUPTFLÄCHEN

Nr.	Bezeichnung	Orientierung in Grad	Dicke in mm
1	F-T28 200/1270 CP0021 45	0	0,22
2	F-T28 200/1270 CP0021 45	45	0,22
3	F-T28 200/1270 CP0021 45	-45	0,22
4	F-T28 200/1270 CP0021 45	0	0,22
5	Honeycomb Core	0	8
6	F-T28 200/1270 CP0021 45	0	0,22
7	F-T28 200/1270 CP0021 45	-45	0,22
8	F-T28 200/1270 CP0021 45	45	0,22
9	F-T28 200/1270 CP0021 45	0	0,22
Gesamtdicke:			9,76

VI. FINITE ELEMENTE SIMULATION

Bei isotropen Materialien wie Stahl wird der mehrachsiale Spannungszustand auf eine skalare Größe, die Vergleichsspannung, reduziert und mit der aus einem Zugversuch ermittelten Festigkeit verglichen. Bekannte Methoden sind die Gestaltänderungshypothese (von Mises), die Schubspannungshypothese (Tresca) und die Hauptnormalspannungshypothese. Diese Methoden sind jedoch für Faserverbundwerkstoffe mit orthotropem Materialverhalten ungeeignet, da CFK-Bauteile unterschiedliche Festigkeiten bei Zug und Druck aufweisen.[3].

Für die Beurteilung solcher Materialien werden komplexe Kriterien wie das Tsai-Wu-Kriterium, das Versagenskriterium nach Cuntze oder das Faserbruchkriterium nach Puck verwendet. Diese gelten oft als konservativ, da höhere Belastungen möglich sein können. Für die Auswertung der Tragsimulation wurde das Tsai-Wu-Kriterium verwendet, das ebenfalls in ANSYS® implementiert ist. Dieses Kriterium berücksichtigt sowohl die Zug- als auch die Druckfestigkeit von Faserverbundwerkstoffen und ermöglicht die Identifikation des Versagens, wenn eine Kombination aus Normal- und Schubspannungen die zulässigen Grenzwerte überschreitet. Durch die Berücksichtigung der anisotropen Materialeigenschaften und der unterschiedlichen Festigkeitsparameter liefert das Tsai-Wu-Kriterium eine präzise Einschätzung, in welcher Schicht das Versagen wahrscheinlich auftritt und ob es durch Zug-, Druck- oder Schubbeanspruchung verursacht wird. [5]

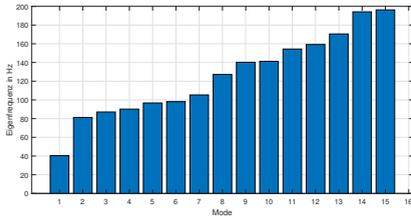


Abbildung 10. Ermittelte Eigenfrequenzen der Trage

Nach der statischen Beurteilung mittels des Tsai-Wu-Kriteriums wurde eine transiente Analyse durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Modalanalyse, um das dynamische Verhalten der Trage zu untersuchen und die Eigenfrequenzen des Systems zu ermitteln. Anschließend wurde die transiente Simulation durchgeführt, bei der die gemessenen Beschleunigungswerte auf die Kontaktpunkte der Trage mit dem Helikopterboden übertragen wurden. Die Simulation zeigte jedoch einen unrealistisch hohen Anstieg der Spannungen und Deformationen, unabhängig von den Solvereinstellungen, Randbedingungen, Netzverfeinerungen und dem Betriebszustand.

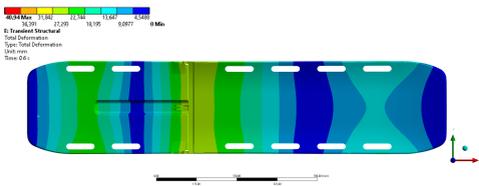


Abbildung 11. Verformung aus transienter Simulation für den Betriebszustand Level Flight 120 kias

Dieser Effekt konnte aufgrund seines quadratisch ansteigenden Verlaufs auf einen Sensoroffset zurückgeführt werden, der durch die zweifache Integration im Verlauf der transienten Simulation zu einem systematischen Fehler führte. Durch mathematische Operationen konnte dieser Fehler aus den Simulationsdaten extrahiert und von den Simulationsergebnissen entfernt werden.

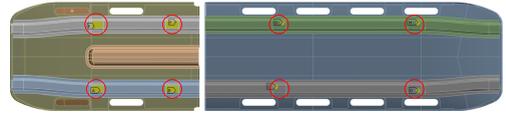


Abbildung 12. Einleitungspunkte der erfassten Beschleunigungsdaten

VII. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen eine erfolgreiche Gewichtsoptimierung der Trage. Mithilfe der durchgeführten Simulationen konnte eine Gesamtmasse von 8.35 kg ermittelt werden, was im Vergleich zu marktüblichen Systemen, die über 10 kg wiegen, eine Gewichtsreduktion von 1.65 kg bedeutet. Diese Einsparung trägt nicht nur zu einer verbesserten Handhabung bei, sondern erhöht auch die Effizienz im praktischen Einsatz, ohne dabei Kompromisse bei der Stabilität oder Funktionalität einzugehen.

Die statische Beurteilung der Trage erfolgte unter Anwendung des Tsai-Wu-Kriteriums. Die Simulationen ergaben, dass der kleinste Sicherheitsfaktor bei 1,66 liegt, was darauf hinweist, dass die Trage allen auftretenden Belastungen standhält. Der kritischste Lastfall trat in seitlicher Richtung auf, wo die höchsten Verformungen und die geringsten Sicherheitsfaktoren gemessen wurden.

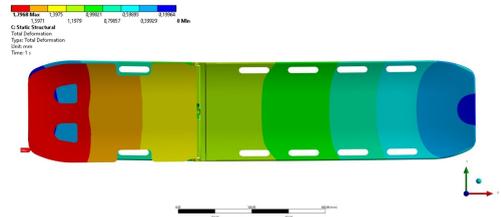


Abbildung 13. Verformung bei 16-facher Erdbeschleunigung in seitlicher Richtung

In Bezug auf die dynamischen Einflüsse konnte die Dauerfestigkeit der Trage nachgewiesen werden. Die maximalen Spannungen aus den statischen

und transienten Analysen ergaben einen Wert von 47.22 MPa, der deutlich unter der Dauerfestigkeitsgrenze von 440 MPa liegt. Dies bedeutet, dass die Trage für den untersuchten Betriebszustand eine unbegrenzte Anzahl von Lastzyklen ohne Materialermüdung oder Versagen aushalten kann.

VIII. REFLEXION UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für eine Patiententrage entwickelt, das durch den Einsatz von Kohlefaserverbundwerkstoffen eine erhebliche Gewichtsreduktion ermöglicht und den Anforderungen der Flugrettung gerecht wird.

Die Simulations- und Messtechniken trugen wesentlich zur Produktoptimierung bei, jedoch traten Herausforderungen bei der genauen Erfassung und Übertragung der realen dynamischen Belastungen in die Simulation auf. Weitere Tests, insbesondere realitätsnahe Prüfstände, könnten die Zuverlässigkeit der Konstruktion in extremen Szenarien verbessern.

Trotz der geringen ermittelten dynamischen Belastungen sollten die Betriebszustände mit kalibrierten Sensoren erneut erfasst und die Simulationen zur Validierung der Fehlerkompensation wiederholt werden. Ein erneuter Messflug konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen Dank aussprechen, die mich bei meiner Masterarbeit unterstützt haben. Bei meinem Betreuer Herrn Franz-Josef Falkner bedanke ich mich sehr herzlich für die Übernahme des Themas und für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

LITERATUR

- [1] A. Helikopters, "Outside painting," *Drawing 111M0043051*, 2019.
- [2] EASA, "Cs-27 small rotorcraft," *Certification Specification*, 2022.
- [3] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2nd ed., ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72190-1>

- [4] T. G. Gutowski, *Advanced Composites Manufacturing*. Wiley-Interscience, 1997.
- [5] ANSYS Inc, *Mechanical APDL, Failure Criteria for Reinforced Materials*, r17.1 ed., ANSYS Documentation, ANSYS Inc, 2016.



Matthias Neuner Student des Masterstudiengangs Mechatronik - Smart Technologies am MCI Innsbruck/Österreich.