

Nationales Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V-2

Verbund: AIL SMA

**Ausreifung und Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten
in Luftfahrzeuge**

Förderkennzeichen: 20W1723

Projektlaufzeit: 01.05.2019 – 30.04.2022 (verlängert bis 30.04.2023)

- Schlussbericht -

Kontakt:

Deharde GmbH
Am Hafen 14a
26316 Varel

Ansprechpartner:

Matthias Müller

Christopher Clark

E-Mail: m.mueller@deharde.de

E-Mail: c.clark@deharde.de

Tel.: 04451-9133-560

Tel.: 04451-9133-798

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Deharde

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis..... 3

Tabellenverzeichnis 4

Abkürzungsverzeichnis 5

1 Darstellung der Ergebnisse..... 6

1.1 Ziele des Vorhabens 7

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens 8

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 10

1.4 Erzielte Ergebnisse..... 10

 1.4.1 HAP 1: Definition von Anforderungen und Rahmenbedingungen 10

 1.4.2 HAP 2: Vortex-Prototyp im Versuchsaufbau..... 19

 1.4.3 HAP 3: Vortex-Generator im Einsatz 21

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... 26

1.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 26

1.7 Voraussichtlicher Nutzen..... 26

1.8 Fortschritte bei anderen Stellen..... 27

1.9 Veröffentlichungen..... 27

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Installierte Smart VGs im Flugtest 7

Abbildung 2: Flugphasen 9

Abbildung 3: Projektstrukturplan 10

Abbildung 4: Vortex-Generatoren in klassischer Anordnung 11

Abbildung 5: finale Nasengeometrie 13

Abbildung 6: Vergleich altes und aktuelles Design..... 13

Abbildung 7: SMA-Oberblick mit Lagerflächen und Isolierung..... 14

Abbildung 8: Überblick über die Integration des SMA..... 14

Abbildung 9: Taschen auf der Unterseite zur Aufnahme der Magnete 15

Abbildung 10: Designvergleich (oben ohne, unten mit Anti-Vereisungsmaßnahmen) 15

Abbildung 11: Integration des Umgebungs-Temperaturssensors, Ansicht von oben..... 16

Abbildung 12: Integration des Umgebungs-Temperaturssensors, Ansicht von unten..... 16

Abbildung 13: Winkelmessung 17

Abbildung 14: Abführungskanäle auf der Unterseite 17

Abbildung 15: Ergebnis der FEM-Berechnung vom Base, Lastfall 3 18

Abbildung 16: Ergebnis der FEM-Berechnung vom Panel, Lastfall 3 18

Abbildung 17: Montierter Altitude Activated VG..... 19

Abbildung 18: instrumentierter Altitude activated VG, Oberseite 20

Abbildung 19: instrumentierter Altitude activated VG, Unterseite 20

Abbildung 20: montierter altitude activated VG für den Windkanaltest 21

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Anforderungen 12

Tabelle 2: Übersicht über die Lastfälle..... 17

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Abkürzungsverzeichnis

SMA	Shape Memory Alloy / Formgedächtnislegierung
NASA	National Aeronautics and Space Administration
HAP	Hauptarbeitspaket
AP	Arbeitspaket

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

1 Darstellung der Ergebnisse

Der Einsatz von beweglichen Komponenten im Flugfahrzeugen ist derzeit stark auf bestehende Systeme und Techniken beschränkt. Für Aktuatoren im Bereich der Luftfahrt bestehen extreme Forderungen an Baugröße, Leistungsdichte, Gewicht und Zuverlässigkeit.

Bei der sogenannten SMA Technologie wird thermische Energie in mechanische Energie umgesetzt. Durch Erwärmen von SMA Bauteilen werden die vorher „trainierten Bewegungen“ ausgelöst. Dieses Projekt konzentriert sich auf die Anwendung von sogenannten Tubes. Hierbei handelt es sich um Hohlwellen, die eine rotatorische Bewegung ausführen können (z.B. bei einem Durchmesser von 7mm kann ein Drehmoment von 12Nm erzeugt werden).

Tubes sind sehr robust und verfügen bei geringem Gewicht über eine hohe Leistungsdichte und können in kompakter Bauweise angewendet werden. Dadurch kann eine Gewichtsersparnis erzielt werden, bzw. es soll erreicht werden, dass derzeit starr angebrachte Bauteile zu beweglichen Bauteilen werden.

In Zusammenarbeit mit der Fa. Boeing im Projekt ISL-SMA hat Deharde bislang die Fähigkeit erlangt, sogenannte SMA-Tubes zu trainieren und in Windkanalmodelle zu integrieren.

Im Projekt AIL-SMA soll im darauf aufbauend ein Prototyp eines fliegenden Bauteils entwickelt werden. Es soll im ersten Schritt ein Bauteil entwickelt werden, welches zu den nicht-kritischen Bauteilen am Flugzeug gehört, aber trotzdem der Strömung und den Umgebungstemperaturen beim Flug ausgesetzt ist. Als ein geeignetes Bauteil wurde ein Vortex Generator ausgewählt.

Ziel in diesem Projekt ist es, einen mit SMA aktuierten Vortex Generator zu entwickeln, der nur für bestimmte Flugmanöver verwendet werden kann, so dass bei Nichtverwendung die Flugzeugoberfläche wieder hergestellt werden. Dies kann zu einer Verringerung des Luftwiderstands führen, was wiederum in einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs mit einhergehender Kostenersparnis führt.

Die Firma Boeing verfügt im Bereich der SMA-Technologie über große Erfahrung und konnte bereits für das Vorgängerprojekt als Partner gewonnen werden. Beide Projektpartner unterhalten bereits im Bereich des Modellbaus gute Geschäftsbeziehung. Im Zuge des Vorgängerprojekts hat Boeing sich bereit erklärt, Deharde zu befähigen, die SMA-Technologie zu betreiben und in einer idealisierten Umgebung nachzuweisen.

Boeing wird als potentieller Kunde das Projekt durchgehend unterstützen. Dieses Interesse ist in einem LOI niedergelegt. Im letzten Abschnitt dieses Projektes soll die Implementierung in einem Versuchsflugzeug vorgenommen werden und der Prototyp soll im Flug getestet werden. Um die Kosten des Vorhabens zu reduzieren, werden die Flugtests auf Boeing eigenen Testflugzeugen durchgeführt und von Boeing finanziert.

Im Verlauf des Projekts hat sich technische Nutzen gezeigt, dass zwei unterschiedliche Varianten der Smart VGs für Boeing von Interesse sind. Hierbei handelt es sich um die (vorrangig) passive „Altitude-activated“-Variante, die hauptsächlich abhängig von der Umgebungstemperatur operiert. Darüber hinaus wurde eine „Triggered“-Version verfolgt. Diese beschreibt ein aktives System, das aktiv gesteuert werden kann. Der Vorteil dieser Variante liegt in der aktiven Funktionsweise, die in bestimmten Flugsituationen Vorteile erzielen kann.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Die „altitude-activated“-Version wurde im Laufe des Projekt erfolgreich umgesetzt und schließlich in einem Flugtest erprobt. Die „triggered“-Version hat aufgrund diverser Herausforderungen im Auslegungsprozess den Meilenstein der Fertigungsfreigabe nicht erreicht.



Abbildung 1: Installierte Smart VGs im Flugtest

Für den kostenintensiven Flugtest hat Boeing ein eigenes Flugzeug (B777-200ER EcoDemonstrator) bereitgestellt. Dies ist eine Plattform, mit der Boeing besonders innovative, nachhaltige und/oder ökologische Technologien erprobt und in der tatsächlichen Einsatzumgebung erprobt/validiert.

1.1 Ziele des Vorhabens

Der Markt für SMA-Anwendungen befindet sich im Wachstum und ist für nahezu alle industriellen und nicht industriellen Bereiche interessant. Gerade im Aerospace Bereich hat die SMA-Technologie das Potential schwere elektromechanische Aktuatoren durch leichte SMA betriebene Aktuatoren zu ersetzen. Da die Gewichtsersparnis am Flugzeug und damit einhergehend die Kraftstoffverbrauchsreduktion eine zentrale Rolle im Flugzeugbau darstellt, kann die Anwendung von SMA-Aktuatoren einen erheblichen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit im Flugzeugbau beitragen.

Die Fa. Boeing hat ihr großes Interesse erklärt, Deharde als SMA-Zulieferer aufzubauen und bei dem Übergang des nötigen Know-hows zu unterstützen. Hiermit erlangt Deharde einen Wettbewerbsvorteil auf dem Aerospacemarkt. Weiterhin soll ein Tier 1 Zuliefererverhältnis aufgebaut werden.

Für Deharde wird durch die Anwendung von SMA für innovative Strukturen ein neuartiges Lösungskonzept realisiert, wodurch das Angebotsspektrum auch für andere Anwendungen innerhalb der Luftfahrt und ggf. auch darüber hinaus eröffnet wird.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Im Projekt soll in Zusammenarbeit mit der Fa. Boeing ein Aktuator auf SMA - Basis (Smart Memory Alloy = Formgedächtnismetall) entwickelt werden, der es erlaubt, nicht kritische Bauteile an einem Flugzeug zu bewegen. Die Vorteile von SMA Aktuatorik, wie Robustheit und hohe Leistungsdichte, sollen hierbei die Möglichkeit bieten, derzeit nicht bewegte Bauteile zu aktuierten.

Die Entwicklung dieses Aktuators soll in mehreren Stufen passieren, was später beschrieben wird. Am Ende des Projektes soll nach Erfüllung aller Sicherheitskriterien ein Test an einem Testflugzeug der Fa. Boeing durchgeführt werden. Dazu soll ein Vortex Generator an einem Seitenleitwerk mit einem SMA-Aktuator bewegt werden. Dieser Test kann genutzt werden, um SMA-Bauteile für den Einsatz an kommerziellen und militärischen Flugzeugen zu validieren.

Neben dem Ziel, einen neuen Technologieansatz für die Luftfahrtindustrie zu entwickeln und damit die Aerodynamik und Treibstoffersparnis deutlich zu verbessern, beabsichtigt Deharde, das Leistungsspektrum im Aerospace zu erweitern und seinen Kunden als Langzeitziel eine Verstellmöglichkeit für nicht kritische Bauteile am Flugzeug zu bieten. Das bedeutet für Deharde ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen Aerospacezulieferern.

Neben den Tätigkeiten im Modellbau ist Deharde ebenfalls Zulieferer für Aerospace Flugzeugteile und Assemblies. In diesem Rahmen ist Deharde QSF-C qualifiziert und ist Tier 1 Zulieferer für Airbus. Diese Qualifikationen, zusammen mit den Erfahrungen aus den kryogenen Test in vorangegangenen Projekten mit Boeing und dem ETW sollen genutzt werden, Deharde ebenfalls als Tier 1 Zulieferer bei der Fa. Boeing, zunächst im SMA-Bereich, zu positionieren. Besonders die Erfahrungen aus dem Verbundprojekt ISL-SMA dienen als Grundlage für das angestrebte Vorhaben AIL-SMA. Im ISL-SMA wurde bereits an einem SMA betriebenen Verstellmechanismus unter kryogenen Bedingungen erfolgversprechend gearbeitet. Die Ergebnisse aus dem Projekt AIL-SMA und ISL-SMA sowie der vorangegangene Know-How Transfer von Boeing zu Deharde sind beste Grundlage für eine Weiterentwicklung von Aktuatoren auf ein Flugzeug. Ein weiteres Ziel aus dem Verbund ist es, neben Anwendungen im Modellbau und Aerospace, SMAs in anderen Industriezweigen anbieten zu können. Die Einsatzvielfalt von Formgedächtnislegierungen ist groß und bietet viel Potential für die Entwicklung ggf. eigener Produkte.

All diese Ziele streben eine Verbesserung der Marktposition Dehardes an und führen zur Schaffung von Arbeitsplätzen.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Die Anwendung der SMA-Technologie in Flugzeugen der zivilen Luftfahrt stellt ein Novum dar. Das Vorhaben bedeutet für Deharde den Einstieg in eine innovative Technologie und eröffnet auch für die Luftfahrtbranche neue Anwendungsoptionen sowohl im Versuchsbetrieb als auch in Serienanwendungen. Ein Eingang in die Serienfertigung ziviler Luftfahrtanwendungen ist bisher unserer Kenntnis nach noch nicht erfolgt und wäre somit eine Innovation, der mit diesem Vorhaben zugearbeitet wird.

Langfristig soll die Technologie weitere Möglichkeiten im Flugzeugdesign bilden, da die Platzierung von Komponenten vergleichsweise unabhängig geschehen kann, da sie innerhalb der Flugzeugoberfläche verstaut werden können, wenn sie nicht benötigt werden. Dies eröffnet weitere Möglichkeiten in Bezug auf Verringerung von Flugwiderstand und Steigerung der Energieeffizienz.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Insbesondere bei Langstreckenflügen macht der Reiseflug einen sehr großen Anteil des Flugzustandes aus. Bauteile wie Vortex-Generator sind jedoch in einigen Bereichen für Start- bzw. Landeanflug zwingend erforderlich, im Reiseflug gelten diese aber eher als unnötiger Widerstand.

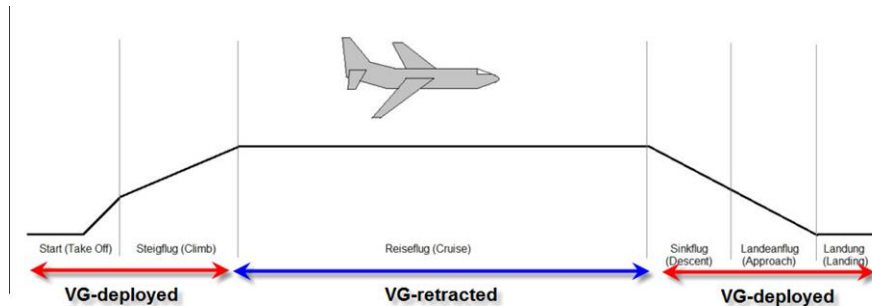


Abbildung 2: Flugphasen

Im Vorgängerprojekt ISL-SMA wurde die SMA-Technologie von Deharde, ETW und Boeing in einer idealisierten Testumgebung im ETW (PETW) getestet. Ziel ist es die Technologie und deren Anwendung weiter auszureifen und deren Ausreifung anhand von Flugtests zu demonstrieren.

Die Weiterentwicklung der Technologie und deren Anwendung soll anhand funktionsintegrierten Designs eines verstellbaren Vortex Generators am Seitenleitwerk demonstriert werden. Mit dem Subsystem eines verstellbaren VGs wurde eine Baugruppe gewählt, die aktiv die Aerodynamik verbessern kann, allerdings trotzdem noch zu einer unkritischen Baugruppe zählt.

Momentan werden Vortex Generatoren nur fest an fliegenden Bauteilen installiert. Das hat zur Folge, dass hier ein Kompromiss zwischen den Vor- und Nachteilen je nach Flugzustand eingegangen werden muss. Dadurch können die Form und auch die Lage der Vortex Generatoren nicht optimal gewählt werden. Mit Hilfe eines einklappbaren VGs werden neue Möglichkeiten im Design und Aerodynamik der VGs und hier auch dem SLW eröffnet. Der VG kann dann je nach Manöver ausgeklappt bzw. in die Flugzeugoberfläche verstaut werden. Damit sollen aktive Maßnahmen zur Verringerung des Widerstandes ergriffen werden bei gleichzeitig nicht signifikanter Gewichtsveränderung. Die VGs können so an jeder Stelle am SLW positioniert werden. Die Überprüfung der zu erreichenden Widerstandsreduktion wird mittels CFD durch Boeing bzw. Windkanaltest im PETW durchgeführt und beziffert.

Neben einer gesteuerten Bewegung soll auch ein Testbauteil mit autonomer Bewegung untersucht werden, die angepasst an die Flughöhe und damit einhergehender Temperaturänderung die Stellung des VGs ändert.

Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist es die Lücke zwischen Technologie- und Produktentwicklung zu schließen. Boeing hat Jahrzehnte lange Erfahrung auf dem Gebiet der SMA-Technologie und ist weiterhin (ISL-SMA) stark an der Weiterentwicklung Dehardes auf dem SMA-Sektor interessiert. Die Kompetenz seitens Boeing als Partner soll genutzt werden, um im Zusammenspiel mit der Kompetenz Dehardes in Bezug auf Anwendung und Fertigung von fliegenden Bauteilen und den Erfahrungen aus ISL-SMA ein integriertes Technologiekonzept in Einsatzumgebung unter realen operationellen Bedingungen zu demonstrieren.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliedert sich in drei Hauptarbeitspakete (HAP), die sich wiederum in mehrere Arbeitspakete (AP) unterteilen. Die Arbeitspakete sind in Abbildung 3 dargestellt und werden im weiteren Verlauf detailliert beschrieben. In allen Arbeitspaketen arbeiteten die Projektpartner in enger Abstimmung, wobei die Verantwortung für die ersten beiden Hauptarbeitspakete bei Deharde liegt, das dritte HAP wurde durch Boeing geführt. In dieser Phase übernimmt Deharde eine vorrangig begleitende Rolle.

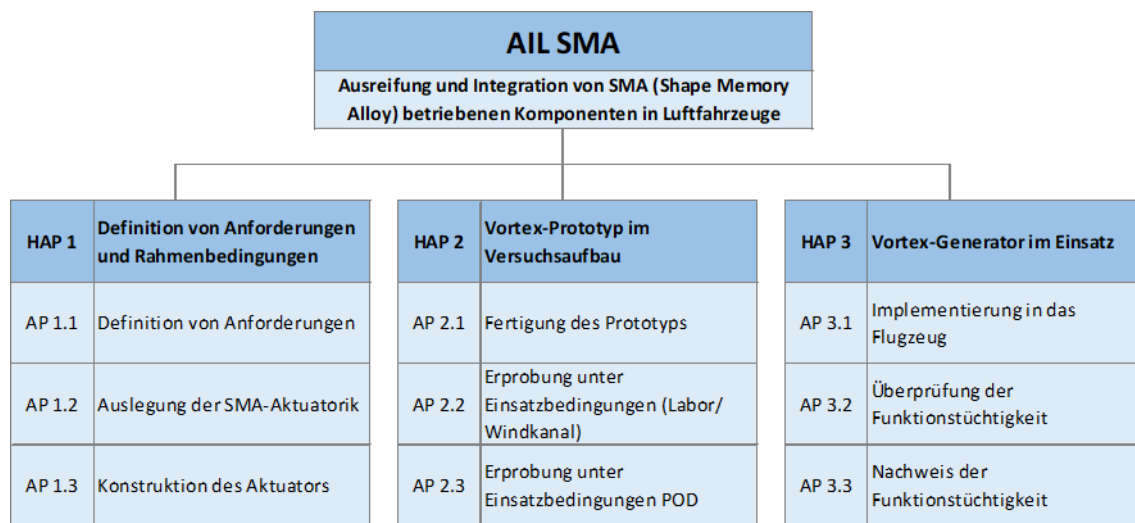


Abbildung 3: Projektstrukturplan

Während des Projekts fanden regelmäßig Abstimmungsmeetings statt. Dies hat sichergestellt, dass die Ressourcen auf allen Seiten effizient und zielgerichtet genutzt wurden. Parallel konnte so auf die gesammelten Erfahrungswerte aller Projektbeteiligter in ihren jeweiligen Fachgebieten zurückgegriffen werden.

Im Projekt AIL-SMA soll im Aufbau auf ISL-SMA ein Prototyp eines fliegenden Bauteils entwickelt werden.

Dazu werden folgende Schritte durchlaufen:

- Entwicklung und Konstruktion eines VG Prototyps unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen und Anforderungen
- Fertigung und Erprobung und Validierung eines VG Prototyps unter realen Ersatzbedingungen
- Implementierung des VG Aktuators in ein Testflugzeug, Überprüfung und Nachweis der Funktionstüchtigkeit

1.4 Erzielte Ergebnisse

1.4.1 HAP 1: Definition von Anforderungen und Rahmenbedingungen

Das HAP 1 unterteilt sich in folgende Teilarbeitspakete sowie die zugehörigen Aufgaben:

- AP 1.1: Definition von Anforderungen

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

- AP 1.2: Auslegung der SMA Aktuatorik
- AP 1.3: Konstruktion der SMA Aktuatorik

Als Input hierfür wurden Erkenntnisse des bereits erfolgten Flugtests seitens Boeing aus 2019 sowie die Expertise der Projektpartner herangezogen. Aufgrund des erfolgten ersten Flugtests haben sich auch die seitens Boeing aufgestellten Anforderungen verändert bzw. wurden erweitert.

Im Flugtest 2019 wurde der Einsatz der Vortex Generatoren maßgeblich für einen Einsatz am Seitenleitwerk (VTP) konzeptioniert. An einem Flugzeug werden Vortex Generatoren jedoch auch an weiteren aerodynamischen Komponenten verwendet. Hierzu zählen beispielsweise das Höhenleitwerk sowie die Triebwerke, vor allem aber der Flügel. Abbildung 4 zeigt eine exemplarische Anordnung von Vortex-Generatoren in der klassischen Form auf dem Flügel eines zivilen Passagierflugzeugs.



Abbildung 4: Vortex-Generatoren in klassischer Anordnung

In der Folge wurde beschlossen, dass im weiteren Verlauf zwei Formen von Smart-VGs parallel verfolgt werden sollen. Die erste Variante entspricht dabei der Herangehensweise aus dem ersten Flugtest und wird als „altitude based activated version“ bezeichnet. Diese Version ist vorrangig für die Integration am Seitenleitwerk vorgesehen. Die zweite Version wird als „triggered, controlled version“ bezeichnet und sieht den Einsatz am Flügel vor. Für die erste Version besteht das Hauptziel in der Weiterentwicklung der Technologie, für die zweite Variante liegt der Fokus auf dem Nachweis der Funktionstüchtigkeit.

Der zentrale Unterschied besteht in der Anforderung, mit der „triggered, controlled activation“-Variante, eine sehr schnelle Ausfahrzeit zu realisieren. Dies hat aus aerodynamischer Sicht für Boeing eine große Bedeutung um auf diese Weise sehr schnell auf verschiedene Flugzustände reagieren zu können. Es ist bereits an dieser Stelle zu erkennen, dass die „altitude-based activation“-Variante als autarkes System konzipiert werden kann. Dies setzt allerdings voraus, dass auf eine optionale Leistungsversorgung (z.B. zum Betrieb an besonders kalten Tagen oder in besonders kalten Regionen) verzichtet wird. Im Gegensatz dazu kann bereits in dieser Phase erkannt werden, dass die zweite Variante aller Voraussicht nach nicht als autarkes System konzipiert werden kann. Erste Anzeichen deuten darauf hin, dass die Umsetzung der sehr kurzen Ausfahrzeit eine aktive

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Beeinflussung des Systems erfordert und somit (zumindest) eine Leistungsversorgung unausweichlich bleibt.

Speziell auf der Grundlage der Annahme, dass die erste Variante als autarkes System agieren kann, macht diese sehr interessant für eine sogenannte Retrofit-Lösung. Dies bezeichnet die Möglichkeit, ein entsprechendes System auf bestehende Flugzeuge nachzurüsten und so eine verbesserte aerodynamische Performance zu erzeugen. Auch könnte dies im Hinblick auf die Integration auf einem neuen Flugzeug einen wichtigen Zwischenschritt darstellen, indem auf diese Weise (ohne größere Eingriffe in die bestehende Flugzeuginfrastruktur) ein solches System seine Funktionsfähigkeit dauerhaft im Praxiseinsatz nachweisen kann. Allerdings birgt diese Variante auch einen kleinen Nachteil, da ein solches System nicht vollständig bündig mit der aerodynamischen Oberfläche abschließt und so (selbst im eingefahrenen Zustand) einen gewissen aerodynamischen Widerstand erzeugt. Dieser Nachteil wäre bei einer Integration in ein vollständig neues Flugzeug nicht von Bedeutung. Im Vergleich mit den herkömmlichen festen (dauerhaft „ausgefahrenen“) VGs stellen jedoch beide Varianten eine aerodynamische Verbesserung dar.

Mit dem Abschluss des AP 1.1 wurden folgende Anforderungen an beide Varianten definiert.

Tabelle 1: Übersicht über die Anforderungen

	Altitude-based activation	Triggered, controlled activation
Aktivierung	Basierend auf Umgebungstemperatur	Gesteuert, kontrolliert
Länge	3,75"	3,75"
Höhe (inkl. Base)	0,94"	0,94"
Status bei Start/Landung	eingefahren	eingefahren
Status im Reiseflug	ausgefahren	ausgefahren
Auslegung für	Standardtag	Standardtag
Flughöhe (ausgefahren)	< 10.000 ft	-
Flughöhe (eingefahren)	> 28.000 ft	-
Power-Supply	Nur bei extremen Umgebungsbedingungen	Zwingend notwendig
Nominal load	3,3 in*lbs	3,3 in*lbs
Max. load	7 in*lbs	7 in*lbs
Vibrationsbeständigkeit	tbd	Tbd
Dauer Ausfahrvorgang	-	< 0,25 Sek.
Dauer Einfahrvorgang	-	< 10 Sek. (alternativ: unendlich, manuell)
Instrumentierung (nur für Flugtest)	Winkelsensor (VG-Stellung) DMS (VG load) Thermocouple (VG/SMA temperature) VG state (ein-, ausgefahren)	Winkelsensor (VG-Stellung) DMS (VG load) Thermocouple (VG/SMA temperature) VG state (ein-, ausgefahren)

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Aufgrund der inhaltlichen Abhängigkeit von AP 1.2 und AP 1.3 lassen sich diese inhaltlich nur schwer voneinander trennen. Die Auslegung und Beistellung der SMA-Aktuatorik liegt im Fachbereich von Boeing während das Design des SMART-VG sowie die Integration des SMA-Aktuators in der Verantwortung von Deharde liegt. Dabei wurde sich vorrangig auf die priorisierte, passive „altitude activated“-Variante fokussiert.

Geometrische Details

Unter anderem waren z.B. der Vorderkantenwinkel sowie die Gestaltung des VG-Panels im Nasenbereich von Interesse. Hier wurden zwei Varianten erarbeitet, die in unterschiedlichen Strömungsverhalten im Nasenbereich resultieren. Die Fragestellung behandelt vor allem die Lage des VG-Panels im eingefahrenen Zustand gegenüber der feststehenden Basis. Abbildung 5 zeigt die finale Version.

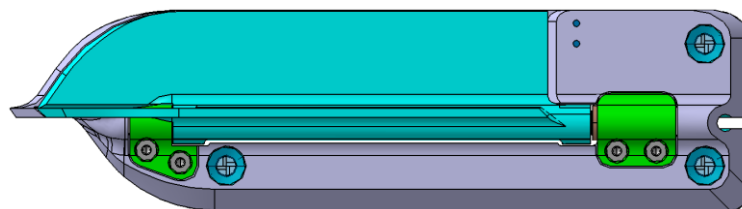


Abbildung 5: finale Nasengeometrie

Bekannterweise hat Boeing bereits eine erste Version dieses Smart-VG in einem Flugtest erprobt. Folglich wurde versucht, den Fußabdruck des Panels zu reduzieren. Dies konnte durch eine geschickte Anordnung der Befestigungsschrauben erreicht werden. Der Vergleich ist in Abbildung 6 zu erkennen, wobei die gelblich transparente Version die Vorgängerversion darstellt. Es ist zu erkennen, dass die (aus aerodynamischer Sicht deutlich wichtigere Breite) deutlich verringert werden konnte. Durch eine Anpassung des SMA (vergrößerte Länge) hat sich die Gesamtlänge des Zusammenbaus ebenfalls verlängert.

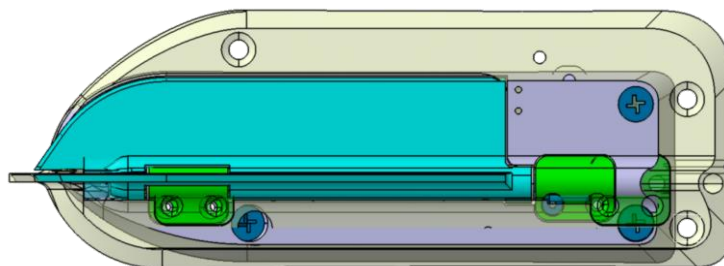


Abbildung 6: Vergleich altes und aktuelles Design

Lagerung und Isolierung des SMA

Zentrales Thema des Entwurfs ist die Integration des SMA in die Mechanik. An sehr kalten Tagen besteht die Gefahr, dass der SMA in Bodennähe nicht vollständig ausfährt, da die Umgebungstemperatur schlichtweg nicht ausreichend ist. Aus diesem Grund hat Boeing die Anforderung aufgestellt, dass der SMA die Möglichkeit aufweisen soll, im Inneren einen Heizstab aufzunehmen. Um Wärmeverlusten vorzubeugen, soll ebenfalls eine Isolierung vorgesehen werden.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Parallel dazu betreffen diese Aspekte auch die Lagerung des SMA, sodass diese drei Aspekte parallel betrachtet werden müssen. Das aktuelle Konzept sieht vor, dass der SMA an zwei Stellen nahe dem Ende gelagert wird. Zwangsweise muss in diesem Bereich auf die Lagerung verzichtet werden. Der restliche Bereich kann mit einer Isolierung (z.B. Teflon-Überzug) versehen werden. Sofern möglich, soll auch ein Temperatursensor für den SMA integriert werden. Die bisherige Unsicherheit wurde beseitigt und der Temperatursensor vorgesehen. Abbildung 7 zeigt den Überblick über den SMA inklusive Lagerflächen, Isolierung und Temperatursensor. Es ist ersichtlich, dass der Temperatursensor einen Großteil der andernfalls isolierten Fläche belegt, sodass die Isolierung gravierend beeinträchtigt wäre.

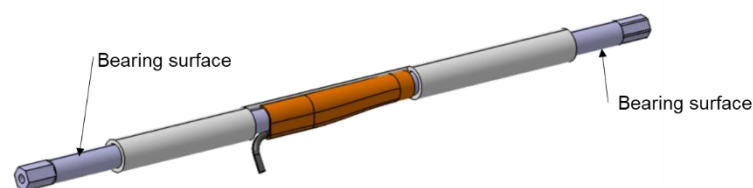


Abbildung 7: SMA-Oberblick mit Lagerflächen und Isolierung

Abbildung 8 zeigt die Integration des SMA in das SMART VG. Es ist deutlich zu erkennen, wie anspruchsvoll die Integration hinsichtlich der Platzverhältnisse ist. In grün sind die befestigten Enden des SMA (links im beweglichen Panel, rechts in der feststehenden Basis) zu erkennen. In rot ist der interne Heizstab dargestellt. Diesbezüglich ist die Abführung des Kabels noch unsicher, wobei eine Abführung nach hinten (und nicht nach unten) bevorzugt wird, da andernfalls die Montageprozesse stark beeinträchtigt sind.

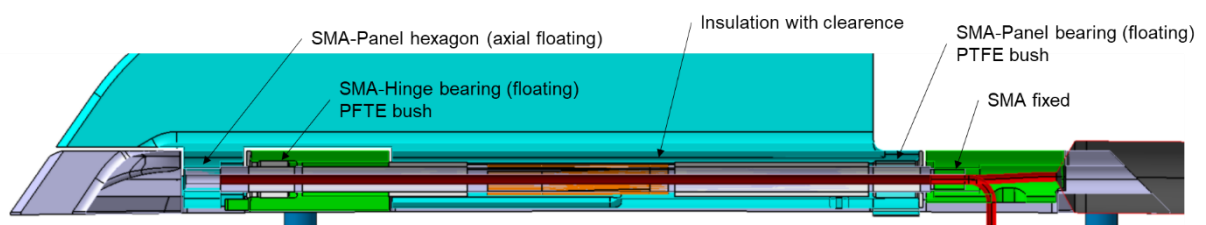


Abbildung 8: Überblick über die Integration des SMA

Weiterhin ist zu erwähnen, dass das Panel im ausgefahrenen Zustand einen Endanschlag besitzt, der den maximalen Ausschlagwinkel auf 90° begrenzt. Dies ist insofern wichtig, da die maximale aerodynamische Wirkung bei einem Ausfahrwinkel von 90° erzielt wird und es sich um ein (weitgehend) passives System handelt.

Weiterhin wurden auf der Unterseite des VGs Taschen vorgesehen, in welchen bei Bedarf Magnete installiert werden können. Diese Magnete sollen die Einfahrbewegung des SMA unterstützen, da der SMA in seiner Abkühlrichtung zunehmend weniger Drehmoment erzeugen kann. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das VG zu jedem Zeitpunkt auch wieder vollständig einfährt. Die finale Anzahl und Positionierung der Magnete soll im Windkanalversuch experimentell festgelegt werden. Im aktuellen Design sind dementsprechend sehr viele Taschen vorgesehen.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

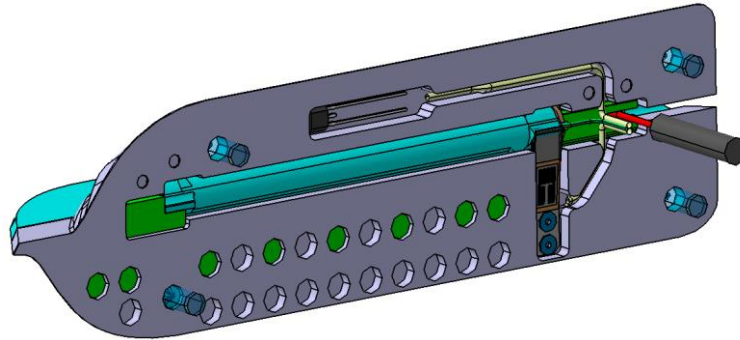


Abbildung 9: Taschen auf der Unterseite zur Aufnahme der Magnete

Außerdem wurden im Design im vergangenen Berichtszeitraum verschiedene Fehlerfälle abgedeckt. Der sicherlich größte betrachtete Fehlerfall ist die Vereisung des VG Panels im eingefahrenen Zustand. Aus konstruktiver Sicht wurden Maßnahmen ergriffen, die offen Hohlräume ohne Abflussmöglichkeit vermeiden. So wurde beispielsweise die Tasche, in die das VG-Panel im eingefahrenen Zustand eintaucht, so gestaltet, dass Wasser jederzeit abfließen kann, bevor es vereist und so die Stellfläche blockiert. Beispielsweise wurde die Tasche zur Seite geöffnet und nach hinten mit einer Fase versehen, sodass eindringendes Wasser stets abfließen kann. Abbildung 10 zeigt beispielhaft den Unterschied.

Weiterhin hat die Berücksichtigung der Vereisung einen weiteren Belastungsfall erzeugt. Falls die Stellfläche wider Erwarten dennoch vereist, muss der SMA in der Lage sein, diese Vereisung zu brechen und die Stellfläche auszufahren.

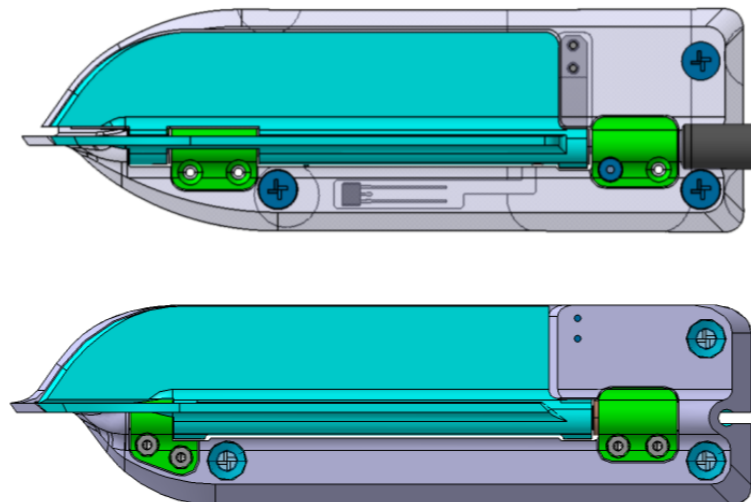


Abbildung 10: Designvergleich (oben ohne, unten mit Anti-Vereisungsmaßnahmen)

Sensorik

Insgesamt sind verschiedene Sensoren im Design vorgesehen. Die Temperaturmessung des SMA wurde bereits im vergangenen Abschnitt behandelt.

Darüber hinaus sind folgende Sensoren vorgesehen:

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

- Temperatursensor für die Umgebungstemperatur
- Winkelsensor für Panel-Ausschlagwinkel

Der Temperatursensor für die Umgebungstemperatur (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12) wird in die feststehende Basis integriert und von der Unterseite montiert. Damit ist der Sensor zwar nicht direkt der Luftströmung ausgesetzt. Die Änderung der Temperatur erfolgt aber nur langsam, sodass angenommen wird, dass die Temperatur am Sensor der Umgebungstemperatur entsprechend folgen kann.

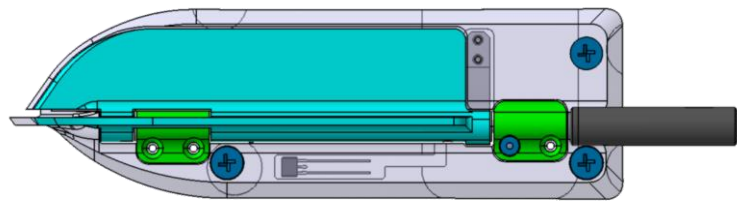


Abbildung 11: Integration des Umgebungs-Temperaturssensors, Ansicht von oben

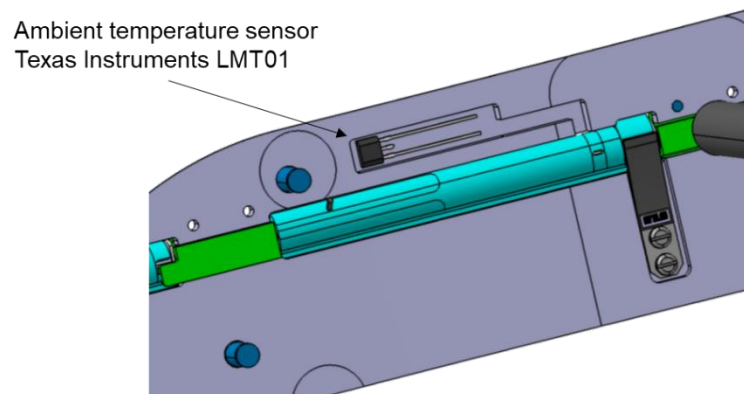


Abbildung 12: Integration des Umgebungs-Temperaturssensors, Ansicht von unten

Weiterhin wird ein Sensor für die Messung des Ausschlagwinkels des Panels vorgesehen. Hier kann aufgrund des begrenzten Bauraumes nicht auf ein Kaufteil zurückgegriffen werden. Daher wird auf eine Lösung zurückgegriffen, die Boeing bereits beim vorherigen Flugtest verwendet hat und dort zufriedenstellende Ergebnisse geliefert hat. Dazu wird ein dünnes Blech auf der Unterseite der Basis befestigt. Je nach Ausschlagwinkel biegen die beweglichen Teile dieses Blech durch. Ein Dehnungsmessstreifen erfasst die auftretenden Spannungen aus denen sich (nach Kalibration) der Winkel berechnen lässt. Abbildung 13 zeigt das Design mit dem Blech in den beiden Extremstellungen (eingefahren, ausgefahren).

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

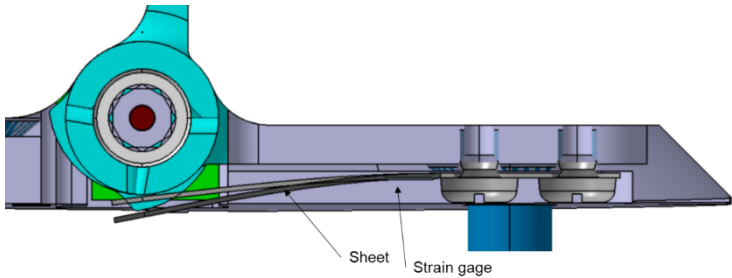


Abbildung 13: Winkelmessung

Ein weiterer aktueller Aspekt im Designprozess ist die Installation des SMA mit Vorspannung. Da es sich um ein passives System handelt, ist keine exakte Positionierung des Panels im ausgeschlagenen Zustand möglich. Da allerdings ein Ausschlag von 90° das Ziel ist, wird ein Endanschlag vorgesehen. Da im ausgefahrenen Zustand noch aerodynamische Kräfte wirken, muss das System diesen widerstehen können, ohne den Ausschlagwinkel zu ändern. Aus diesem Grund muss der SMA mit einer definierten Kraft gegen den Endanschlag drücken. Diese Vorspannung wird allerdings durch den SMA selber aufgebracht und muss daher konstruktiv nicht berücksichtigt werden.

Da der VG-Zusammenbau im Flugtest auf einem sog. Piano-Panel montiert wird, ist es erforderlich, sämtliche Versorgungs- und Sensorkabel an das Piano-Panel zu übergeben. Dazu wurden auf der Unterseite Kanäle eingebracht, die die Kabel zu einem gemeinsamen Punkt führen, an dem die Übergabe an das Piano-Panel erfolgt.

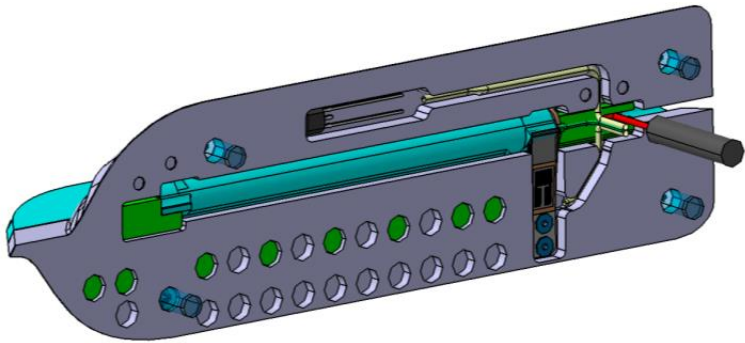


Abbildung 14: Abführungskanäle auf der Unterseite

Im Anschluss an die Auslegung wurde das Design hinsichtlich der Festigkeit untersucht. Dazu wurden drei Lastfälle erarbeitet, die die möglichen auftretenden Kräfte in verschiedenen Betriebszuständen darstellen.

Tabelle 2: Übersicht über die Lastfälle

	Description	VG-Position	Load
Lastfall 1	Nominal load on ground	deployed	Nominal load (1,51 in-lbs), reaction against end stop

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

Lastfall 2	Ultimate aero load in mid-air	deployed	Ultimate load (2,81 in-lbs), same torque in opposite directions on SMA and panel
Lastfall 3	Jam load	retracted	SMA jam load (8,5 in-lbs) against base plate

Zusätzlich wurden die zulässigen Materialwerte für jedes Material definiert. Mit den Lasten aus Tabelle 2 wurden dann alle Bauteile berechnet und die maximal auftretenden Spannungen für jedes Bauteil bestimmt. Diese wurde mit den zulässigen Lasten verglichen. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass alle Bauteile der äußeren Belastungen mit einem Sicherheitsfaktor von min. 2 widerstehen. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen beispielhaft die Ergebnisse der Rechnung von 2 Bauteilen.

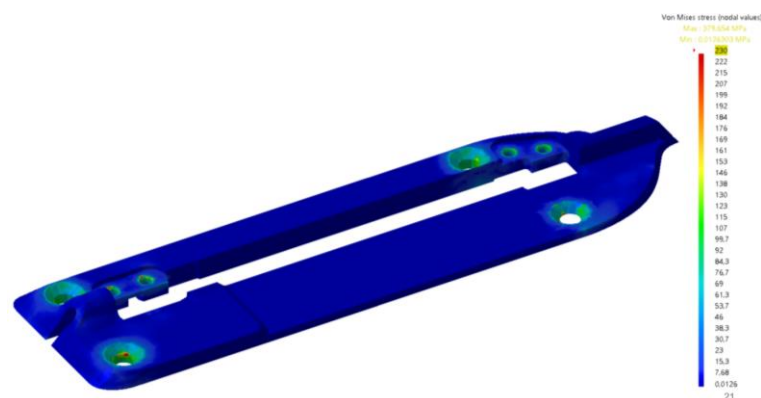


Abbildung 15: Ergebnis der FEM-Berechnung vom Base, Lastfall 3

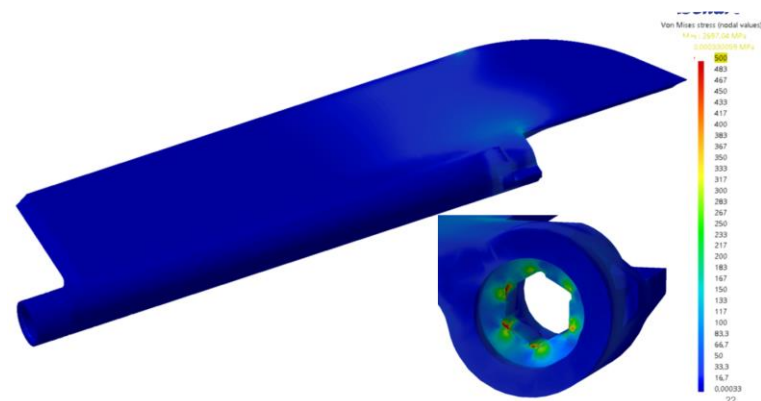


Abbildung 16: Ergebnis der FEM-Berechnung vom Panel, Lastfall 3

Im Anschluss wurde ein formelles Design Review Meeting mit Boeing durchgeführt, woraufhin die Fertigungsfreigabe erteilt wurde. Dies bedeutete den Beginn von AP 2.1. Gleichzeitig sind die Arbeitspakete 1.2 und 1.3 noch nicht abgeschlossen, da die Ergebnisse des Windkanaltests in weitere Designanpassungen und –verbesserungen einfließen sollen.

Mit dem Design der „Triggered Version“ wurde nach Abschluss des Design der „Altitude activated version“ begonnen. Allerdings wurde das Design nicht abgeschlossen, da der Zeitplan (inkl. Flugtestplan seitens Boeing) eine Fertigung und Erprobung dieser Variante nicht mehr zugelassen hätte.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

1.4.2 HAP 2: Vortex-Prototyp im Versuchsaufbau

Das HAP 2 unterteilt sich in folgende Teilarbeitspakete sowie die zugehörigen Aufgaben:

- AP 2.1: Fertigung des Prototyps
- AP 2.2: Erprobung unter Einsatzbedingungen (Labor/Windkanal)
- AP 2.3: Erprobung unter Einsatzbedingungen POD

Im Anschluss an den Abschluss von HAP 1 wurde mit der Fertigung der Bauteile sowie der Montage begonnen. Insgesamt wurden mehrere Exemplare gefertigt. Dadurch wurde sichergestellt, dass bereits frühzeitig Exemplare für Montagetests vorhanden sind, Ebenso wurde auf diese Weise für Ersatz bei möglichem Versagen im Flugtest vorgebeugt.

Für die Herstellung des Prototyps wurden alle Einzelteile bei Deharde hergestellt, montiert und weitestmöglich erprobt.

Mit den ersten beiden vollständigen Exemplaren wurde seitens Boeing ein Windkanaltest im eigenen Windkanal durchgeführt.

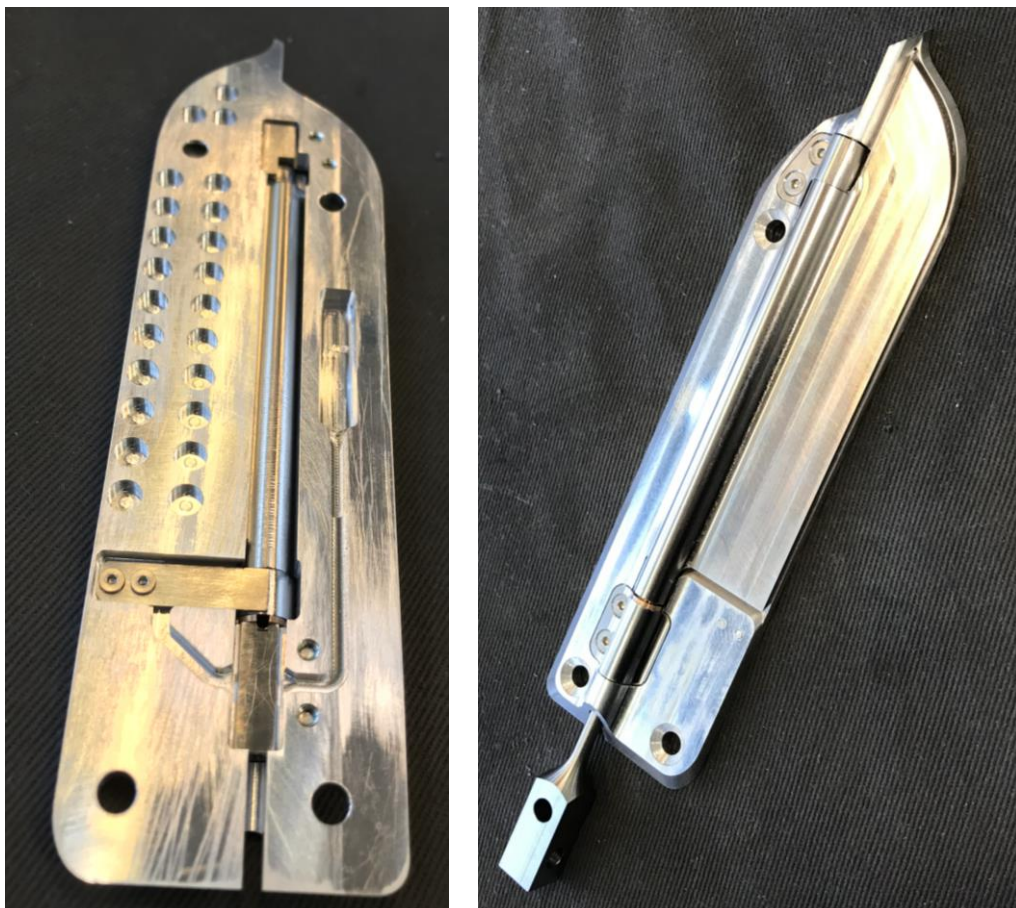


Abbildung 17: Montierter Altitude Activated VG

Dieser Test wurde von Boeing in einer eigenen Einrichtung durchgeführt. Als Fazit wurde festgestellt, dass das Design grundsätzlich sehr gut funktioniert hat und keine Anpassungen zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit erforderlich sind. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen dabei die

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

instrumentierte Version bei Boeing während der Vortests zum Windkanalversuch. Abbildung 20 zeigt den VG im Windkanaltest. Der VG wurde dabei aus der Düse („Airflow Outlet“) mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten angeströmt und verschiedene Aspekte wurden geprüft bzw. variiert. So wurden Tests mit und ohne installiertem SMA durchgeführt, um zu prüfen, ob der VG auch nur durch den Luftstrom bedingt aufklappt. Weiterhin wurden verschiedene Anströmsituationen, Winkelstellungen und Lasten geprüft.

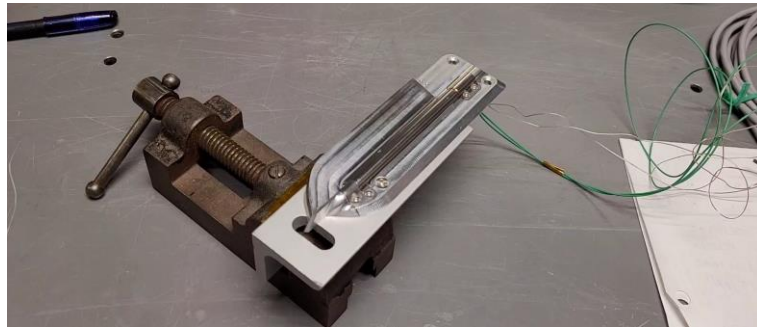


Abbildung 18: instrumentierter Altitude activated VG, Oberseite

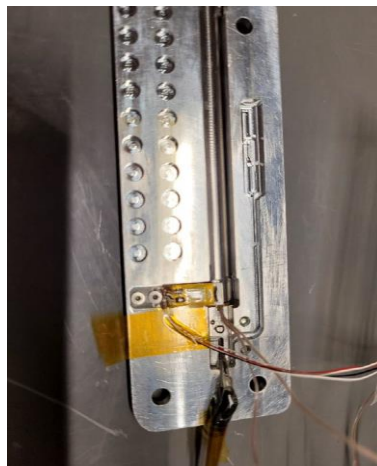


Abbildung 19: instrumentierter Altitude activated VG, Unterseite

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

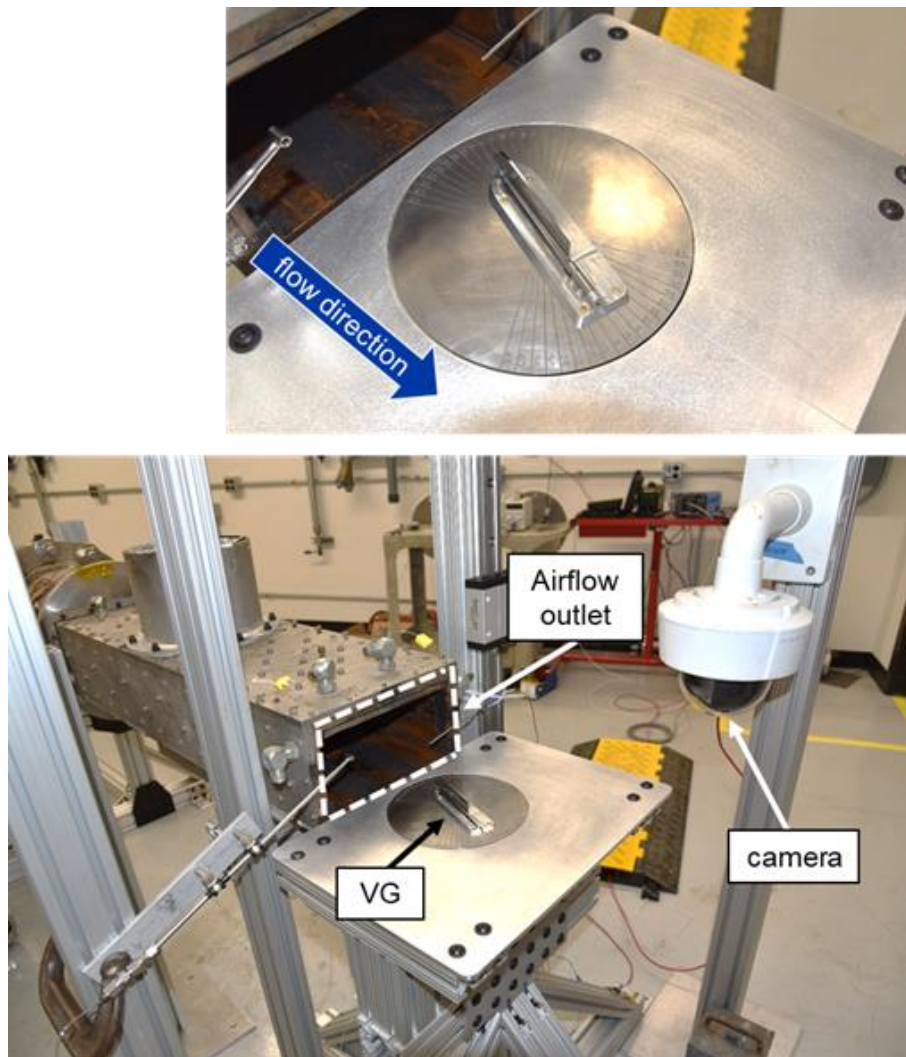


Abbildung 20: montierter altitude activated VG für den Windkanaltest

1.4.3 HAP 3: Vortex-Generator im Einsatz

Das HAP 3 unterteilt sich in folgende Teilarbeitspakete sowie die zugehörigen Aufgaben:

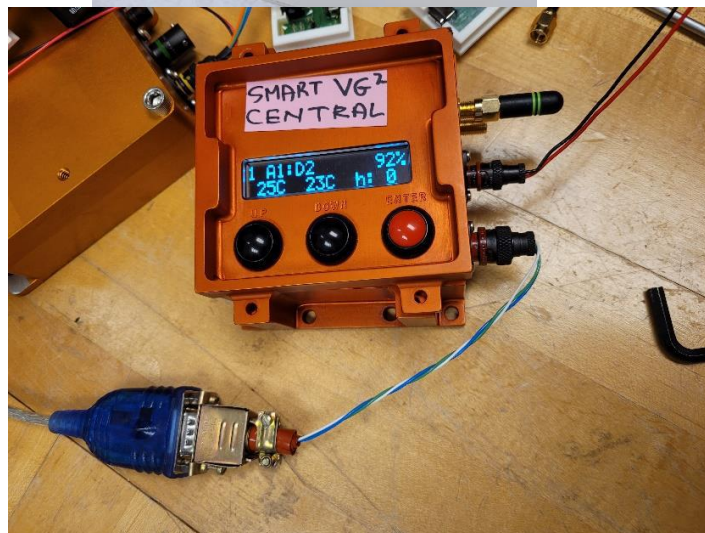
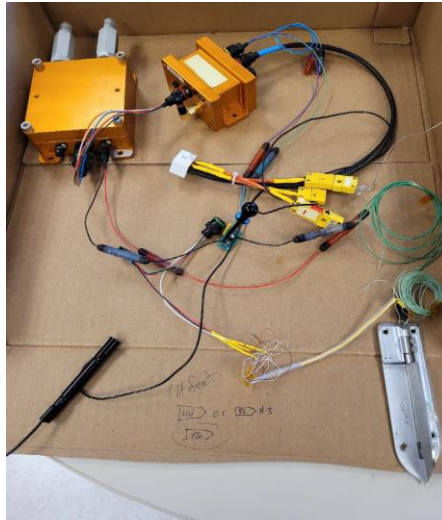
- AP 3.1: Implementierung in das Flugzeug
- AP 3.2: Überprüfung der Funktionstüchtigkeit
- AP 3.3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit

Das gesamte HAP 3 behandelt die Integration der Hardware in das Flugzeug sowie des Flugtest und liegt daher in der Verantwortung von Boeing. Deharde ist hier als beratende Instanz aufgetreten und hat den Prozess über die gesamte Dauer begleitet.

Im Folgenden sind einige Bilder aus dem Versuchsaufbau sowie den Flugtests dargestellt.

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge



Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge



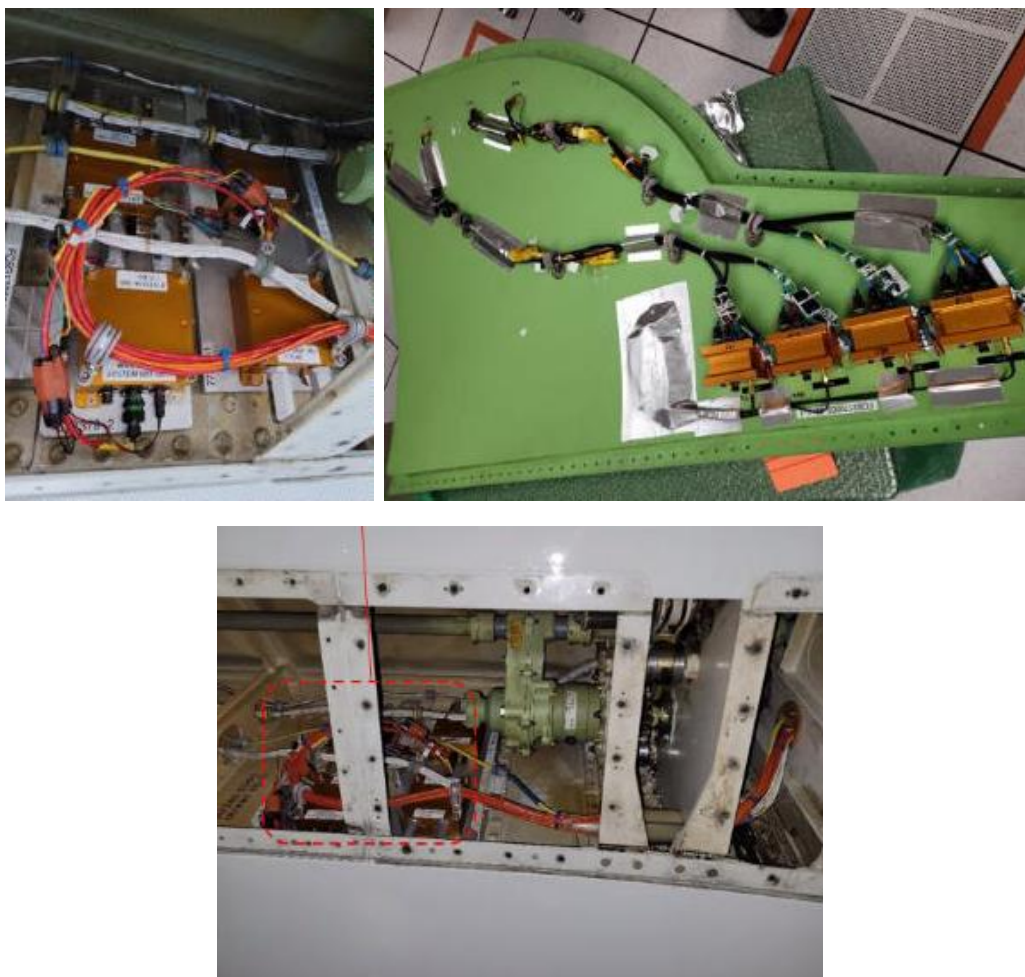
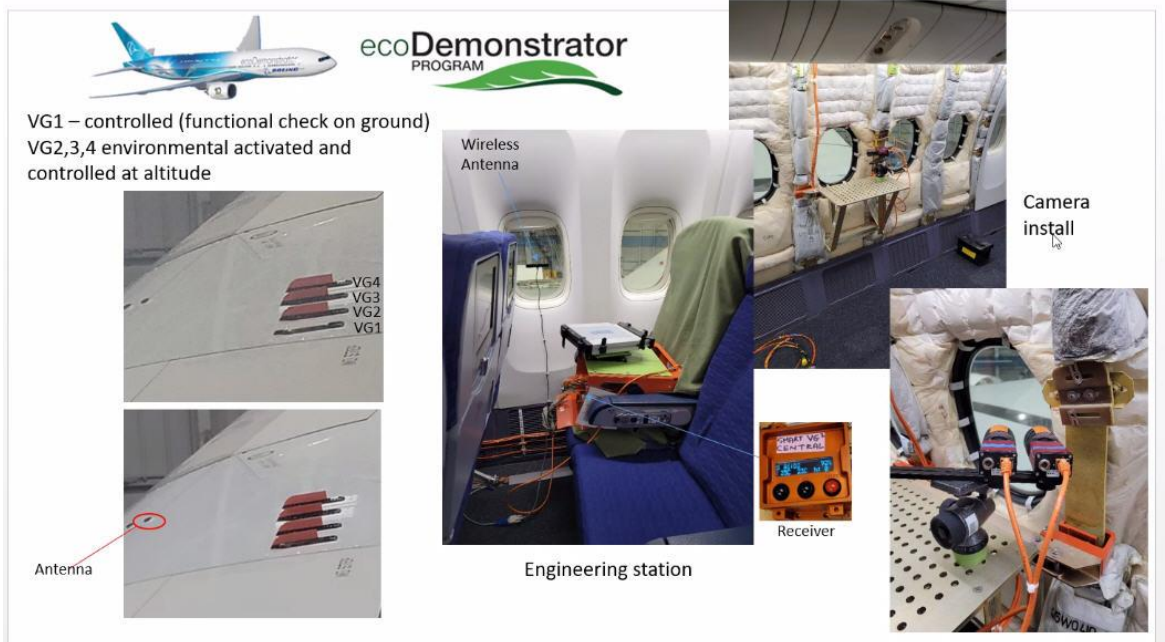
Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge



Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge



Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Projekts wurde mit dem assoziierten Partner Boeing zusammengearbeitet. Boeing ist als weltweit anerkannter Know-How-Träger für die SMA-Technologie ein prädestinierter Partner für dieses Projekt. Neben der Anwendung der SMA-Technologie in Windkanalmodellen gilt Boeings Interesse vor allem dem Nachweis der Technologie unter realen Einsatzbedingungen.

Boeing pflegt außerhalb dieses Forschungsprojekts eine Partnerschaft mit der NASA im Bereich der Entwicklung und Herstellung der SMA-Aktuatoren.

1.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Verwendung der SMA-Technologie als Aktuator zum Betrieb von Vortex-Generatoren unter Flugbedingungen stellt nicht nur eine große Innovation dar, sondern ist ebenfalls eine Neuheit in der Branche. Bisher sind die Vortex-Generatoren fest verbaute Einheiten, die auch während des Reiseflugs Widerstand erzeugen und in dieser Flugphase eher eine nachteilige Wirkung haben. Mit der neuen Anwendung wurde eine Möglichkeit eröffnet, diesen Widerstand in bestimmten Flugphasen zu minimieren und auf diese Weise den Treibstoffverbrauch zu reduzieren.

Die SMA-Technologie ist eine sehr vielfältige Technologie im Hinblick auf die Aktivierung mechanischer Systeme. Auf diese Weise lassen sich verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten identifizieren, wobei jede unterschiedlichste Anforderung und Herausforderungen birgt. Mit dem aktuellen Projekt wurde ein wegweisendes Projekt zur Umsetzbarkeit der SMA-Technologie im Hinblick auf die Treibstoffreduzierung an Flugzeugen erfolgreich durchgeführt.

1.7 Voraussichtlicher Nutzen

Der erfolgreiche Nachweis der Technologie im Hinblick auf die Anwendung in einem Flugtest eröffnet weitere Anwendungsfelder. Der positive Umsetzung des Projekts hat in der Fachbranche zu großer Anerkennung geführt.

Auf Seiten von Boeing erzeugt der erfolgreiche Abschluss des Projekts ein stetig wachsendes Vertrauen in die SMA-Technologie. Die erfolgreiche Umsetzung in einem Flugtest bestätigt damit die Einsatzmöglichkeiten unter extremen Umgebungsbedingungen, wie sie beispielsweise im Reiseflug herrschen.

Für Deharde ergibt sich aus dem Projekt eine gestärkte Partnerschaft mit Boeing im Hinblick auf die Zusammenarbeit bei der Umsetzung und Integration in verschiedene Anwendungen. Bereits im Vorprojekt „ISL-SMA“ wurde die erfolgreiche Integration der SMA-Technologie in ein kryogenes Windkanalmodell nachgewiesen. Darauf aufbauend hat dieses Projekt die Einsatzmöglichkeiten um den Einsatz im realen Flugzeug erweitert. Damit ergibt sich für Deharde ein Alleinstellungsmerkmal als bewährter Partner im Bereich Engineering und Fertigung.

Bereits während der Erstellung des Abschlussberichts haben sich zwei Anschlussprojekte ergeben, die ebenfalls den Einsatz der SMA-Technologie weiterführen. Diese Projekte behandeln die Anpassung eines bestehenden Windkanalmodells für einen weiteren Test unter kryogenen Bedingungen sowie die Herstellung weiterer Vortex-Generatoren für den Einsatz in weiteren Flugtests. Diese Vortex-Generatoren sind eine Weiterentwicklung der Version, die in diesem Projekt

Vorhabensbezeichnung: AIL-SMA

Ausreifung & Integration von SMA (Shape Memory Alloy) betriebenen Komponenten in Luftfahrzeuge

entstanden ist und dient der Reduzierung von Lärmemissionen an einem Flap. Auch diese Versionen werden in weiteren Flugtesten im Rahmen des EcoDemonstrator-Programms von Boeing erprobt.

Neben der Anwendung der SMA-Technologie im Bereich der Windkanalmodelle ist Deharde sehr aktiv im Bereich der Entwicklung, Fertigung und Montage von Aerospace-Produkten. Boeing zeigt großes Interesse, Deharde zu befähigen, die SMA-Technologie auch im Bereich der kommerziellen Luftfahrt einsetzen zu können und Deharde dabei zu unterstützen.

1.8 Fortschritte bei anderen Stellen

Boeing arbeitet parallel zur Kooperation mit den Projektpartnern auch mit der NASA am Einsatz der SMA-Technologie in Flugzeugen des zivilen und militärischen Bereichs. Allerdings unterliegen die Ergebnisse der Vertraulichkeit und sind somit den Projektpartnern nicht bekannt.

1.9 Veröffentlichungen

[1] NASA, "NASA Looks for a New Twist on Sustainable Aviation", Artikel, November 2022, <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasa-looks-for-a-new-twist-on-sustainable-aviation/>.

[2] Boeing, "ecoDemonstrator Overview – featured videos", Artikel, <https://www.boeing.com/principles/environment/ecodemonstrator/#/videos/2022-boeing-nasa-smart-vg-test>.

[3] CNN Travel, "Boeing unveils new 777 'ecoDemonstrator' test jet", Artikel, <https://edition.cnn.com/travel/article/boeing-777-ecodemonstrator/index.html>.

[4] The Eurasian Times, "ecoDemonstrator: Boeing Collaborates With NASA To Develop 'SMART Vortex Generators' For Next-Gen Aircraft", Artikel, Juni 2021, <https://www.eurasiantimes.com/boeings-new-777-ecodemonstrator-could-be-the-future-of-aviation/>.

[5] FlugRevue, "777 als neuer ecoDemonstrator von Boeing", Artikel, Juni 2022, <https://www.flugrevue.de/zivil/30-technologien-im-test-777-als-neuer-boeing-ecodemonstrator/>

[6] Boeing, "Shape shifting: The future of sustainable flight gets SMART", Artikel, Dezember 2022, <https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/shape-shifting.page>

[6] Boeing, "Shape shifting: The future of sustainable flight gets SMART", Artikel, Dezember 2022, <https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/shape-shifting.page>

[7] NASA Glenn Research Center, LinkedIn, 2022, https://www.linkedin.com/posts/nasaglenn_nasa-looks-for-a-new-twist-on-sustainable-activity-7003789068811603968-bUEd/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

[8] Boeing, LinkedIn, 2022,

https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7005635880526786560?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

Varel, 05.01.2024

Christopher Clark