

APFEL SCHLUSSBERICHT
Technical Report

DOCUMENT NO.: P-AR-421-0001-00-00004_RevB_TIB.docx
REVISION: B

ISSUE DATE 14.10.2025

APFeL Schlussbericht

Technical Report

DOCUMENT NUMBER	P-AR-421-0001-00-00004
PROGRAM	Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)
ATA CHAPTER	N/A
CUSTOMER	Projektträger Jülich
LANGUAGE	Deutsch

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

	NAME	FUNCTION	DATE	SIGNATURE
AUTHORING	T. Beising	Senior Analysis Engineer	14.10.2025	
APPROVAL	A. Längert	Analysis Engineer	15.10.2025	
AUTHORIZATION	R. Zeillinger	CTO	15.10.2025	

This document supersedes all previous revisions. All earlier publications of this document are invalid and must be eliminated immediately!

APFEL SCHLUSSBERICHT

Technical Report

DOCUMENT NO.: P-AR-421-0001-00-

00004_RevB_TIB.docx

REVISION: B

ISSUE DATE 14.10.2025

RECORD OF REVISIONS

REVISION	DATE	EFFECT ON		REASONS FOR REVISION
		PAGE	PARA	
A	16.09.2025	All		Initial Release
B	14.10.2025		2.1	Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse

TABLE OF CONTENTS

1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	4
1.2	Voraussetzungen und Rahmenbedingungen	4
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2	Eingehende Darstellung	5
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	5
2.2	Nachweise und Abweichungen	14
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	14
2.4	Nutzen und Verwertbarkeit	14
2.5	Fortschritt und offene Punkte	15
2.6	Publikationen	15
3	Erfolgskontrollbericht und Ausblick	15
4	Zusammenfassung und Stellungnahme	15

SCHLUSSBERICHT

“BELASTUNGSABHÄNGIGE PROZESSOPTIMIERUNG”

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel dieses Teilprojekts ist die Entwicklung einer Erweiterung für Finite-Elemente-Softwareprodukte, um die Prozesszeiten von 3D-Druck-Prozessen zu reduzieren. Dabei soll die Geometrie des Bauteils grundsätzlich erhalten bleiben. Das Softwaretool soll niedrigbelastete Regionen im Bauteil identifizieren, in denen schneller gedruckt werden kann, wobei Porositäten in Kauf genommen werden. Der strukturelle Nachweis erfolgt in iterativen Schleifen, in denen die neuen Materialeigenschaften der porösen Bereiche berücksichtigt werden.

1.2 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen

Das Projekt wurde über mehrere Jahre durch PRIME aerostructures GmbH durchgeführt, wobei die Organisation als KMU förderfähig war. Durch den projektbezogenen Einsatz und die enge Zusammenarbeit mit Softwareherstellern und wissenschaftlichen Partnern wurden innovative automatisierte Workflow-Module entwickelt.

Der Projektstart verzögerte sich, woraufhin der Konsortialführer Materialise eine Überprüfung der Projektziele anregte. PRIME entschied sich, zusätzlich zur ursprünglichen Zielsetzung auch eine Geometrieoptimierung mittels Topologieoptimierung zu verfolgen.

Am 25. Februar 2025 wurde PRIME von TECHNIA übernommen. Aufgrund dieser Übernahme konnte PRIME nicht weiter gefördert werden, da TECHNIA kein kleines oder mittleres Unternehmen (KMU) ist und keine Betriebsstätte mehr in Deutschland besitzt. PRIME hat daher seine Tätigkeiten im Projekt zu diesem Stichtag eingestellt. TECHNIA übernimmt nun teilweise die verbleibenden Arbeiten im Unterauftrag vom Partner IWT. Folgende Punkte sind derzeit noch offen und werden durch TECHNIA weiterbearbeitet: Debugging des Scripts, Verbesserung der Automatisierung in *Process Composer*, Lebensdauerprüfung (Fatigue) der optimierten Bauteile sowie die Kombination von Topologieoptimierung und belastungsabhängiger Materialzuweisung.

1.3 Planung und Ablauf

Die Projektarbeit lief zunächst planmäßig, umfasste klassische Topologieoptimierung und die Implementierung eines Scripts für belastungsabhängige Materialzuweisung. Ab dem Stichtag 25.02.2025 erfolgte ein Unternehmenswechsel: PRIME wurde von TECHNIA übernommen, sodass PRIME als Fördernehmer ausschied und TECHNIA als Rechtsnachfolger ohne deutsche Betriebsstätte die Arbeiten nur in Unterauftragung fortführen kann.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

- Entwicklung und Implementierung eines Scripts zur lokalen Materialzuweisung anhand von FEM-Auswertungen für verschiedene Lastfälle.
- Entwicklung und Erprobung der automatisierten Prozessschleife in der 3DEXPERIENCE Plattform (*Process Composer*).
- Austausch und Kooperationsgespräche mit Softwareherstellern und wissenschaftlichen Partnern.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Konsortium aus PRIME/TECHNIA, IWT, Materialise, Inpeca, Fraunhofer IAPT und 3N e.V. arbeitete eng zusammen. Der größte Austausch fand dabei mit dem IWT (Materialkennwerte, Prozessparameter, Versuchsplanung), dem Fraunhofer IAPT (Simulation, Topologieoptimierung) und Materialise (Datenweitergabe) statt.

Nach dem Ausscheiden von PRIME werden die Teilaufgaben zur Nachbearbeitung (z. B. Lebensdauerbewertung) explizit beim IWT verbleiben (u.a. TECHNIA im Unterauftrag).

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Mittel wurden für Entwicklung, Testing, Implementierung und Automatisierung der Prozessmodelle sowie für wissenschaftliche Tests und Validierungen eingesetzt. Die erreichten Ziele umfassen eine deutliche Prozessverkürzung und Innovationsbeiträge zur belastungsabhängigen Materialwahl. Die Aufbauteile des Anwendungsfalles Fahrradkurbel konnte mehr als verdoppelt werden, die Druckzeit damit etwa halbiert. Folgend sind die einzelnen Schritte und Zwischenergebnisse aufgeführt.

In einem ersten Schritt wurde die im Antrag geplante Script-basierte belastungsabhängige Materialzuweisung entwickelt. Dazu wurde ein Script geschrieben, welches eine FEM-Ergebnisdatei einliest und den einzelnen Elementen je nach Belastung entsprechende Materialparameter zuweist. Als Grundlage dafür dient die von-Mises Spannung. Ist diese von einem FEM Element gering, werden geringere Steifigkeitswerte zugewiesen um so den strukturellen Auswirkungen von einem schnelleren Druck Rechnung tragen zu können. Für die Entwicklung des Scripts wurden zunächst drei Materialklassen angenommen: Das Basismaterial, welches den bestmöglichen Druckergebnissen entspricht, sowie den reduzierten Klassen 90% und 80%, welche jeweils nur 90% bzw. 80% der Steifigkeiten aufweisen.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen Materialklassen gelistet. Die Dichte wurde ebenfalls skaliert, durch sie kann später die Druckzeiteinsparung abgeschätzt werden. Ebenso sind in Tabelle 1 die Schwellwerte der Materialzuweisung gelistet. Demnach werden Elementen mit einer Spannung kleiner als 80MPa die Materialklasse 80% zugewiesen, Elementen mit einer Spannung im Bereich von 80-120MPa die Materialklasse 90% und Elementen mit einer von-Mises Spannung größer als 120MPa das Basismaterial:

Material	Base	90%	80%
E-Modul [MPa]	74000	66600	59200
Dichte [kg/l]	2.67	2.40	2.14
Max Mises [MPa]	120 > x > 240	80 > x > 120	< 80

Tabelle 1: Materialklassen

Es ist hervorzuheben, dass die Werte zunächst lediglich Arbeitswerte sind, da zu dem Zeitraum der Scriptentwicklung noch keine Testergebnisse mit tatsächlichen Werten vorlagen.

Durch die geänderten Materialeigenschaften in bestimmten Bereichen ändert sich das Bauteilverhalten wie auch die Spannungsverteilung in dem Bauteil. Daher sind weitere Simulationsschleifen notwendig, die diese Veränderungen berücksichtigen. Um diesen Prozess möglichst zu Automatisieren wurde das Tool *Process Composer*, welches Teil der 3DEXPERIENCE Plattform von Dassault Systèmes ist, herangezogen. Abbildung 1 zeigt die Umsetzung der Prozessschleife:

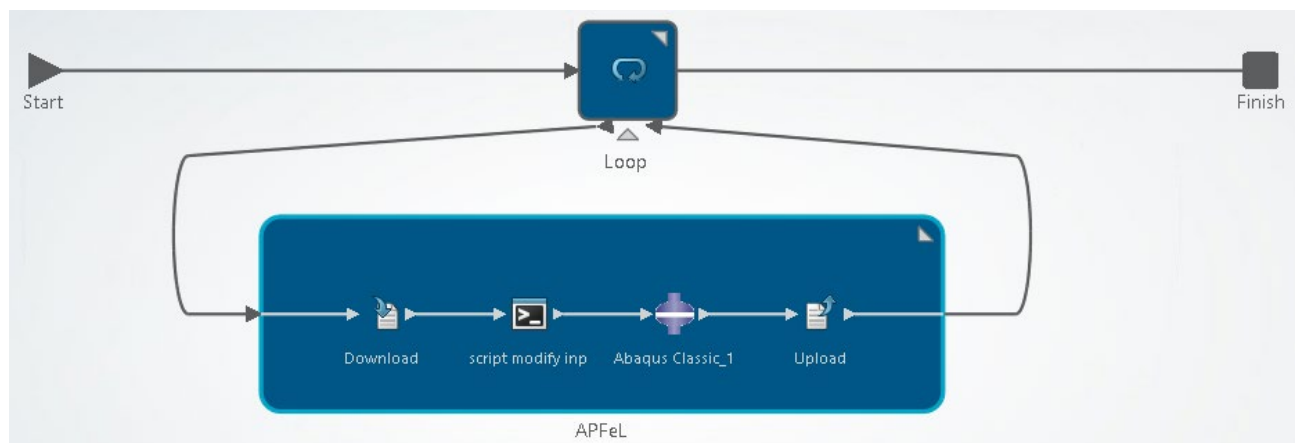


Abbildung 1: Prozessschleife innerhalb der 3DEXPERIENCE Plattform

Als Abbruchkriterium wird die Änderung des Gesamtgewichts in Betracht gezogen, worüber auf Anpassungen im Modell Rückschlüsse gezogen werden können. Da aber bisher noch kein Abbruchkriterium implementiert wurde, wurde die Anzahl der Schleifen zunächst auf 15 bestimmt. Innerhalb der Schleife werden die Ergebnisse der letzten Berechnung automatisch heruntergeladen und durch das Script eingelesen, welches dann gegebenenfalls das Modell wie beschrieben anpasst. Die modifizierte Input-Datei wird dann an das FEM-Tool Abaqus übergeben und dessen Ergebnisse nach erfolgreicher Simulation wieder dem Tool eingelesen. Innerhalb der Schleife geschieht das vollautomatisch, es sind keine weiteren Eingaben durch den Nutzer notwendig.

Das Konsortium hat sich auf das erste Demonstratorbeispiel Fahrradkurbel geeinigt. In Abbildung 2 ist das FEM Modell dargestellt, welches für die Erprobung des Materialzuweisungsscript herangezogen wurde:

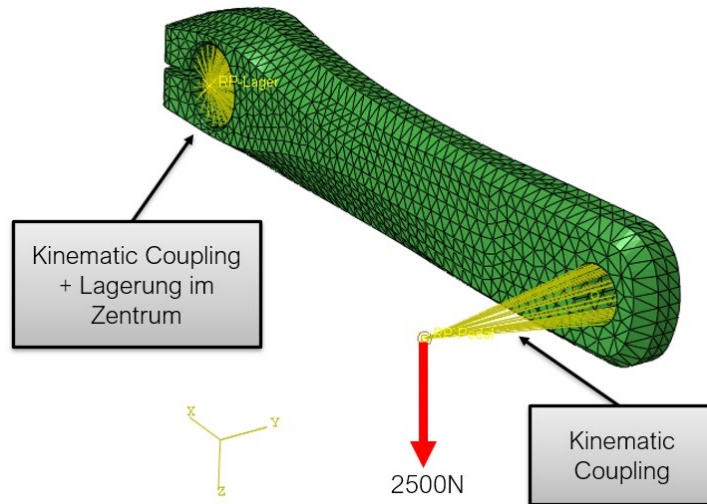


Abbildung 2: FEM Modell des Demonstratorbeispiels Fahrradkurbel

In Abbildung 3 ist die Masse der einzelnen Prozessschritte dargestellt. Es ist erkennbar, dass im ersten Loop vielen Elementen eine niedrigere Materialklasse zugewiesen wird, die Masse sinkt von 275 Gramm auf 240 Gramm. In Loops 2-5 finden noch geringe Anpassungen statt, wobei Elementen mit zu hohen Spannungen den nächst höheren Klassen zugewiesen werden. Nach Loop 5 findet keine Änderung mehr statt, das Modell ist konvergiert.

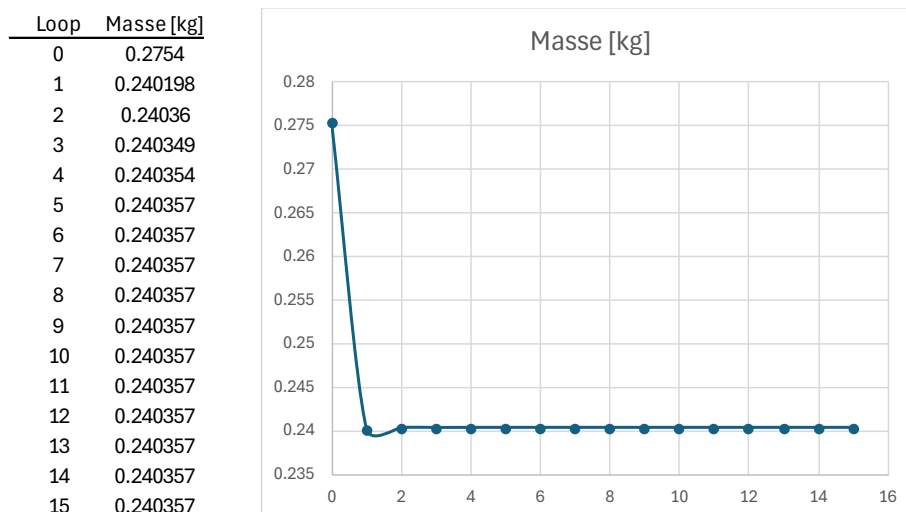


Abbildung 3: Gesamtmasse der einzelnen Loops

In Abbildung 4 ist die Materialzuweisung der einzelnen Schritte zu sehen. Dort sind auch die Änderungen von Schritt 1 auf Schritt 2 in der Mitte auf der Ober- und Unterseite zu erkennen, auf denen mehrere Elemente von der 90%-Klasse (rot) auf das Basismaterial (grün) geändert werden:

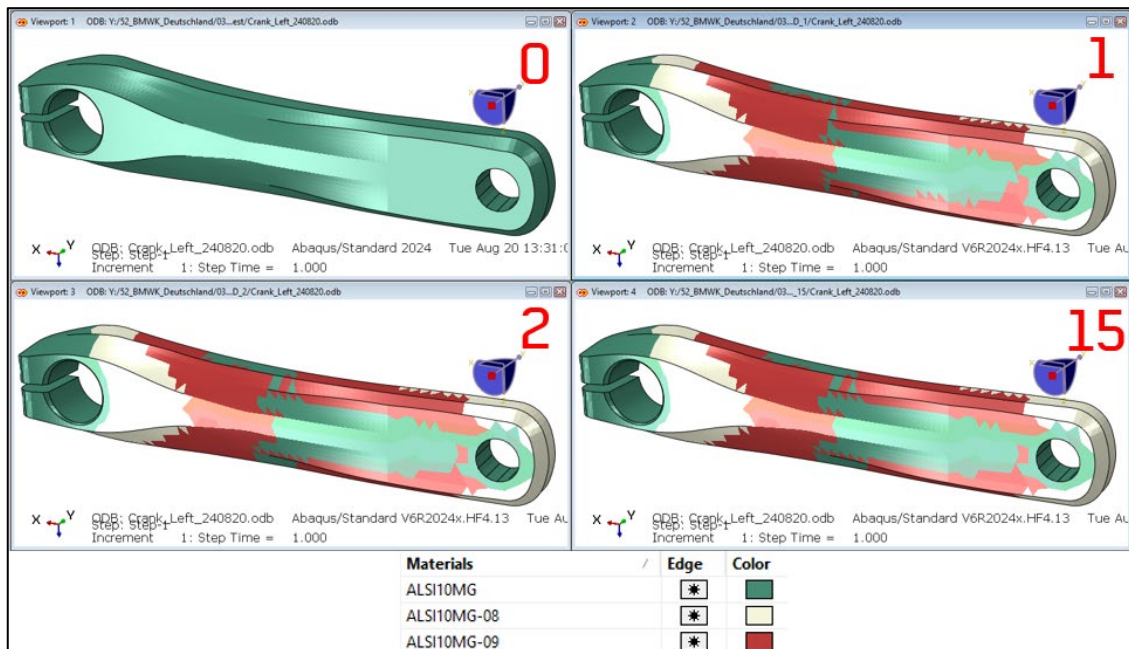


Abbildung 4: Materialzuweisung der Schritte 0, 1, 2 und 15

Dabei ist zu bemerken, dass die Bereiche des Pedalgewindes, in denen die Lasteinleitung stattfindet, und der Bereich der Randbedingung am Tretlager von der Optimierung ausgenommen wurden. In Abbildung 5 sind nochmal die einzelnen Bereiche dargestellt, auf der linken Seite das Basismaterial um die Randbedingung- bzw. Lasteinleitungsbereiche sowie in den höherbelasteten Bereichen auf den Außenseiten. Der Bereich des 90%-Materials (rot) ist hohl, da das 80%-Material in den niedrigbelasteten Bereichen des Bauteilszentrum liegt.

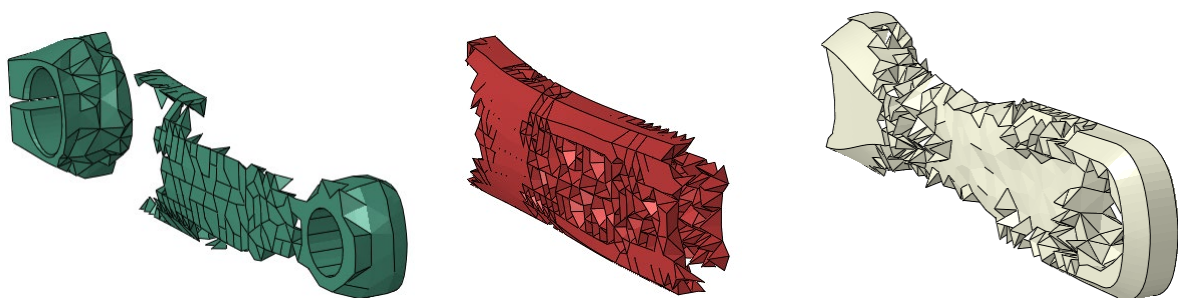


Abbildung 5: Einzelne Materialklassen Schritt 15

In Abbildung 6 sind zur Verifizierung die Spannungen der einzelnen Materialklassen des Loops 15 zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Spannungen des 80%-Materials unter 80MPa liegen und die des 90%-Materials im Bereich 80-120MPa:

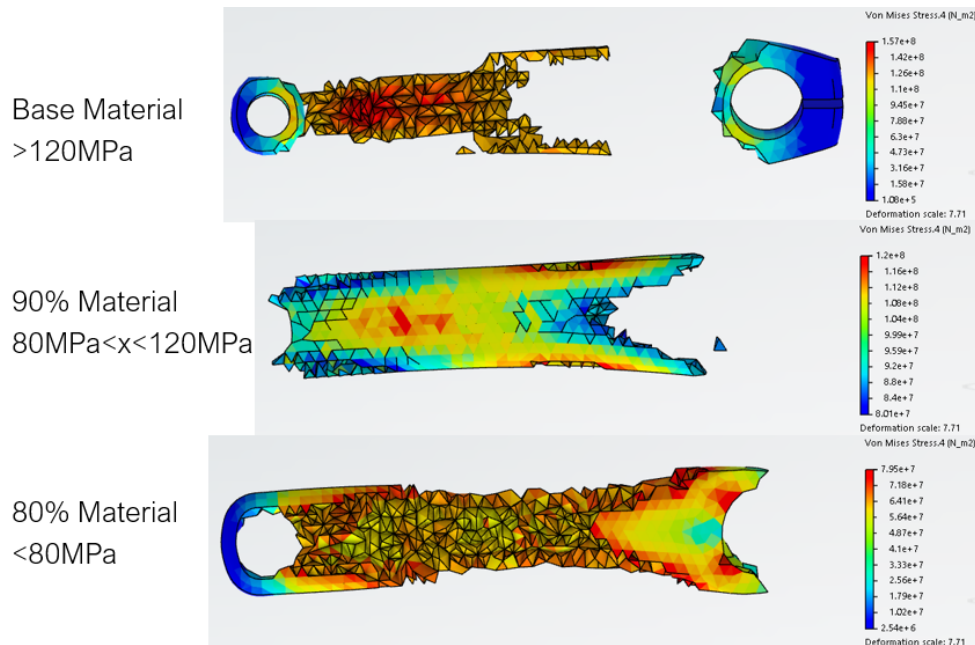


Abbildung 6: Spannungsverteilung in den einzelnen Materialklassen

Somit ist der Meilenstein 1 (grundsätzliche Funktion der Optimierungs- und Berechnungsmodelle nachgewiesen) erreicht.

In dem zweiten Projektjahr wurde sowohl das Script zur belastungsabhängigen Materialanpassung wie auch die Prozessschleife zur Automatisierung des Scripts weiterentwickelt und an einem weiterem Use Case getestet.

Ein Ziel des gesamten Prozesses bestand darin, ihn so praxisnah wie möglich zu gestalten. Dies schließt die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Lastfälle ein. Mithilfe des Scripts werden elementweise die Spannungszustände aus verschiedenen Lastfällen ausgewertet und jedem Element der höchste Spannungswert aller Lastfälle zugewiesen. Basierend auf diesem Wert erfolgt danach die Materialzuweisung. Das Script wurde dahingehend modifiziert, dass ein Sicherheitsfaktor angegeben werden kann, welcher die Spannungen bei der Auswertung nach oben skaliert, um gewisse Reserven im Bauteil zu erhalten. Die Spannungen werden durch das Script überprüft, ob ein vorgegebener Maximalwert überschritten wird. In einem solchen Fall wird der Nutzer automatisch benachrichtigt.

Ebenso wurde das Prozesshandling in der 3DEXPERIENCE App *Process Composer* weiter vereinfacht. Der Anwender muss hierfür in der grafischen Oberfläche nur noch die FEM Input Datei hochladen. Eine eigenständige initiale Berechnung ist nicht mehr notwendig, diese wird automatisch durchgeführt. Zudem müssen die Materialklassen mit den verringerten mechanischen Eigenschaften, die sich aus dem schnelleren Druck ergeben, nicht mehr selbst durch den Nutzer in die Input Datei eingetragen werden, sondern werden automatisiert durch das Script übernommen. In Abbildung 7 ist die grafische Oberfläche des Prozesses in der App *Process Composer* von der 3DEXPERIENCE Plattform abgebildet.

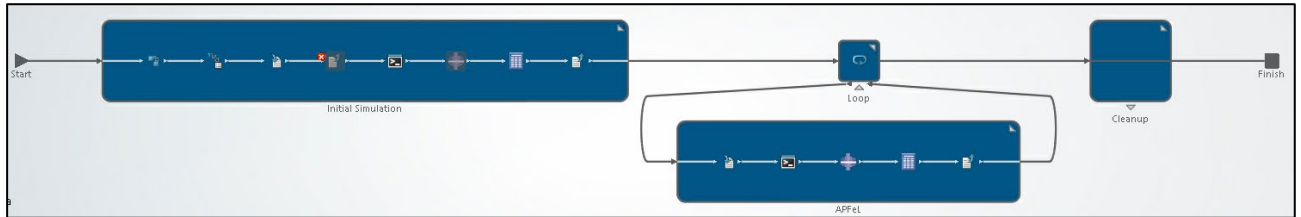


Abbildung 7: Prozessschleife innerhalb der 3DEXPERIENCE Plattform

Innerhalb des zweiten Projektjahres sind Testergebnisse von Zugversuchen vom Partner IWT bereitgestellt worden. Diese wurden in drei Klassen kategorisiert, Qualitätsstufe hoch, mittel und niedrig, wobei die letztere eine relative Dichte von 90% aufweist. Die Aufbaurrate der hohen Qualitätsstufe beträgt 16mm³/s, die niedrigste hingegen 40mm³/s und ist damit 2,5 so hoch. Wobei lediglich rund 10% der Steifigkeit (E-Modul) und rund 20% der Streckgrenze eingebüßt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Qualitätsstufe (relative Dichte)	E-Modul [GPa]	Streckgrenze [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	Aufbaurrate [mm ³ /s]
≥99,5%	70,14	239,8	410,8	4,26	16
≥97%	68,66	193,2	294,8	2,04	32
≥90%	63,24	193	247,4	1,14	40

Tabelle 2: Ergebnisse Zugversuch IWT AISi10Mg

Größere Abweichungen sind bei der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung zu beobachten. Solange die Bauteile aber nur im elastischen Bereich genutzt werden stellt dies keine Einschränkung dar. Es stellt sich aber die Frage wie sich das Material bezüglich Lebensdauer bei Wechselbeanspruchungen verhält. Daher führt der Partner IWT Lebensdauertests durch, um die Wöhlerlinien der verschiedenen Materialklassen zu bestimmen. Mit diesen Ergebnissen können dann Lebensdauerberechnungen der optimierten Geometrien durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Bauteile auch bestimmten Anzahlen an Lastzyklen überleben.

Da die Berechnungsergebnisse des letzten Berichtszeitraums auf vorläufigen Materialdaten beruhten wurden die Berechnungen nochmal mit den Testergebnissen aus Tabelle 2 durchgeführt. Die Randbedingungen haben sich nicht geändert, es wurde eine Last von 2500N auf das Pedal simuliert ohne weitere Sicherheitsfaktoren. Alle Elemente – ausgenommen in den Lasteinleitungs- und Lagerungsbereichen – weisen eine Spannung niedriger als 190MPa auf und werden somit der niedrigsten Materialklasse zugewiesen, wie es in Abbildung 8 zu erkennen ist.

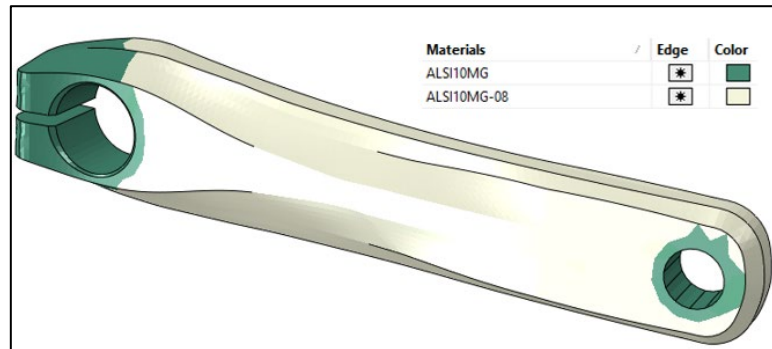


Abbildung 8: Ergebnisse Fahrradkurbel mit getesteten Materialdaten

Die Druckzeit, abgeschätzt an den in Tabelle 2 gelisteten Aufbauraten, verringert sich dadurch um ca. 48%.

Zum Vergleich wurde noch eine klassische Topologieoptimierung am Use Case Fahrradkurbel durchgeführt. Für die Optimierung wird zunächst nur das Material mit der Qualitätsstufe hoch in Betracht gezogen. Um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus der Optimierung unter der Berücksichtigung von verschiedenen Materialklassen zu gewährleisten, wurde als Zielsetzung selbe Verformung unter selber Last, also selbe Steifigkeit gewählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt. Wie zu erkennen ist, wurde Material an der Spitze und im niedrigbelasteten inneren Bereich entfernt.

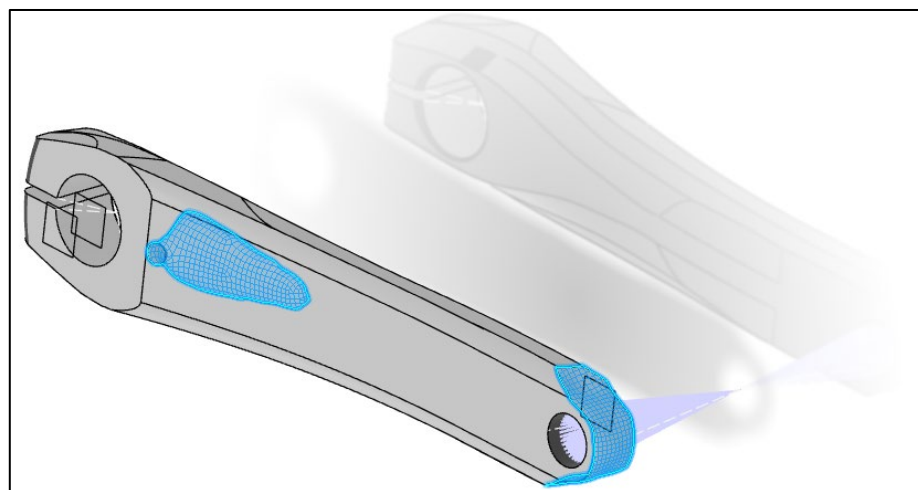


Abbildung 9: Klassische Topologieoptimierung Materialklasse hoch

Die Gewichtersparnis beträgt bei der Topologieoptimierung 22%. Damit ist die Ersparnis der Belichtungszeit deutlich unter der Variante Schnelldruck (Optimiert innerhalb der entwickelten Prozessschleife unter Berücksichtigung verschiedener Materialklassen). In Abbildung 10 ist die Verformung der beiden Varianten dargestellt. Diese beträgt jeweils 1.23mm.

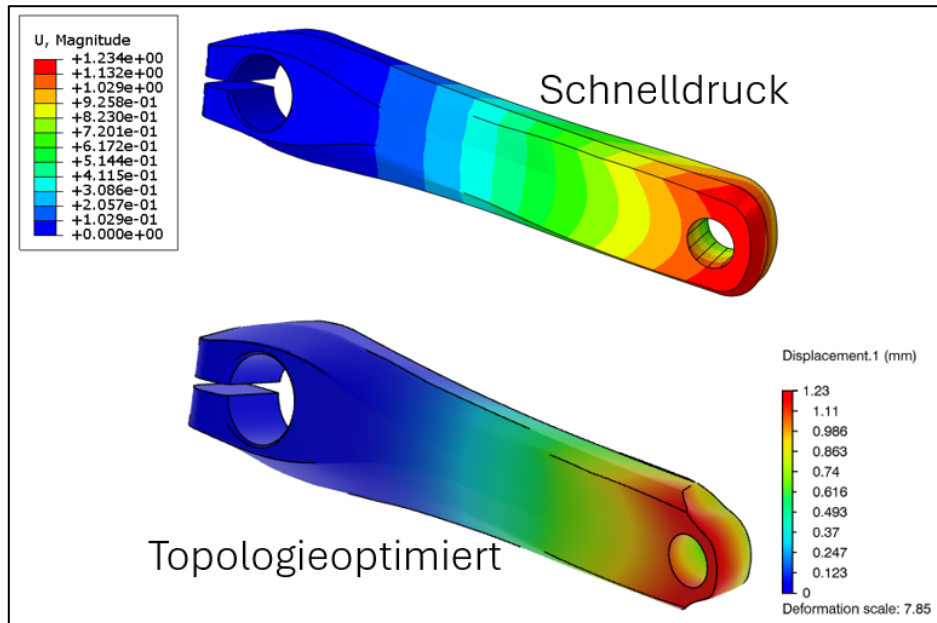


Abbildung 10: Vergleich Verformung von Varianten Schnelldruck und Topologieoptimiert

Auch die Spannungen verhalten sich bei beiden Varianten ähnlich, wie es in Abbildung 11 zu erkennen ist.

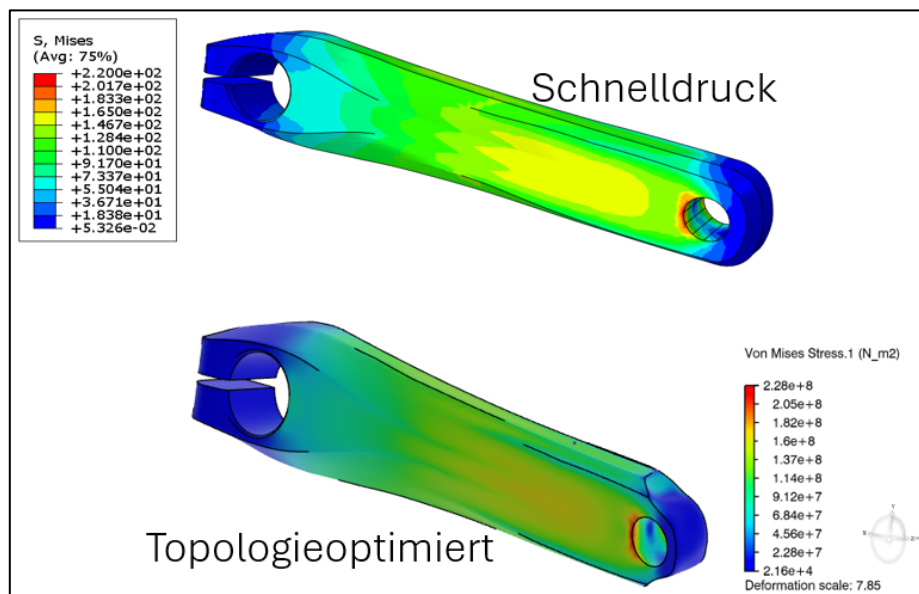


Abbildung 11: Vergleich Spannungen von Varianten Schnelldruck und Topologieoptimiert

Dies könnte jedoch für die Variante Schnelldruck zum Problem werden, da zu erwarten ist, dass die Lebensdauerwerte für das poröse Material schlechter sind.

Desweiteren wurde ein weiterer Use Case verwendet, um das Berechnungstool zu testen. Es handelt sich hierbei um das mittlere Scharnier einer Bremsklappe (Spoiler) eines Kategorie CS25 Flugzeuges. Dieses Bauteil unterliegt verschiedenen Lastfällen, wovon zwei besonders kritische für die Materialzuweisung ausgewählt wurden.

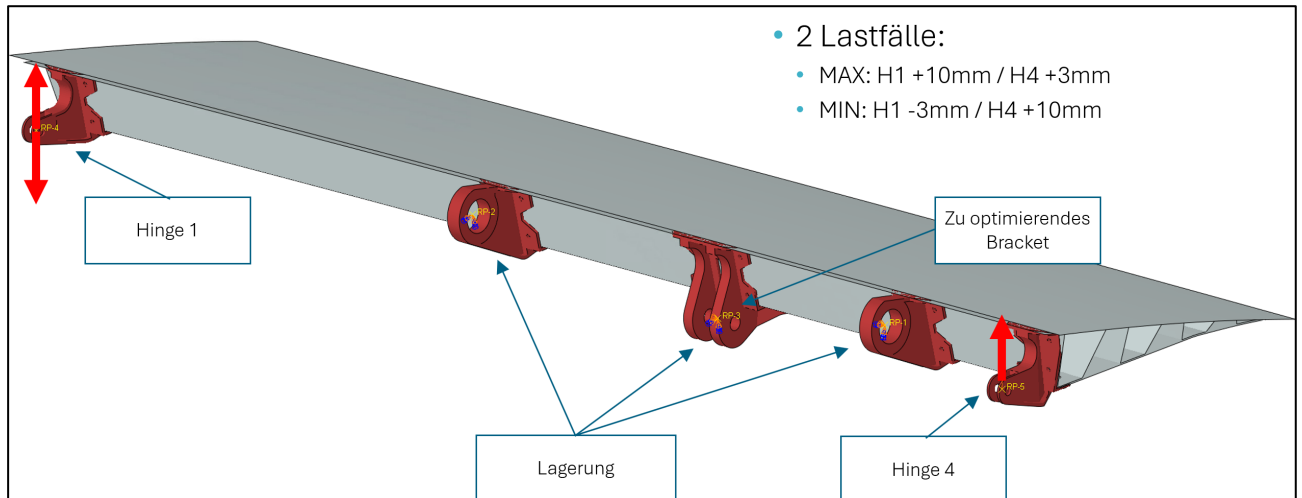


Abbildung 12: Lastfälle Use Case Spoiler Bracket

Zusätzlich zu den aerodynamischen Drucklasten auf die Paneloberfläche wirken Kräfte auf die äußeren Scharniere (Hinge 1 und 4 in Abbildung 12). Diese Kräfte ergeben sich aus der Verschiebung an den äußeren Scharnieren bedingt durch die Flügelbiegung. Da sie in unterschiedliche Richtungen wirken ergeben sich auch maximale Spannungszustände in verschiedenen Bauteilregionen, je nach Lastfall. In Abbildung 13 sind die Spannungen des Nominalbauteils für die Lastfälle MAX und MIN Flügelbiegung abgebildet.

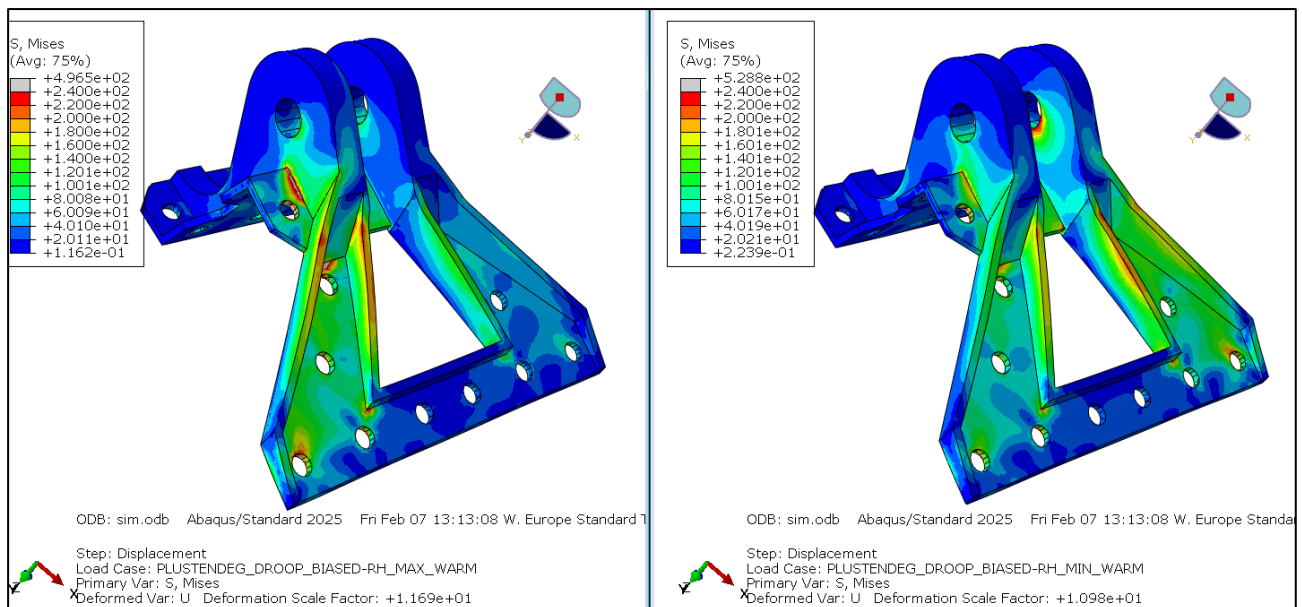


Abbildung 13: Von-Mises Spannungen Lastfall MAX (links) und MIN (rechts)

Es ist zu erkennen, dass bei dem MAX Lastfall die Spannungen am inneren Steg links hoch sind und bei dem MIN Lastfall die Spannungen am inneren Steg rechts. Beide Zustände werden automatisch durch das entwickelte Script erkannt und das Material dementsprechend zugewiesen, wie es in Abbildung 14 zu erkennen ist.

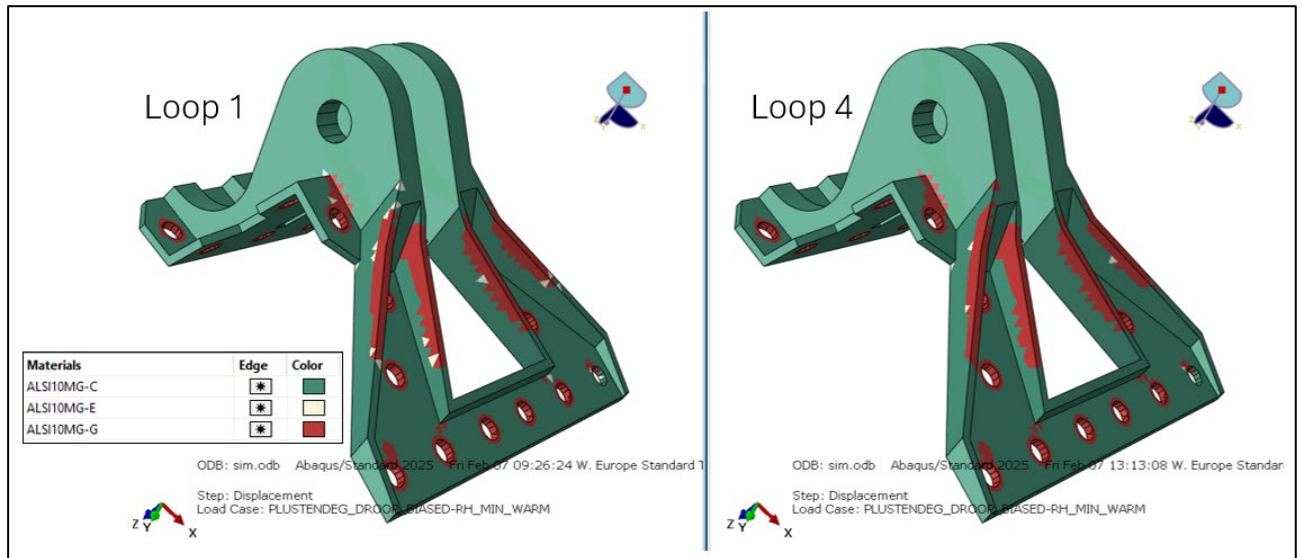


Abbildung 14: Materialzuweisungen Use Case Spoiler Bracket

Aufgrund der Übernahme von PRIME und den damit verbundenen organisatorischen Einschränkungen konnte das Vorhaben nicht vollständig abgeschlossen werden; offene Aufgaben sind transparent dokumentiert.

2.2 Nachweise und Abweichungen

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zum Fördermittelverbrauch (Personal, Sachkosten) wurden eingehalten. Im Jahr 2023 kam es zu personellen Engpässen, weshalb die veranschlagten Stunden und Kosten nicht voll ausgeschöpft wurden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die erbrachten Leistungen sind für die Fortentwicklung automatisierter Leichtbaulösungen und eine innovative Kombination aus Optimierung und Prozessführung wichtig und angemessen.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Der Nutzen des Projekts beschreibt die Möglichkeit, Fertigungszeiten und Materialeinsatz durch softwaregestützte Optimierungsverfahren signifikant zu reduzieren. Die Ergebnisse bieten mittelfristigen Transfer in industrielle Anwendungen und weitere Forschungsprojekte.

2.5 Fortschritt und offene Punkte

Trotz erwiesener Machbarkeit und ersten erfolgreichen Tests sind durch das Ausscheiden von PRIME/TECHNIA folgende Aufgaben offen:

- Debugging und Pflege des Automatisierungsscripts für den *Process Composer*
- Lebensdauerests (Fatigue) der optimierten Bauteile
- Integration und Kombination von Topologieoptimierung mit der belastungsabhängigen Materialzuweisung

TECHNIA (im Unterauftrag) und IWT sind mit der Fertigstellung dieser Arbeitspakete beauftragt. Ein Aufstockungsantrag durch den Projektpartner wurde gestellt.

2.6 Publikationen

Gezielte wissenschaftliche Veröffentlichungen durch den Industriepartner TECHNIA sind nach Abschluss der ausstehenden Prüfungen nicht vorgesehen.

3 Erfolgskontrollbericht und Ausblick

Der Erfolgskontrollbericht wird als Anlage beigefügt.

Die noch nicht veröffentlichten Teilprojekte, Lebensdauerstudien und Debugging-Maßnahmen werden fortlaufend nachberichtet und im Rahmen einer Aufstockung transparent nachgereicht.

4 Zusammenfassung und Stellungnahme

Das Projekt APFeL wurde bis zur Übernahme von PRIME durch TECHNIA erfolgreich vorangebracht, konnte jedoch wegen des Ausscheidens von PRIME als KMU und der fehlenden Betriebsstätte des Rechtsnachfolgers nicht vollständig abgeschlossen werden. Noch offene Aufgaben werden unter Einbeziehung von TECHNIA als Unterauftragnehmer und dem IWT zur Fertigstellung geführt. Die technischen Ziele und wissenschaftlichen Erkenntnisse tragen wesentlich zur Innovationskompetenz des geförderten Sektors bei, der Nutzen für künftige Anwendungen und Forschungsprojekte ist hoch einzuschätzen.