



Luftfahrtforschungsprogramm VI, 2. Aufruf

**Anbindung gedruckter Elektronik an das Bordnetz
- AngElo -**

Abschlussberichtbericht des Partnervorhabens:

***Validierung neuartiger Verbindungstechnologien für
gedruckte Elektronik an das Luftfahrtbordnetz***

Geschäftszeichen: 100506957

FKZ: 20Q2102A

Jürgehake Deutschland GmbH

Projektlaufzeit: 01.07.2022 – 31.12.2025

Erstellungsdatum: 27.04.2026

Berichtersteller: Dr.-Ing. Christoph Jürgehake

Inhaltsverzeichnis

1	KURZDARSTELLUNG	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen und Rahmenbedingungen.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2	EINGEHENDE DARSTELLUNG	6
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	6
2.1.1	AP 0 – Projektmanagement.....	6
2.1.2	HAP 1 – Grundlagen und Anforderungen	9
2.1.3	HAP 2 – Konzeption und Entwicklung.....	13
2.1.4	HAP 3 – Herstellung und Charakterisierung	17
2.1.5	HAP 4 – Funktionstest und Ergebnisverwertung	22
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	26
2.3	Notwendigkeit & Angemessenheit der Arbeiten	28
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse (fortgeschriebener Verwertungsplan).....	30
2.5	Während der Laufzeit bekannt gewordene externe Fortschritte / Ergebnisse Dritter	32
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	33

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens **AngElo – Anbindung gedruckter Elektronik an das Bordnetz** war die **Untersuchung und Bewertung neuartiger Verbindungstechnologien**, mit denen **gedruckte Elektronik zuverlässig an bestehende Bordnetzstrukturen der Luftfahrt angebunden** werden kann. Die Aufgabenstellung knüpfte an den Stand der Technik gedruckter Elektronik an, bei dem funktionale Strukturen zwar zunehmend verfügbar sind, jedoch eine **robuste, reproduzierbare und luftfahrttaugliche Anbindung** an klassische elektrische Systeme bislang nicht etabliert ist.

Im Fokus des Vorhabens stand **nicht die Entwicklung serienreifer Produkte**, sondern die **systematische Analyse, prototypische Umsetzung und vergleichende Bewertung** unterschiedlicher Anbindungskonzepte. Ziel war es, technologische Potenziale, Grenzen und Weiterentwicklungsbedarfe transparent darzustellen und damit eine **belastbare Entscheidungsgrundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten** zu schaffen.

1.2 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen

Das Vorhaben wurde im Rahmen des **Luftfahrtforschungsprogramms** unter den für die zivile Luftfahrt typischen Randbedingungen durchgeführt. Diese sind geprägt durch hohe Anforderungen an **Zuverlässigkeit, Langzeitstabilität, Prozesssicherheit und Nachweisführung**.

Die Durchführung des Projekts erfolgte unter sich verändernden organisatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Insbesondere kam es im Projektverlauf zu **zeitlichen Verzögerungen**, unter anderem infolge pandemiebedingter Lieferengpässe sowie der **Insolvenz eines vorgesehenen Umsetzungspartners**, wodurch geplante Aufgaben innerhalb des Konsortiums neu organisiert werden mussten. Diese Rahmenbedingungen führten zu Anpassungen im Zeitplan, ohne jedoch die inhaltliche Zielsetzung des Vorhabens zu verändern.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben war entlang eines **klar strukturierten Arbeits- und Meilensteinplans** aufgebaut und gliederte sich in vier Hauptarbeitspakete (HAP 1–HAP 4). Diese reichten von der Analyse bestehender Bordnetz- und Kontaktierungs-

lösungen über die konzeptionelle Entwicklung und Charakterisierung neuartiger Anbindungstechnologien bis hin zu Funktionstests und einer abschließenden Bewertung.

Der Projektablauf folgte einer **schrittweisen, iterativen Vorgehensweise**, bei der Erkenntnisse aus früheren Arbeitspaketen kontinuierlich in die nachfolgenden Arbeiten einfließen. Trotz der beschriebenen Verzögerungen konnten alle relevanten Arbeitspakete inhaltlich bearbeitet und die vorgesehenen Meilensteine erreicht werden.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Gedruckte Elektronik bietet gegenüber konventionellen kabelgebundenen Lösungen erhebliche Potenziale hinsichtlich **Gewichtseinsparung, Funktionsintegration und Fertigungsautomatisierung**. In vorangegangenen Forschungsarbeiten wurde bereits gezeigt, dass leitfähige Strukturen, Sensoren oder Antennen auf leichten Substraten appliziert und funktional genutzt werden können.



Abbildung 1: Gedruckte Leiterbahnen auf Sandwich-Struktur (FAPS)

Ein zentrales Defizit bestand jedoch weiterhin in der **Kontaktierung gedruckter Strukturen**: Klassische Löt-, Crimp- oder Stecktechniken sind für gedruckte Elektronik nur eingeschränkt geeignet oder mit hohem Zusatzaufwand verbunden. An dieser Schnittstelle setzte das Projekt AngElo an, indem es vorhandene Ansätze systematisch untersuchte und neuartige Anbindungskonzepte unter luftfahrtspezifischen Randbedingungen bewertete. Im Fokus des Vorhabens stand nicht die Entwicklung serienreifer Produkte, sondern die systematische Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Anbindungskonzepte, um technologische Machbarkeit, Grenzen und Weiterentwicklungsbedarfe transparent darzustellen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde als **Verbundprojekt zwischen Industrie und Forschung** durchgeführt. Die Zusammenarbeit basierte auf einer klaren Arbeitsteilung entlang der jeweiligen Kernkompetenzen der beteiligten Partner.

Die industrielle Perspektive wurde durch die Jürgenhake Deutschland GmbH eingebracht, insbesondere hinsichtlich bestehender Bordnetzarchitekturen, fertigungstechnischer Rahmenbedingungen und industrieller Anwendbarkeit. Ergänzt wurde dies durch wissenschaftliche Partner, die ihre Expertise in den Bereichen Kontaktierungs-, Fertigungs- und Materialtechnologien einbrachten. Der Fokus des **Lehrstuhls für Fertigungsautomat. und Produktionssystematik (FAPS)** lag primär auf der **gedruckten Elektronik** und den **Druckprozestechnologien**, das **Fraunhofer IAP** hatte wesentlichen Anteil an den **Material-, Füge- und Fertigungsprozessen** der **Faserverbundkomponenten**. Zudem erfolgt der Austausch mit DIEHL AVIATION, die Ihr Interesse und Ihre Unterstützung für das Verbundprojekt zugesagt haben.

Der regelmäßige fachliche Austausch innerhalb des Konsortiums ermöglichte es, technologische Entwicklungen frühzeitig kritisch einzuordnen und praxisnah zu bewerten. Darüber hinaus wurden externe Stellen punktuell einbezogen, um Anwendungsfälle zu validieren und zusätzliche industrielle Anforderungen zu berücksichtigen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die im Verbundvorhaben AngElo durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse **eingehend dargestellt**. Die Darstellung erfolgt entlang der im Antrag definierten Hauptarbeitspakete (HAP 1–HAP 4) und stellt die **ursprünglich formulierten Zielsetzungen den tatsächlich erreichten Ergebnissen gegenüber**.

Die Verwendung der Zuwendung diente dabei ausschließlich der Durchführung der vorgesehenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Ziel war es, die **technische Machbarkeit, die Randbedingungen sowie die Grenzen** neuartiger Anbindungstechnologien für gedruckte Elektronik im Luftfahrtumfeld zu untersuchen. Eine direkte Industrialisierung oder Serienumsetzung war ausdrücklich nicht Gegenstand des Vorhabens, sondern sollte durch eine **systematische, nachvollziehbare Ergebnisbewertung vorbereitet** werden.

2.1.1 AP 0 – Projektmanagement

Zielsetzung

AP 0 diente der Sicherstellung einer strukturierten, fristgerechten und fachlich kohärenten Durchführung des Verbundvorhabens. Dazu gehörten die Koordination der Partnerbeiträge, die Abstimmung der Schnittstellen zwischen Arbeitspaketen, die Organisation von Reviews und Meilensteinterminen sowie die Kommunikation mit dem Projektträger.

Durchgeführte Arbeiten

Das Projektmanagement umfasste insbesondere:

- die initiale Projektorganisation und Abstimmung des Vorhabens zu Projektstart (inkl. Kick-off-Durchführung),
- die fortlaufende Abstimmung zur Einhaltung bzw. Anpassung von Arbeits- und Meilensteinplanung, insbesondere bei terminlichen Verschiebungen (z. B. Verschiebung von MS 1 infolge verschobener Workshops),
- die Organisation und Durchführung von Abstimmungen mit Industrie-/assoziierten Partnern zur Präzisierung der Anforderungen (u. a. Workshop-basierte Ableitung von Anforderungen),

- sowie die Koordination von Umplanungen im Projektverlauf, z. B. bei Ausfall bzw. Verzögerungen geplanter Beiträge und der daraus resultierenden Anpassung des Umsetzungsansatzes innerhalb des Konsortiums.

Ergebnisbeitrag

AP 0 stellte sicher, dass die fachlichen Ergebnisse der Partner entlang eines einheitlichen Zielbilds zusammengeführt werden konnten und dass Abweichungen im Projektverlauf (Termine/Umsetzung) organisatorisch beherrscht und in den Arbeitsplan (s. Abbildung 1) integriert wurden, ohne die inhaltliche Zielsetzung des Vorhabens zu verändern.

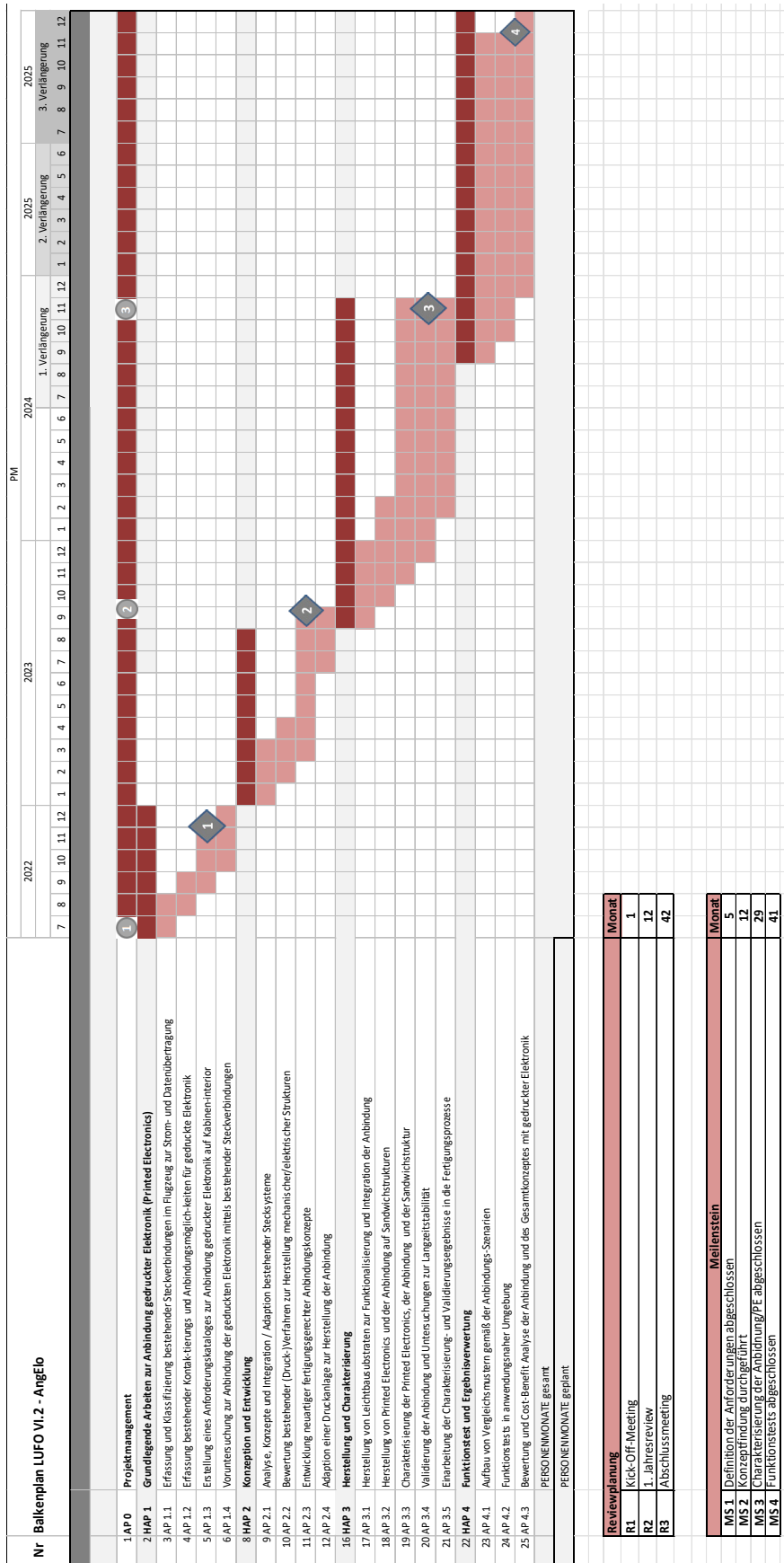


Abbildung 2: Angepasster Arbeitsplan mit Meilensteinen

2.1.2 HAP 1 – Grundlagen und Anforderungen

Zielsetzung

Ziel von HAP 1 war die Schaffung einer belastbaren Ausgangsbasis für die nachfolgenden Entwicklungs- und Validierungsarbeiten. Dazu gehörten:

- die Erfassung und Klassifizierung bestehender Steckverbindungen und Bordnetz-relevanter Verbindungslösungen in der Luftfahrt,
- die Analyse möglicher Kontaktierungs- und Anbindungsmöglichkeiten für gedruckte Elektronik,
- die Definition relevanter Use-Cases im Kabinen-Interieur,
- sowie die Ableitung eines Anforderungskatalogs als verbindliche Grundlage für Konzeptentwicklung und Bewertung.

Durchgeführte Arbeiten

AP 1.1 Erfassung und Klassifizierung bestehender Steckverbindungen

Es wurde eine Systematik zur Erfassung und Klassifizierung bestehender Steckverbindungen im Flugzeug zur Strom- und Datenübertragung aufgebaut. Ziel war es, die Vielzahl der Lösungen strukturiert einzuordnen und auf die für AngElo relevanten Anwendungskontexte einzugrenzen.



Abbildung 3: Verschiedene Stecker- und Kabelvarianten (Jürgenhake)

AP 1.2 Erfassung bestehender Kontaktierungs- und Anbindungsmöglichkeiten für gedruckte Elektronik

Parallel wurden grundlegende Varianten zur Kontaktierung gedruckter Leiterstrukturen hinsichtlich ihrer Eignung analysiert und in die engere Auswahl genommen. Beschrieben wurden u. a. Löt- und Klemmkonzepte als grundsätzlich betrachtete Verbindungstypen; als nicht geeignet wurden verschiedene Steck-/Kontaktprinzipien (z. B. ZIF-, Druckknopf-, Federkontakte, flexible Leiterplatten) eingeordnet.

AP 1.3 Erstellung eines Anforderungskatalogs

Auf Basis der erarbeiteten Use-Cases und der mit dem assoziierten Partner abgestimmten Einsatzszenarien wurde ein Anforderungskatalog abgeleitet. Dieser bildet die luftfahrtspezifischen Randbedingungen für Betrieb und Integration ab und diente im weiteren Projektverlauf als Bewertungsmaßstab für Konzepte und Demonstratoren.

AP 1.4 Voruntersuchungen zur Anbindung über bestehende Steckverbindungen

Ergänzend wurden Voruntersuchungen initiiert, um die prinzipielle Eignung bereits am Markt verfügbarer Lösungen und deren Adaptionsbedarf zu bewerten. Als eine mögliche zulassungsnaher Lösung wurde im frühen Projektverlauf beispielhaft ein marktverfügbares Stecksystem identifiziert, dessen Übertragbarkeit auf gedruckte Elektronik in nachfolgenden Arbeitspaketen weiter untersucht werden sollte.

Ergebnisse

Use-Cases / Anwendungsbereiche

Im Rahmen von HAP 1 wurden drei priorisierte Use-Cases für den Einsatz gedruckter Elektronik im Kabinen-Interieur festgelegt:

1. **Passenger Service Unit (PSU)** – mit der Randbedingung, dass aus Sicherheits-/Zuverlässigkeitsgründen nicht alle kabelgebundenen Verbindungen ersetzbar sind,
2. **Kapazitive Sensoren** – mit der Anforderung, dass die Auswerteeinheit (IC) aufgrund von Interferenzen/Störquellen in unmittelbarer Nähe (max. ca. 10 cm) zur Sensorik positioniert werden muss,
3. **Heizung im Panel** – als Ansatz zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur potenziellen Reduktion zusätzlicher Isolationsmaßnahmen.

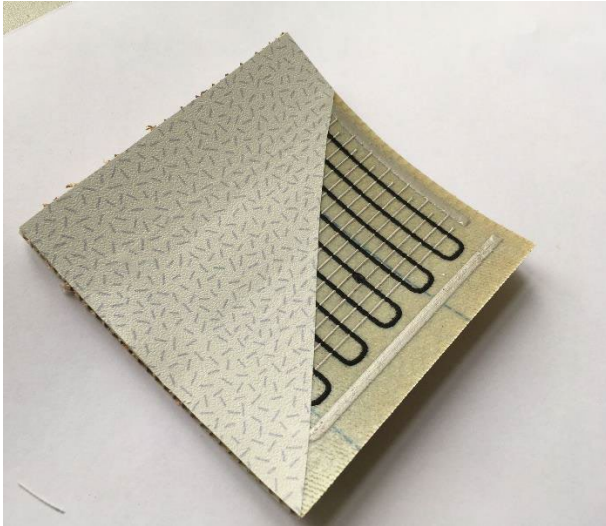


Abbildung 4: Applizierte Heizstrukturen auf einer Sandwichprobe (FAPS)

Anforderungsrahmen

Darauf aufbauend wurden zentrale Anforderungen für den Betrieb im zivilen Luftfahrzeug dokumentiert. Dazu zählen u. a. definierte Temperaturbereiche (Full Performance, Ambient, Survival Mode), abgeleitete Vibrationsanforderungen (ausgehend von PSU-Equipment-Tests), ein vorläufiger Feuchtigkeitsrahmen (stehendes Süßwasser, mögliche spätere Spezifikation), Materialbezüge (u. a. ULTEM, LEXAN/Polycarbonat mit Einschränkungen, ggf. PEEK) sowie eine Übersicht typischer Pin-Bedarfe je Funktionsmodul.

	Nr.	Beschreibung	Art	Quelle	Anforderungsbereich		Kommentar
					min.	max.	
1. Anforderungen an Kommunikationseinrichtungen							
	1.1	keine Störung der Flugzeugfunktionen	muss				
	1.2	Energieaufnahme möglichst gering	soll				
	1.3	zum Großteil druckbar	soll				
	1.4	benötigte Zeit für Druckvorgang	soll		10 min	1 min	
	1.5	Reichweite für effiziente Datenübertragung	muss		1,5 m	5 m	
	1.6	hohe Zuverlässigkeit	soll				
2. Anforderungen an Sensorik							
	2.1	Funktion berührungslos	soll				
	2.2	geringe Energieaufnahme	soll				
	2.3	Sensoren unabhängig von Boardnetz betreibbar	soll				
	2.4	Auflösung der Abstands-Messwerte	muss				
	2.5	Auflösung der Temperatur-Messwerte	muss				

Abbildung 5: Anforderungsliste für AngElo

Mit Abschluss dieser Arbeiten wurde **Meilenstein 1 („Definition der Anforderungen abgeschlossen“)** erreicht.

Einordnung und Abgrenzung

HAP 1 erfüllte die Zielsetzung, einen verbindlichen Anforderungs- und Bewertungsrahmen zu schaffen, der für die nachfolgenden Arbeitspakete (Konzeptentwicklung, Herstellung, Charakterisierung, Funktionstest und Bewertung) als Grundlage diene. Zeitliche Verschiebungen im frühen Projektverlauf resultierten insbesondere aus der notwendigen Terminierung/Verfügbarkeit zentraler Abstimmungen; die inhaltliche Zielsetzung und der Umfang von HAP 1 blieben hiervon unberührt.

2.1.3 HAP 2 – Konzeption und Entwicklung

Zielsetzung

Ziel von HAP 2 war die **konzeptionelle Entwicklung und Auswahl fertigungsge-rechter Anbindungs-lösungen** zur Kontaktierung gedruckter Elektronik im Luftfahrtumfeld und wurde maßgeblich vom **Forschungspartner FAPS** durchgeführt. – basierend auf den in HAP 1 definierten Use-Cases und Anforderungen. Jürgenhake war in HAP 2 beratend und in der Funktion als Gesamtprojektleiter involviert. Hierzu sollten

- **bestehende Kontaktierungs-/Steckkonzepte** auf Eignung geprüft,
- **geeignete Druckverfahren, Materialien und Vorbehandlungen** ausgewählt,
- **neuartige Anbindungskonzepte** entwickelt und systematisch bewertet sowie
- die **technische Basis für die spätere prototypische Umsetzung** (HAP 3) geschaffen werden.

Durchgeführte Arbeiten

AP 2.1 – Analyse, Konzepte und Integration / Adaption bestehender Stecksysteme

In AP 2.1 erfolgte die **Konzeptentwicklung zur Adaption bestehender Systeme** und der **bilaterale Informationsaustausch** der Projektpartner. Es wurden Konzepte entwickelt und anschließend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und Eignung beurteilt; außerdem wurden **Vorversuche zur mechanischen Charakterisierung** der Verbindungstechnologien vorbereitet bzw. eingeplant.

Ein konkreter Konzeptpfad war das **Einpressen von Pins**, wobei aus Vorversuchen abgeleitet wurde, dass hierfür typischerweise eine **zusätzliche Verankerung (Verkleben oder Verschrauben) im Substrat** notwendig ist.

Zur Bewertung wurden geeignete **Charakterisierungsmaßnahmen** festgelegt, u. a.:

- mechanische Tests (Zugversuche, Scherabzugstest),
- elektrische Charakterisierung (Übergangswiderstand, Thermografie),
- Zuverlässigkeitsuntersuchungen (Vibrations- und Schocktests) sowie
- beschleunigte Lebensdauertests (HALT).

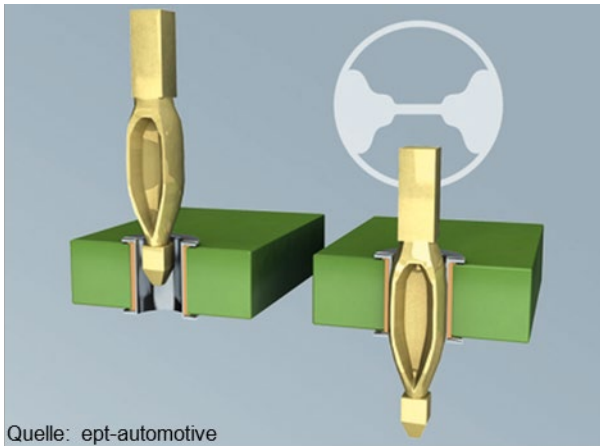


Abbildung 6: Einpressen von Pins (schematische Darstellung)

AP 2.2 – Bewertung bestehender (Druck-)Verfahren zur Herstellung mechanischer/elektrischer Strukturen

AP 2.2 umfasste die **Identifikation und Bewertung** geeigneter (Druck-)Verfahren zur Herstellung mechanischer und elektrischer Strukturen, die **Identifikation geeigneter Tinten** sowie die Umsetzung etablierter Charakterisierungsverfahren (z. B. Rauigkeit, Oberflächenspannung) inklusive Vorbehandlungen zur Verbesserung der Oberflächengüte (z. B. Beschichten, Plasma).

Untersucht und eingeordnet wurden dabei u. a.:

- **Konventionelle Druckverfahren** (Siebdruck, Rotationsdruck, Tiefdruck, Offsetdruck) mit dem Hinweis, dass diese in der Regel **nicht zur Bedruckung von 3D-Objekten geeignet** sind.
- **Tampondruck** als Transferdruckverfahren (inkl. typischer Schichtdicken-/Strukturgrößenangaben).
- **Aerosol-Jet** als Verfahren mit hoher geometrischer Gestaltungsfreiheit und sehr kleinen Strukturbreiten, jedoch mit Herausforderungen hinsichtlich Prozessstabilität und komplexen Wechselwirkungen „Tinte–Substrat“.
- **Ink-Jet** als kontaktloses, robustes Verfahren; als relevanter Pfad wurde **Piezo-Jet** beschrieben (Drop-on-Demand, Jetting mit typischen Linienbreiten).

Bei der Untersuchung von Pasten/Tinten wurde u. a. ein Vergleich der Pasten **WIK-36A** und **ECI1011** (Henkel) dokumentiert: Für ECI1011 wurde eine deutlich höhere Leitfähigkeit (bis ca. 6 MS/m) genannt, jedoch mit schlechterer Haftung; WIK-36A wurde als gut verarbeitbar und geeignet für größere Strukturen eingeordnet.

Weiterhin wurden **Rauigkeitsmessungen** (konfokales Lasermikroskop) sowie die **Messung der Oberflächenspannung** (Kontaktwinkelmessung) eingesetzt. Als Vorbehandlungsansätze wurden Lösungsmitteltests (mit negativer Beeinflussung

der Druckergebnisse) sowie eine **Plasmavorbehandlung** zur Reduzierung des Kontaktwinkels beschrieben, wobei der Effekt abhängig von Prozessparametern (z. B. Vorschubgeschwindigkeit) ist.

AP 2.3 – Entwicklung neuartiger fertigungsgerechter Anbindungskonzepte

In AP 2.3 wurden unterschiedliche Kombinationen aus **Substraten und Tinten** untersucht, die **Oberflächen-/Leiterbahngeometrien** analysiert sowie Design- und Prozessparameter zur Kontaktierung abgeleitet.

Dabei wurden u. a. folgende Arbeiten dokumentiert:

- Definition von Übergangswiderständen in Relation zur gedruckten Länge; dabei wird ausdrücklich herausgestellt, dass die Streuung der gedruckten Bahn höher sein kann als der eigentliche Kontaktierungswiderstand.
- Definition der benötigten **Kontaktierungsflächen** (Pad-Auslegung) und Untersuchung der resultierenden Widerstände.
- mikroskopische und geometrische Untersuchungen von Leiterbahnen und Kontaktierungsstellen sowie der Einfluss des Substrats auf Leiterbahngeometrie und Kontaktstellen.
- Bestimmung des längenabhängigen Widerstands und Herausrechnen des Kontaktierungswiderstands zur Einordnung des Einflusses auf den Gesamtwiderstand.
- Untersuchung der Prozessparameter (z. B. Vorschubgeschwindigkeit), wobei ein Optimum als tintenabhängig beschrieben wird (Beispielangabe für eine Tinte).

Zusätzlich wurden mögliche **Geometrien für Substratplatten** sowie Aspekte der Probenherstellung beschrieben (Lagenaufbau/Pressparameter; Temperatur-/Prozessrestriktionen für Kontaktstifte).

AP 2.4 – Adaption einer Druckanlage zur Herstellung der Anbindung

In AP 2.4 wurde eine Druckanlage zur Umsetzung der Anbindungsprozesse adaptiert. Als System wird ein **MID-Drucksystem** mit definierten Verfahrenswegen und mehreren Rotationsachsen dokumentiert.

Die Anlage wurde als Plattform zur Kombination mehrerer Prozesse beschrieben, u. a. additive Verfahren (z. B. FDM) sowie Druck-/Nachbearbeitungs- und Bestückprozesse (u. a. Piezo-/Aerosol-/Nano-Jet, Dispenser, Pick-and-Place, Sinter-/Curing-Systeme, Sensorik/Kameras).

Als Arbeitsschwerpunkte werden benannt:

- Integration notwendiger Werkzeuge (z. B. Druckkopf/Bestückung/Kamera),
- Anpassung der Werkstückaufnahme an Substratgrößen,

- Randbedingungen durch begrenzten Bauraum sowie prozessuale Einschränkungen (z. B. Arbeiten bei offener Tür).

Auf CAD/CAM- und Softwareseite wurden u. a. Layout-/Design, Werkstücknullpunkt, Fiducials sowie Kalibrier-/Fiducial-Erkennung adressiert.

Ergebnisse

Als Ergebnis von HAP 2 lagen sowohl **ausgewählte Fertigungs-/Druckverfahren** als auch **entwickelte Anbindungskonzepte** vor, die als Grundlage für die prototypische Umsetzung und Charakterisierung (HAP 3) dienten. Es wurde festgehalten, dass geeignete Druckverfahren selektiert und eine Druckanlage zur automatisierten Herstellung der Anbindung modifiziert wurde.

Im Rahmen der Konzeptbewertung werden mehrere Varianten gegenübergestellt. Dabei wird dokumentiert, dass bestimmte Ansätze (u. a. eine HiLinX-Variante sowie eine Einpress-Variante) als nicht praxistauglich bewertet wurden, da unter vibro-mechanischen Belastungen zusätzliche Verankerung/Konterung erforderlich wäre, die im sichtbaren Bereich liegen könnte.

Als weiterverfolgter Ansatz wird die **ONSERT-basierte Lösung** beschrieben: Eine „Klebe-Bolzen“-Technologie, bei der Verbindungselemente mittels UV-Kleber auf Struktur-/Sandwichoberflächen appliziert werden können; der Kleber wird als luftfahrtzugelassen beschrieben, und die Kontaktierung erfolgt über Gewindeelemente bzw. Bolzen.



Abbildung 7: ONCERT® Bolzen (Böllhoff)

HAP 2 stellt damit den Abschluss der Konzeptfindung dar; in den Projektunterlagen wird dies als Erreichen von **Meilenstein 2** („Konzeptfindung durchgeführt“) eingeordnet.

Einordnung und Abgrenzung

HAP 2 erfüllte die Funktion der **konzeptionellen Weichenstellung**: auf Basis definierter Anforderungen wurden geeignete Prozess- und Verfahrenspfade ausgewählt, mehrere Anbindungskonzepte entwickelt, Varianten systematisch verworfen bzw. priorisiert und die technische Grundlage für die prototypische Umsetzung in HAP 3 geschaffen.

Eine Industrialisierung bzw. Serienreife war nicht Ziel von HAP 2; vielmehr wurde bewusst eine **technologieoffene Vorstufe** geschaffen, die eine belastbare experimentelle Validierung und Vergleichsbewertung in den nachfolgenden Arbeitspaketen ermöglicht.

2.1.4 HAP 3 – Herstellung und Charakterisierung

Zielsetzung

Ziel von HAP 3 war die **Herstellung und Charakterisierung** der in HAP 2 entwickelten bzw. ausgewählten Anbindungskonzepte unter anwendungsnahen Bedingungen. HAP 3 wurde maßgeblich von den **Forschungspartnern FAPS und Fraunhofer PYCO** durchgeführt, Jürgenhake war in HAP 3 insbesondere beratend und in der Funktion als Gesamtprojektleiter involviert.

Im Fokus standen dabei (i) die **Funktionalisierung geeigneter Substrat-/Leichtbaustrukturen**, (ii) die **Kontaktierung von Printed Electronics auf Sandwichstrukturen**, (iii) die **elektrische, mechanische und geometrische Charakterisierung** sowie (iv) eine erste **Bewertung der Zuverlässigkeit und des Einsatzes in der späteren Anwendungsumgebung**.

Durchgeführte Arbeiten

AP 3.1 – Herstellung von Leichtbausubstraten zur Funktionalisierung und Integration der Anbindung

Im Rahmen von AP 3.1 wurden Leichtbaustrukturen als Substrate hergestellt, um die zuvor entwickelten Integrations- und Anbindungskonzepte experimentell untersuchen zu können.

Dabei wurde die Substratherstellung so ausgelegt, dass sie sich an kabinenrelevanten Sandwichaufbauten orientiert; die Substrate wurden anschließend für die Integration der Anbindung vorbereitet und in die weiteren Arbeitsschritte überführt.

AP 3.2 – Herstellung von Printed Electronics und der Anbindung auf Sandwichstrukturen

In AP 3.2 wurden Musterteile erzeugt und funktionalisiert sowie unterschiedliche Integrations- und Anbindungskonzepte verifiziert.

Die Strukturen zur Untersuchung der Kontaktierung wurden mit einem **Fünf-Achs-CNC-System** gefertigt; der Druck der 2D-Strukturen erfolgte mittels **Piezo-Jet**.

Zudem wurde ein Ansatz umgesetzt, bei dem auf Substraten sowohl einfache Leiterstrukturen als auch Leiterstrukturen mit Kontaktpad (5 × 5 mm) gedruckt wurden, um die Kontaktierung systematisch vergleichen zu können.

Für die Anbindung wurden Verbindungselemente über das **Böhlhoff-System „ONSERT“** aufgebracht; hierfür wurden bedruckte Substrate zur weiteren Ausführung der Verbindungselemente verarbeitet.

Es wurde außerdem untersucht, welche Reihenfolge der Prozessschritte günstiger ist (zuerst Drucken vs. zuerst Aufbringen der ONSERT-Elemente); dabei wurde festgehalten, dass die vorrangige Applikation der gedruckten Elektronik vorteilhaft ist, weil die gedruckten Strukturen deutlich geringer aufbauen als die ONSERT-Elemente und dadurch prozessual weniger beeinträchtigen

AP 3.3 – Charakterisierung der Printed Electronics, der Anbindung und der Sandwichstruktur

AP 3.3 umfasste die mechanische, elektrische und geometrische Charakterisierung sowie die Analyse der Reproduzierbarkeit.

Mechanische Charakterisierung:

Für gedruckte Strukturen wurde die Haftfestigkeit mittels **Gitterschnitt-Test** geprüft; es zeigte sich eine gute bis sehr gute Haftfestigkeit.

Für die ONSERT-Verbinder wurde im Rahmen der Untersuchungen eine erneute mechanische Charakterisierung nicht in den Vordergrund gestellt; stattdessen wurde die elektrische Bewertung fokussiert.

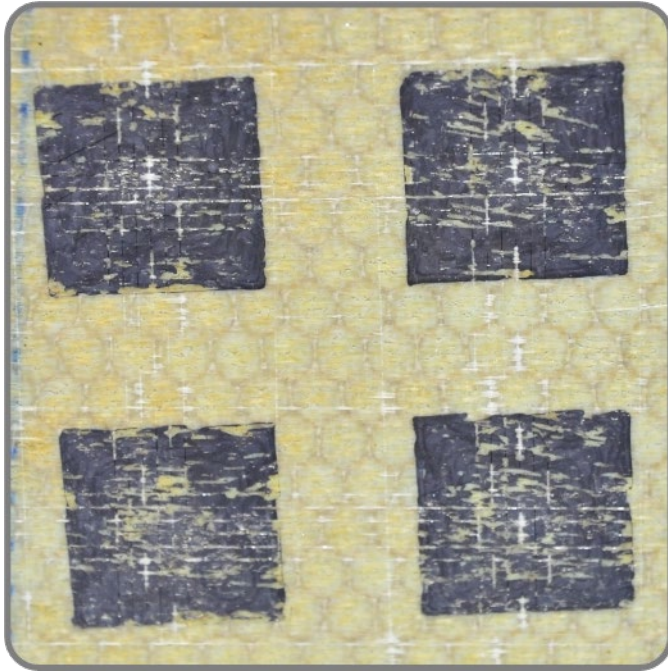


Abbildung 8: Haftfestigkeit der gedruckten Strukturen wurde mittels Gitterschnitttest geprüft (FAPS)

Elektrische Charakterisierung:

Die Leitfähigkeit der gedruckten Strukturen wurde mittels **Vierpunktmessung** ermittelt; es wurde eine mittlere Leitfähigkeit von **2,2 MS/m** berichtet.

Der Übergangswiderstand an den Böllhoff-Verbindern wurde ebenfalls über Vierleiter-Messung (Kelvin-Anordnung) bestimmt; es wurde ein mittlerer Übergangswiderstand von **671 mΩ** angegeben.

Für eine größere Datenbasis wurden zusätzlich **200 leitfähige Linien (25 mm)** auf Polyimid-Folie gedruckt (100 davon mit Kontaktpad) und anschließend mit Kontaktelementen fixiert; anhand der Messungen wurde herausgestellt, dass der Übergangswiderstand ohne Kontaktpads **mindestens 25 % höher** lag.

Weiterhin wird berichtet, dass Kontaktelemente aus **selektivem Laserschmelzen (SLM)** im Vergleich zu Blech-Kontaktelementen einen signifikant geringeren Widerstand ermöglichen.

Geometrische Charakterisierung:

Die Substratoberfläche wurde analysiert; es wurde festgehalten, dass Glasfasern lokale Vertiefungen/Unebenheiten verursachen können.

Für die gedruckten Strukturen wurden relativ gleichmäßige Leitergeometrien mit einer Breite von ca. **325 µm** und einer Höhe von ca. **25 µm** berichtet; Unebenheiten des Substrats führten jedoch zu Fehlstellen.

AP 3.4 – Validierung der Anbindung und Untersuchungen zur Langzeitstabilität

In AP 3.4 wurden Zuverlässigkeits- und Langzeitbetrachtungen durchgeführt. Für die Langzeitstabilität wurden Prüfungen nach **IEC 60512-11-9** und **IEC 60512-6-4** beschrieben, darunter eine thermische Belastung (trockene Wärme) bei **85 °C über 1000 h** sowie Vibrationstests.

Als Ergebnis der thermischen Auslagerung wird berichtet:

- SLM-Kontaktelemente zeigten keine sichtbaren Veränderungen oder funktionalen Beeinträchtigungen.
- Blech-Kontaktelemente zeigten leichte Korrosionserscheinungen sowie eine geringe Erhöhung des elektrischen Widerstands, blieben jedoch funktionsfähig.
- Gedruckte elektronische Strukturen wiesen ausgeprägte Korrosionsschäden auf; infolge der Materialdegradation kam es zu strukturellen Brüchen, wodurch die elektrischen Verbindungen vollständig unterbrochen wurden (kein Durchgang messbar).

Ergänzend wird im Projektkontext berichtet, dass nach einer Auslagerung von ca. **3000 h** deutliche Oxidation der gedruckten Strukturen beobachtet wurde, ein Widerstandsanstieg eintrat und es zu Ausfällen kam.

AP 3.5 – Einarbeitung der Charakterisierungs- und Validierungsergebnisse in die Fertigungsprozesse

Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, dass ein wirksamer **Oxidationsschutz** für gedruckte Strukturen erforderlich ist, um Langzeitstabilität unter thermischer Belastung sicherzustellen.

Als nächster Schritt werden gezielte Untersuchungen mit einem Schutzlack als Barriere gegen Sauerstoff und korrosive Einflüsse beschrieben; parallel sollen Kontaktelemente weiter optimiert werden, um Korrosionsanfälligkeit zu minimieren und die elektrische Kontaktqualität langfristig zu sichern.

Für den Gesamtverbund wird außerdem festgehalten, dass die Notwendigkeit zusätzlicher Schutzmaßnahmen beim Demonstrator zu berücksichtigen ist und potenziell eine kommerzielle Nutzung behindern kann.

Ergebnisse

Der Schwerpunkt von HAP 3 lag in der Herstellung und Charakterisierung der in HAP 2 entwickelten Konzepte.

Als wesentliche Erkenntnis wird dokumentiert, dass die bislang favorisierten Ansätze die Anforderungen nicht vollständig erfüllen; gleichzeitig wurde die parallel evaluierte Konzeptvariante mit dem **Böllhoff-ONSERT-System** als positives Kontaktierungssystem für die elektrische Kontaktierung eingeordnet.



Abbildung 9: Kontaktierung eines Charakterisierungsmusters mittels „Leitungsbrücke“ mit ONSERT®-Technologie

Im Rahmen des Meilensteins 3 wird zusammenfassend festgehalten, dass die Bauteile charakterisiert sowie Zuverlässigkeit und Einsatz in der späteren Anwendungsumgebung bewertet wurden; die Produktentwicklung wird zu diesem Zeitpunkt als abgeschlossen beschrieben.

Einordnung und Abgrenzung

HAP 3 erfüllte die Rolle der **experimentellen Verifikation und Vergleichsbewertung**: Die entwickelten Konzepte wurden auf realitätsnahen Substraten hergestellt, ihre elektrische Kontaktierung quantifiziert und ihre Zuverlässigkeit/Alterungsthemen sichtbar gemacht.

Die Ergebnisse zeigen zugleich, dass der Einsatz gedruckter Leiterstrukturen im luftfahrtspezifischen Umfeld maßgeblich durch Langzeitstabilität und Schutzkonzepte limitiert ist und daher gezielte Weiterentwicklung (insbesondere Oxidationsschutz) erfordert.

Damit bildet HAP 3 die notwendige Grundlage, um in HAP 4 Funktionstests und eine übergeordnete Bewertung/Verwertungseinordnung auf konsolidierten Vergleichsmustern vorzunehmen.

2.1.5 HAP 4 – Funktionstest und Ergebnisverwertung

Zielsetzung

Ziel von HAP 4 war die **Überführung der zuvor entwickelten und in HAP 3 bewerteten Kontaktierungsansätze in Vergleichsmuster/Demonstratoren** sowie deren **funktionale Erprobung in anwendungsnaher Umgebung**. Darauf aufbauend sollte eine **Bewertung** der Anbindung und des Gesamtkonzeptes erfolgen, einschließlich einer **Cost-Benefit-Analyse**.

Durchgeführte Arbeiten

AP 4.1 – Aufbau von Vergleichsmustern gemäß der Anbindungsszenarien

Im Rahmen von AP 4.1 wurde die Herstellung eines **Technologiedemonstrators** als Vergleichsmuster vorgesehen. Das Konzept sieht vor, ein **Side-Wall-Element** herzustellen, auf das mittels eines geeigneten Druckverfahrens ein **Schaltungslayout zur Steuerung einer LED-Leiste und einer Schulterheizung** aufgebracht wird; zusätzlich wird die **Heizstruktur** auf das Element gedruckt. Die LED-Leiste wird als fertiges Element aufgebracht, während weitere elektronische Komponenten **direkt nach dem Druck des Schaltungslayouts** mittels **Pick-and-Place-Prozess** in die noch feuchte Paste gesetzt werden.

Neben der Erstellung des Schaltungslayouts und der Programmierung der Software wurden **Vorversuche zur Funktionalität der Schaltung und der Sensoren** durchgeführt.

Für die Umsetzung des Abschlussdemonstrators ergaben sich jedoch Einschränkungen im Projektverlauf: Aufgrund von **Verzögerungen bei der Herstellung der Side-Wall-Elemente** konnte der Abschlussdemonstrator in diesem Teilkontext nicht wie geplant innerhalb der Projektlaufzeit fertiggestellt werden.

AP 4.2 – Funktionstests in anwendungsnaher Umgebung

Für HAP 4 waren Funktionstests in anwendungsnaher Umgebung vorgesehen. Im Rahmen der Arbeiten wurden hierzu **Vorversuche zur Funktionalität der Schaltung und der Sensorik** durchgeführt.

Da der vollständige Abschlussdemonstrator (Side-Wall-Element mit vollständig integrierter Funktionalität) im beschriebenen Teilkontext aufgrund der Verzögerungen bei der Substrat-/Panelbereitstellung nicht mehr im Rahmen der Projektlaufzeit hergestellt werden konnte, waren Funktionstests an diesem vollständigen Demonstrator in diesem Teilkontext entsprechend eingeschränkt.

AP 4.3 – Bewertung und Cost-Benefit-Analyse der Anbindung und des Gesamtkonzeptes

Im Rahmen von AP 4.3 wurde eine Bewertung des Gesamtkonzeptes vorgenommen, wobei ein wesentlicher Betrachtungsaspekt der Kosten-Nutzen-Analyse die **Gewichtseinsparung** durch gedruckte Elektronik gegenüber herkömmlicher Verkabelung ist. Es wird eine Gewichtseinsparung von **über 90 %** beschrieben: Im Vergleich zu einer Referenzleitung mit geringem Leiterquerschnitt (ca. **7 g/m**) wird die gedruckte Elektronik mit ca. **0,13 g/m** angegeben.

Für eine beispielhafte Abschätzung wird angenommen, dass bei ca. **5 m Leitungslänge pro Panel** (inkl. zusätzlicher Bauteile wie Abstandshalter und Kabelbinder) etwa **50 g** Gewicht eingespart werden könnten. Bei ca. **30 Sitzreihen** in einem A320 und einem Panel pro Reihe und Seite ergibt sich daraus eine grobe Abschätzung von ca. **3 kg** Gewichtseinsparung pro Flugzeug.

Für die betriebliche Einordnung wird zudem auf eine Abschätzung verwiesen, wonach pro eingespartem Kilogramm Gewicht etwa **0,02 bis 0,03 kg Kerosin pro 1.000 km** eingespart werden können; bei einer Größenordnung von **2 Mio. Flugkilometern pro Jahr** wird dies als ca. **50 kg Kerosin** pro Jahr eingeordnet. Über die Lebensdauer (z. B. 20 Jahre) wird dies als **kein signifikanter Hebel** bewertet.

Dem gegenüber werden **hohe Kosten für Zulassung** der Technologie sowie **Investitionen in die Anlagentechnik** als wesentliche Gegenpositionen genannt; insgesamt wird das Kosten-Nutzen-Verhältnis für den betrachteten Anwendungsfall als **deutlich negativ** eingeordnet. Als weiterer wesentlicher Aspekt wird die **geringe Leitfähigkeit** gedruckter Strukturen genannt, weshalb **nur Signalleitungen** sinnvoll substituiert werden können; der Druck von Leitungsstrukturen für höhere Leistungen wird als aktuell nicht sinnvoll beschrieben.

Zusätzlich wird eine **Time-to-Market-/Industrialisierungsabschätzung** beschrieben: kurzfristig (ca. **1–3 Jahre**) Testinstallationen als Designelemente ohne sicherheitskritische Funktion, mittelfristig (ca. **4–7 Jahre**) Integration in die Serienfertigung großer OEMs und langfristig (**>8 Jahre**) eine vollständige Substitution klassischer Kabelbäume hinter Panels durch gedruckte Leiterbahnen. Als zentrale Herausforderung werden weiterhin **Zuverlässigkeit** und **geringe Leitfähigkeit** der Druckmedien hervorgehoben. Sobald die Technologie jedoch ihren Weg ins Flugzeug gefunden hat, wird der Industrialisierungsaufwand als

vergleichsweise gering eingeordnet, da Systeme zur Herstellung gedruckter Elektronik marktverfügbar sind.

Ergebnisse

Im Rahmen von HAP 4 lag ein **ausgearbeitetes Demonstratorkonzept** vor, dass die Herstellung eines Side-Wall-Elements mit gedrucktem Schaltungslayout zur Steuerung einer LED-Leiste und einer Schulterheizung sowie gedruckter Heizstruktur vorsieht; weitere elektronische Komponenten sollten unmittelbar nach dem Druck mittels Pick-and-Place in die noch feuchte Paste gesetzt werden.

Neben der Erstellung von Schaltungslayout und Software wurden **Vorversuche zur Funktionalität der Schaltung und der Sensoren** durchgeführt.

Die **Kosten-Nutzen-Analyse** wurde durchgeführt und inhaltlich insbesondere über den Aspekt der **Gewichtseinsparung** strukturiert. Es wird eine Einsparung von **> 90 %** gegenüber herkömmlicher Verkabelung angegeben (Referenzleitung ca. **7 g/m** vs. gedruckte Elektronik ca. **0,13 g/m**).

Für eine beispielhafte Abschätzung wird ausgeführt, dass bei ca. **5 m Leitungslänge pro Panel** (inkl. zusätzlicher Bauteile wie Abstandshalter/Kabelbinder) etwa **50 g** Gewicht eingespart werden könnten; hochgerechnet auf ca. **30 Sitzreihen** und je ein Panel pro Reihe und Seite ergäbe sich eine Größenordnung von ca. **3 kg** Gewichtseinsparung pro Flugzeug.

Zur betrieblichen Einordnung wird eine Abschätzung genannt, wonach pro eingespartem Kilogramm Gewicht **0,02 bis 0,03 kg Kerosin pro 1.000 km** eingespart werden können; bei **2 Mio. Flugkilometern pro Jahr** entspricht dies ca. **50 kg Kerosin** pro Jahr und wird über die Lebensdauer als **kein signifikanter Hebel** bewertet.

Dem Nutzen werden **hohe Kosten für Zulassung** sowie **Investitionen in Anlagentechnik** gegenübergestellt; das **Kosten-Nutzen-Verhältnis** wird für den betrachteten Anwendungsfall als **deutlich negativ** eingeordnet. Als wesentlicher technischer Grund wird zudem die **geringe Leitfähigkeit** gedruckter Strukturen genannt, weshalb derzeit primär **Signalleitungen** substituiert werden können; für höhere Leistungen wird der Druck von Leitungsstrukturen als aktuell nicht sinnvoll beschrieben.

Zusätzlich wird eine **Time-to-Market-/Industrialisierungsabschätzung** beschrieben: kurzfristig (**1–3 Jahre**) Testinstallationen ohne sicherheitskritische Funktion, mittelfristig (**4–7 Jahre**) Integration in die Serienfertigung großer OEMs und langfristig (**> 8 Jahre**) vollständige Substitution klassischer Kabelbäume hinter Panels durch gedruckte Leiterbahnen.

Einordnung und Abgrenzung

Die Ergebnisse aus HAP 4 zeigen, dass die **Konzeption eines anwendungsnahen Demonstrators** sowie die **wirtschaftliche Einordnung** (Cost-Benefit) auf Basis realistischer Annahmen möglich sind. Gleichzeitig wird deutlich, dass der gewichtseitige Nutzen im betrachteten Szenario durch **Zulassungs- und Investitionsaufwände** sowie durch technische Restriktionen (insbesondere **Leitfähigkeit** und damit verbunden die Einschränkung auf **Signalleitungen**) derzeit nicht zu einem positiven wirtschaftlichen Gesamtbild führt.

HAP 4 ist damit als **Abschluss- und Bewertungsarbeitspaket** zu verstehen, das die technologischen Ergebnisse des Vorhabens in einen **systemischen und wirtschaftlichen Kontext** stellt, ohne eine kurzfristige Serienfähigkeit zu behaupten. Die dargestellten Zeithorizonte zur schrittweisen Annäherung an industrielle Anwendungen (Testinstallationen → Serienintegration → Substitution) sind als **Orientierungsrahmen** zu interpretieren und setzen voraus, dass die in HAP 3 identifizierten Herausforderungen (insbesondere **Zuverlässigkeit** und Stabilität gedruckter Strukturen) weiter adressiert werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Verwendung der im Rahmen des Verbundvorhabens AngElo bereitgestellten Zuwendungsmittel erfolgte entsprechend dem bewilligten Kosten- und Arbeitsplan. Die Ausgaben setzten sich im Wesentlichen aus **Personalausgaben, Kosten für Verbrauchsmaterial, allgemeinen Verwaltungsausgaben** sowie **Reisekosten** zusammen.

Personalausgaben

Die Personalausgaben entfielen auf die Bearbeitung der im Arbeitsplan definierten Arbeitspakete durch Fachpersonal. Die Personalkapazitäten wurden für die beschriebenen Forschungs-, Entwicklungs-, Koordinations- und Dokumentationstätigkeiten eingesetzt.

Die Mittel in diesem Kostenblock wurden nur anteilig in Anspruch genommen, da aufgrund der Verzögerungen bei der Substrat-/Panelbereitstellung der Projekt-Demonstrator nicht mehr im Rahmen der Projektlaufzeit hergestellt werden konnte. Entsprechende Funktionstests, finale Gesamtsystemdemonstratoren und die entsprechend integrierten Kabelbaumlösungen an diesem vollständigen Demonstrator konnten nicht mehr umgesetzt werden.

Kosten für Verbrauchsmaterial

Kosten für die Materialbeschaffung entstanden im Rahmen der **Herstellung von Versuchsaufbauten, Musterteilen und Demonstratoren**. Diese umfassten insbesondere Materialien zur Umsetzung projektbezogener Vorrichtungen, Halterungen und Hilfsaufbauten, die für die Durchführung der experimentellen Arbeiten erforderlich waren.

Beispielhaft sind hier **Materialien für den Einsatz von 3D-Druckern** zu nennen, die zur Herstellung von Bauteilhaltern, Montagehilfen, Aufnahmen für Substrate sowie temporären Prüf- und Versuchsaufbauten verwendet wurden. Darüber hinaus wurden Verbrauchsmaterialien für die Probenherstellung und den experimentellen Aufbau beschafft.

Die beschafften Materialien dienten ausschließlich der **projektbezogenen Umsetzung von Muster- und Versuchsaufbauten** und waren notwendig, um die in den Arbeitspaketen vorgesehenen Untersuchungen technisch realisieren zu können. Die Materialkosten bewegten sich im vorgesehenen Rahmen und ergänzten die übrigen Kostenpositionen sachgerecht.

Allgemeine Verwaltungsausgaben

Die allgemeinen Verwaltungsausgaben wurden entsprechend der Antragskalkulation als Nebenkosten angesetzt. Sie dienten insbesondere der Verwaltung des Projekts sowie dessen Abrechnung und wurden entsprechend Anteilig in Anspruch genommen.

Reisekosten

Reisekosten fielen im Rahmen von Projekttreffen, Workshops, Reviews sowie zur Präsentation der Projektergebnisse auf Fachveranstaltungen an. Die Abrechnung erfolgte entsprechend den geltenden Richtlinien und im vorgesehenen Umfang.

2.3 Notwendigkeit & Angemessenheit der Arbeiten

Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Aus Sicht des industriellen Anwenders und Kabelkonfektionierers Jürgenhake waren die im Vorhaben AngElo durchgeführten Arbeiten notwendig, um die **Anbindung gedruckter Elektronik an bestehende Bordnetz- und Verkabelungsarchitekturen der Luftfahrt** systematisch zu untersuchen und realistisch einzuordnen.

Gedruckte Elektronik verspricht grundsätzlich Potenziale hinsichtlich Gewicht, Funktionsintegration und Montageaufwand. Für einen industriellen Einsatz in der Kabinenintegration ist jedoch weniger die gedruckte Leiterstruktur selbst, sondern insbesondere die **Schnittstelle zur klassischen Verkabelung** entscheidend. Aus industrieller Sicht stellen **Kontaktierung, Verbindungstechnologie, mechanische Fixierung, Prozessintegration** und **Zulassungsnähe** die zentralen Herausforderungen dar.

Die durchgeführten Arbeiten waren daher notwendig, um diese Schnittstellenfragen nicht abstrakt, sondern anhand konkreter Konzepte, Muster und Vergleichsbewertungen zu adressieren. Die Rolle von Jürgenhake lag dabei explizit in der **Übertragung der Forschungsansätze auf reale Bordnetz- und Kabelbaumsysteme**, der Bewertung der Umsetzbarkeit und der Identifikation von Restriktionen entlang der industriellen Prozesskette.

Darüber hinaus machten äußere Rahmenbedingungen – u. a. pandemiebedingte Lieferverzögerungen sowie die Insolvenz eines vorgesehenen Umsetzungspartners – Anpassungen in der operativen Umsetzung erforderlich. Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeiten ergibt sich auch daraus, dass diese Anpassungen genutzt wurden, um **alternative Kontaktierungs- und Integrationspfade** im Konsortium weiter zu untersuchen und belastbare Aussagen zur industriellen Einordnung zu ermöglichen.

Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren aus Sicht von Jürgenhake in Art und Umfang angemessen, da sie konsequent auf die **industriell relevanten Fragestellungen der Anbindung** fokussiert waren. Im Projektverlauf wurden gezielt unterschiedliche **Verbindungskonzepte, Kontaktierungsprinzipien** und **Integrationsansätze** betrachtet, vergleichend bewertet und – wo notwendig – verworfen.

Insbesondere ist hervorzuheben, dass die Arbeiten nicht auf eine theoretische Optimierung einzelner Teilaspekte beschränkt blieben, sondern stets im Kontext **realer Kabinenstrukturen, Bordnetzanforderungen** und **Fertigungsrandbedingungen** betrachtet wurden. Die Bewertung der Konzepte erfolgte dabei entlang

praxisrelevanter Kriterien wie mechanischer Robustheit, prozessualer Beherrschbarkeit, Sichtbarkeit im Passagierbereich sowie Zulassungsnähe.

Auch dort, wo sich technische Grenzen zeigten – etwa hinsichtlich der Langzeitstabilität gedruckter Leiterstrukturen oder des zusätzlichen Schutzbedarfs – ist die Angemessenheit der Arbeiten gegeben, da diese Erkenntnisse für Jürgenhake als Anwender von zentraler Bedeutung sind. Die Identifikation solcher Grenzen ist Voraussetzung für eine realistische Einschätzung, ob und in welchen Anwendungsfällen eine spätere Integration sinnvoll erscheint.

Aus Sicht des Kabelkonfektionierers ist zudem positiv hervorzuheben, dass keine Arbeiten ohne Ergebnisbeitrag durchgeführt wurden. Jeder untersuchte Ansatz lieferte entweder **eine positive Validierung, eine klare Abgrenzung** oder **eine fundierte Verwerfung eines Konzepts** – allesamt wesentliche Ergebnisse für die Weiterentwicklung zukünftiger Bordnetz- und Integrationslösungen.

Die anschließende Einordnung der Ergebnisse in eine Kosten-Nutzen- und Industrialisierungsperspektive ist ebenfalls als angemessen zu bewerten. Sie zeigt, dass mögliche Gewichtsvorteile allein nicht ausreichen, um eine Substitution klassischer Kabelsysteme zu rechtfertigen, solange Verbindungstechnik, Zuverlässigkeit und Zulassung nicht in einem industriell tragfähigen Rahmen darstellbar sind. Genau diese transparente Bewertung entspricht dem Charakter des Vorhabens als **technologische Vorstufe** und liefert Jürgenhake eine belastbare Entscheidungsgrundlage für mögliche Folgeaktivitäten.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse (fortgeschriebener Verwertungsplan)

Einordnung der Verwertbarkeit

Die im Vorhaben AngElo erzielten Ergebnisse stellen **keine unmittelbar marktgängigen Produkte** dar, sondern sind als **technologische Vorstufen** zur weiteren Entwicklung neuartiger Anbindungskonzepte für gedruckte Elektronik im Luftfahrtumfeld einzuordnen. Entsprechend kommen **Verkaufserlöse oder ein Wertausgleich** aus den Projektergebnissen nicht in Betracht. Die Ergebnisse dienen vielmehr der **internen Technologie-, Konzept- und Kompetenzentwicklung** der Jürgenhake Deutschland GmbH.

Aus Sicht von Jürgenhake liegt der Nutzen des Vorhabens insbesondere darin, die **Rolle der Verbindungstechnik zwischen gedruckter Elektronik und klassischem Bordnetz** fundiert zu analysieren, zu bewerten und realistisch einzuordnen. Die Ergebnisse zeigen, unter welchen Randbedingungen gedruckte Elektronik prinzipiell integrierbar ist und wo aus heutiger Sicht **technische, regulatorische und wirtschaftliche Grenzen** bestehen.

Erwartete Ergebnisse und Nutzung im Unternehmen Jürgenhake

Die im Projekt erzielten Ergebnisse umfassen insbesondere:

- die **Identifikation und Bewertung relevanter Kontaktierungs- und Verbindungstechnologien,**
- die **Konzeptentwicklung zur Anbindung gedruckter Elektronik an bestehende Bordnetze,**
- die **Herstellung und Bewertung von Funktions- und Vergleichsmustern,**
- sowie eine **systematische Kosten-Nutzen- und Industrialisierungseinordnung.**

Diese Ergebnisse fließen nicht in eine unmittelbare Produktentwicklung, sondern werden bei Jürgenhake als **Wissens- und Entscheidungsbasis** genutzt. Sie dienen dazu, künftige Kunden- und Entwicklungsprojekte frühzeitig hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit, ihres Integrationsaufwands und ihrer Zulassungsnähe bewerten zu können.

Verwertungsstrategie und Zeithorizont

Aus heutiger Sicht ist die Verwertung der Ergebnisse **schrittweise und langfristig** angelegt. Aufgrund der hohen Qualifizierungs- und Zulassungsanforderungen in der Luftfahrt wird ein unmittelbarer industrieller Einsatz nicht angestrebt.

Mittelfristig (Zeithorizont ca. **5–10 Jahre nach Projektende**) beabsichtigt Jürgenhake, die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse in **Muster- und Qualifizierungsprojekten** einzusetzen. Ein möglicher Ansatzpunkt hierfür ist die im Vorhaben initiierte Zusammenarbeit mit assoziierten Industriepartnern aus der Luftfahrtzulieferkette, insbesondere im Kabinenumfeld.

Langfristig (Zeithorizont ca. **10–15 Jahre nach Projektende**) sieht Jürgenhake die Möglichkeit, sich als **Schlüsselpartner für Anbindungslösungen gedruckter Elektronik** zu positionieren. Dabei liegt der Fokus nicht auf der Herstellung gedruckter Elektronik selbst, sondern auf der **Entwicklung, Produktion und Integration neuartiger Verbindungstechnologien** an der Schnittstelle zwischen Kabelkonfektion, Bordnetz und funktionalisierter Struktur.

Abgrenzung und Weiterentwicklungsbedarf

Das Vorhaben AngElo zeigt zugleich klar auf, dass für eine wirtschaftliche Verwertung noch wesentliche Weiterentwicklungen erforderlich sind. Insbesondere betreffen diese:

- die **Langzeitzuverlässigkeit und den Schutz gedruckter Leiterstrukturen**,
- die **elektrische Leistungsfähigkeit** (derzeit Einschränkung auf Signalleitungen),
- sowie den erheblichen **Zulassungs- und Integrationsaufwand** im Luftfahrtumfeld.

Diese Punkte verdeutlichen, dass die im Vorhaben erzielten Ergebnisse bewusst eine **Abgrenzung des Projektumfangs** darstellen. Die identifizierten Restriktionen sind nicht als negativer Befund zu verstehen, sondern als notwendige Voraussetzung für gezielt ausgerichtete Folge- und Vertiefungsvorhaben.

In diesem Sinn bilden die Ergebnisse von AngElo eine belastbare Grundlage für zukünftige Forschung und Entwicklung an der Schnittstelle zwischen **gedruckter Elektronik und Bordnetz-Integration**, ohne eine unmittelbare Industrialisierung vorwegzunehmen.

2.5 Während der Laufzeit bekannt gewordene externe Fortschritte / Ergebnisse Dritter

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden keine externen wissenschaftlichen oder technischen Fortschritte bei anderen Stellen bekannt, die eine **Änderung der Zielsetzung, des Arbeitsplans oder des Projektumfangs** erforderlich gemacht hätten.

Die im Projekt AngElo verfolgten Fragestellungen zur Anbindung gedruckter Elektronik an bestehende Bordnetz- und Kabinenstrukturen der Luftfahrt decken nach Kenntnisstand der Projektpartner weiterhin ein **Forschungs- und Entwicklungsfeld mit begrenzter industrieller Reife** ab. Zwar existieren parallel laufende Forschungsaktivitäten im Bereich gedruckter Elektronik und funktionalisierter Strukturen, insbesondere auch in angrenzenden Branchen, jedoch ergaben sich daraus keine unmittelbar übertragbaren Lösungen für die **kontaktierungs- und zulassungsrelevanten Fragestellungen**, die im Rahmen von AngElo adressiert wurden.

Die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse bestätigen vielmehr, dass die im Projekt untersuchten Themen – insbesondere Kontaktierung, Verbindungstechnologien, Langzeitzuverlässigkeit und industrielle Integration – weiterhin **eigenständigen Entwicklungsbedarf** erfordern und nicht durch externe Ergebnisse substituiert werden konnten. Entsprechend bestand während der Laufzeit keine Veranlassung zur Anpassung des Projektansatzes.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Vorhabens AngElo wurden Projektergebnisse sowohl wissenschaftlich als auch in anwendungsnahen Fachformaten veröffentlicht und vorgestellt.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- **Fröhlich, J.; Piechulek, N.; Nguyen, H. G.; Franke, J.; Jürgenhake, C.:** *Reliable and Automated Connection of Printed Electronics to the Aviation Electrical System*, **2024 Pan Pacific Strategic Electronics Symposium (Pan Pacific)**, Kona, Big Island, HI, USA, 2024, pp. 1–6, doi: 10.23919/PanPacific60013.2024.10436443. Präsentation vor Ort durch Jan Fröhlich.
- **Fröhlich, J.; Piechulek, N.; Franke, J.; Bründel, P.; Jürgenhake, C.:** "Towards an innovative approach to connect printed electronics to the aircraft cabin electrical system," 16th International MID Congress 2025, Amberg, Germany 2025 (bei IEEE geplante Veröffentlichung lag zum Projektende noch nicht vor)

Fachvorträge und Projektvorstellungen

- **Posterpräsentation:** *Anbindung gedruckter Elektronik an das Bordnetz (AngElo)*, 8. Fachtagung „Effiziente Signal- und Leistungsvernetzung“, Nürnberg, 27. Juni 2024. Vortragender: Dr.-Ing. Christoph Jürgenhake.
- **Fachvortrag:** *AngElo – Anbindung gedruckter Elektronik an das Kabinen-Bordnetz*, Forum Innovationsflughafen PAD, Paderborn, 20. November 2024. Vortragender: Dr.-Ing. Christoph Jürgenhake.

Dokumentationen

- Für den **Meilenstein 1** wurde eine umfassende **Dokumentation** mit den aktuellen Ergebnissen erstellt und dem Projektträger zur Verfügung gestellt.
- Für die **Meilensteine 2 & 3** wurden umfassende **Foliendokumentationen** erstellt und dem Projektträger zur Verfügung gestellt.
- **Meilenstein 4** wurde im Rahmen des Abschlussmeetings dokumentiert und dem Projektträger zur Verfügung gestellt.

Darüber hinaus sind zum Abschluss des Vorhabens keine weiteren Veröffentlichungen geplant. Die erzielten Ergebnisse dienen primär der **internen technologischen Einordnung und als Grundlage für mögliche Folgeprojekte**, nicht jedoch einer unmittelbaren öffentlichen Vermarktung.