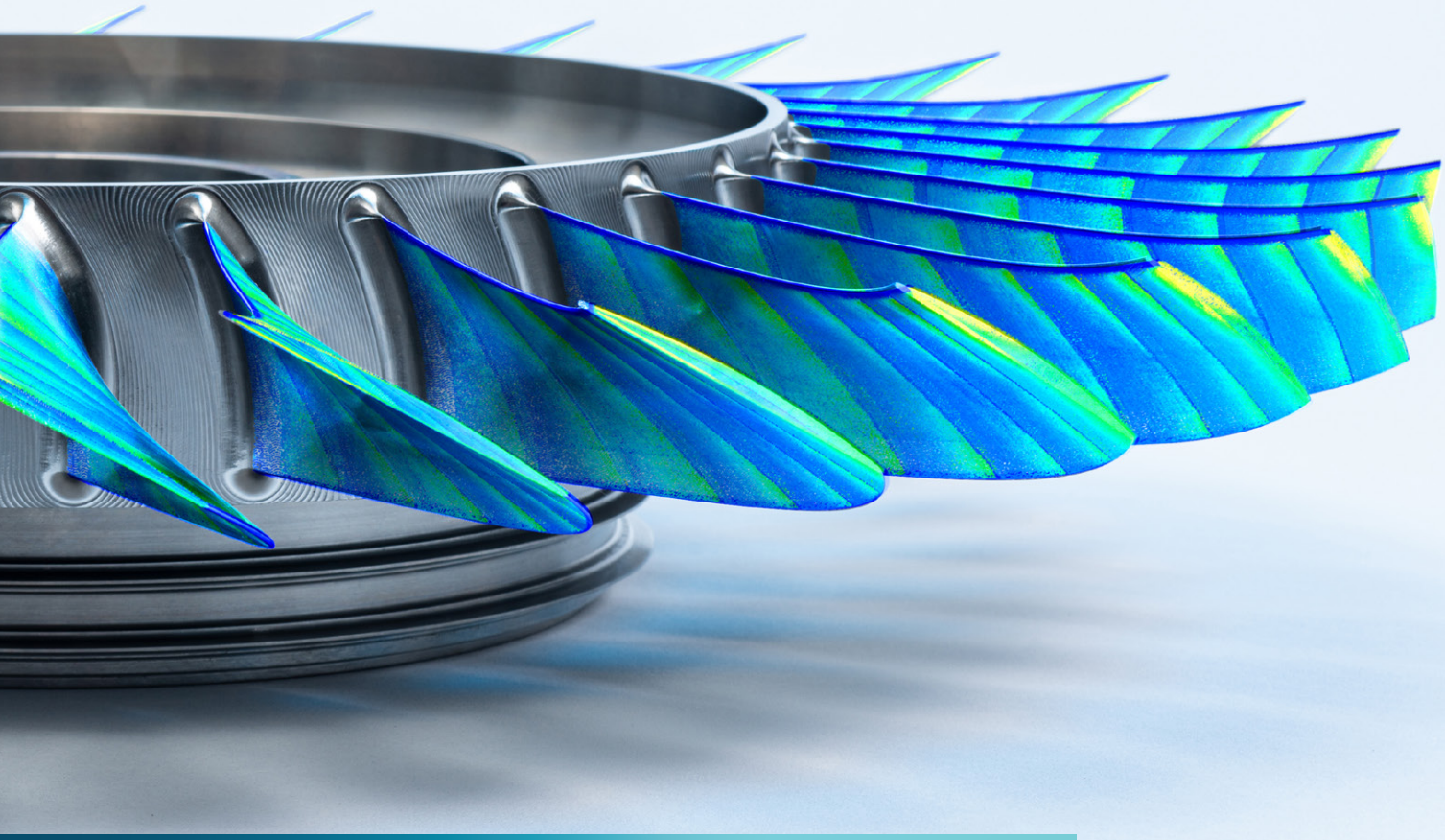
Fraunhofer IPT



Whitepaper

Resilienz in der Luftfahrt

Resilienz in der Luftfahrt

Whitepaper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT erarbeitet Systemlösungen für die vernetzte, adaptive Produktion nachhaltiger und ressourcenschonender Produkte sowie der zugehörigen Dienstleistungen. Die Schwerpunkte liegen in den Bereichen Prozesstechnologie, Produktionsmaschinen, Produktionsqualität und Messtechnik sowie Technologiemanagement und reichen von den Grundlagen bis zur digitalen Transformation der Produktion. Im Forschungsumfeld der Luftfahrtindustrie hat das Fraunhofer IPT in den vergangenen Jahrzehnten ein umfassendes Branchenwissen durch zahlreiche Industrie- und Forschungsprojekte aufgebaut.

In Zusammenarbeit mit:

SENSEERING®
DECIDE BETTER. NOW!

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Spotlight 4

Executive Summary 6

Einleitung 8
Der Status quo in der Luftfahrt 9
Was bedeutet Resilienz? 9
Resilienz in der Luftfahrt 10
Verschiedene Dimensionen der Resilienz 10
Die drei Ebenen des Resilienzmanagements 11
Die vier Dimensionen zur Betrachtung der Resilienz in der Luftfahrt 11

Dimension Technologie 12
Emissionsfreie Triebwerke verlangen nach neuen Antriebskonzepten 12
Komponenten der Triebwerke aus neuen Werkstoffen 14
Prozesskette und Fertigungstechnologien 14

Dimension Digitalisierung 16
Was ist der digitale Zwilling? 16
Digital Framework für die digitalisierte Fertigung 17
Fertigungsprozesse: Beispiel für daten- und modellgestützte Beschreibung der Produktgeometrie 18

Dimension Nachhaltigkeit 20
Bedeutung von Nachhaltigkeit in der Produktion 20
Bewusstsein für Nachhaltigkeit in Unternehmen 21
Wertschöpfungskettenübergreifende Nachhaltigkeitsbewertung auf Komponentenebene 23

Dimension Personal 26
Qualifikation des Personals 27
Wissensmanagement 27
Unternehmenskultur 27

Referenzen 28

Autoren 31

Experten 31

Spotlight

Wir nutzen die Krise als Chance. Das grüne Fliegen ist die Zukunft, und sie hat bereits begonnen.«

Dr. Michael Schöllhorn
BDLI-Präsident
[BUND22, S.2]

Um **64,5 %**
gingen die weltweit geflogenen Passagierkilometer im Jahr 2020 zurück.

Um **75 %**
sollen die CO_2-Emissionen in der Luftfahrt bis 2050 reduziert werden.

137 Mrd. €
beträgt der Umsatzrückgang der Luftfahrtbranche im Jahr 2020.

Bis zu **25 %**
beträgt der durchschnittliche Wertanteil eines Triebwerks am gesamten Flugzeug.

Bis zu **68 %**
der Triebwerkskomponenten werden aus Nickellegierungen bestehen.

Executive Summary

Um die Ziele in der Luftfahrt hinsichtlich Ressourceneffizienz und Emissionen zu erreichen, sind sowohl evolutionär als auch revolutionär neue Antriebskonzepte auf Wasserstoffbasis erforderlich.

Die Unternehmen sind gefordert, mittels ganzheitlicher Digitalisierung in hoher Geschwindigkeit neue Technologien einzuführen und den gesamten Lebenszyklus der Komponenten zu betrachten.«

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA
Mitglied des Direktoriums
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Die Coronapandemie hat der globalen Wirtschaft die große Schwäche der internationalen Abhängigkeiten aufgezeigt. Die Luftfahrtindustrie war in besonderem Maß betroffen, da einerseits notwendige Ressourcen für die Produktion fehlten und anderseits die Nachfrage signifikant zurückging. Aber auch langfristig steht der Luftfahrtbranche ein Umbruch bevor: Die in »Flightpath 2050« formulierten Nachhaltigkeits- und Effizienzziele erfordern neue disruptive Antriebskonzepte und Flugzeugdesigns. Die Bedeutung des Antriebs, der heute bereits einen Wertanteil von bis zu 25 Prozent am gesamten Flugzeug hat, wird weiter zunehmen. Die kurzfristigen Nachfrageschwankungen und die langfristig notwendigen Änderungen im Kontext der Nachhaltigkeit führen dazu, dass die Resilienz für die Luftfahrt ein wichtiges Thema ist.

Was ist Resilienz?

Der Begriff der Resilienz beschreibt den Umgang mit Störungen: Eine Störung kann allerdings auch als Chance gesehen werden, Prozesse und Produkte an veränderliche Marktbedingen anzupassen und zu optimieren.

Technologie

- Evolutionäre Weiterentwicklung existierender Antriebe
- Entwicklung disruptiver Antriebskonzepte
- Einsatz neuer Werkstoffe und Fertigungsverfahren

Für die Triebwerke der Zukunft bedeutet dies nicht nur den Einsatz von Sustainable Aviation Fuels (SAFs) und eine evolutionäre Weiterentwicklung der bisherigen Triebwerke, sondern auch, dass gänzlich neue Konzepte für wasserstoffbasierte Antriebe entwickelt werden müssen. Abhängig von der gewünschten Reichweite und Passagierkapazität kommen entweder eine direkte Verbrennung oder der Einsatz von Brennstoffzellen als Energiewandler in Frage. Weitere technologische Trends sind die Verwendung von Komponenten aus warmfesteren und leichteren Werkstoffen. Beispiele dafür sind Ceramic Matrix Composites (CMC) sowie faserverstärkte Kunststoffe (z.B. CFK) mit einem geringeren spezifischen Gewicht. Ziel des Werkstoffeinsatzes ist es, bei Komponenten gezielt Material zur Gewichtsreduktion einzusparen und so die Effizienz der Triebwerke zu steigern. Diese Trends in der Produktionstechnik von Luftfahrtkomponenten stellen die Unternehmen vor die Herausforderung, aus neuen Werkstoffen neue Komponentendesigns herzustellen, die äußerst geringen Fertigungstoleranzen unterliegen. Alternative Technologien zur Fertigung von Luftfahrtkomponenten werden bereits heute eingesetzt und sind zukünftig erforderlich, um die hohen Anforderungen zu erfüllen. Das führt dazu, dass die Komplexität im Kontext der Fertigung hinsichtlich der Prozesskettengestaltung enorm zunehmen wird.

Digitalisierung

- Domänenübergreifender digitaler Zwilling
- Framework für digitalisierte Wertschöpfungsketten

Digitale Zwillinge von Bauteilen, Maschinen und der gesamten, darüber hinausgehenden Fertigungsumgebung können dabei helfen, die wachsenden technologischen, ökonomischen und ökologischen Anforderungen zu bewältigen. Damit dies gelingt, ist es zunächst erforderlich, eine anforderungsgerechte IT-Infrastruktur im Unternehmen zu etablieren. Diese schafft nicht nur die Grundlage für eine umfangreiche Datenaufnahme über mehrere Fertigungsverfahren und Unternehmensbereiche hinweg, sondern gewährleistet auch eine ganzheitliche Datenspeicherung und -nutzung. Dieses Whitepaper illustriert anhand eines praxisnahen Beispiels aus der Fertigung sicherheitskritischer und hochkomplexer Luftfahrtkomponenten, welche Potenziale eine daten- und modellbasierte Geometriebeschreibung von Luftfahrtkomponenten bergen kann.

Nachhaltigkeit

- Nachhaltigkeit als Treiber neuer Innovationen
- Objektive, transparente, valide Nachhaltigkeitsbewertung

Nicht nur die Ziele von »Flightpath 2050« und des Pariser Klimaabkommens, sondern auch Forderungen von Kunden, Politik und Gesellschaft führen dazu, dass der Nachhaltigkeit von Produkten stärkeres Gewicht beigemessen wird. Für Unternehmen ergeben sich daraus wichtige strategische Fragen: Was wird zukünftig gefertigt? Wo wird zukünftig gefertigt? Wie wird zukünftig gefertigt? Die Bewertung der Nachhaltigkeit rückt deshalb neben technologischen Fragen nach disruptiven Antriebskonzepten und Komponenten in den Mittelpunkt der Überlegungen. Life-Cycle Assessments gewinnen an Bedeutung für die zukünftige Produkt- und Prozessauslegung. Im »magischen Dreieck« zwischen Produktivität, Qualität und Kosten müssen Unternehmen zukünftig die Nachhaltigkeit als zusätzliches Bewertungskriterium berücksichtigen, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

Personal

- Schaffen von Bewusstsein für Nachhaltigkeit
- Befähigung des Personals für resiliente Unternehmensprozesse

Die Menschen sind ein wichtiger Faktor für ein resilientes Unternehmen: Die Unternehmenskultur muss das Bewusstsein schaffen, die ambitionierten Nachhaltigkeitsziele zu erfüllen. Ein zentrales Wissensmanagement unterstützt den richtigen Umgang mit kurzfristigen Störungen und ist damit ein zentrales Werkzeug für die maximale Flexibilität des Produktportfolios. Die Umsetzung jedoch gelingt schließlich nur mit bestens ausgebildeten und qualifizierten Mitarbeitenden.

Einleitung

Die Grundlage für dieses Whitepaper zur Resilienz in der Luftfahrt bildet das Forschungsprojekt »Spaicer – Skalierbare adapive Produktionssysteme durch KI-basierte Resilienzoptimierung«, das in Zusammenarbeit zwischen der seenseering GmbH und dem Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Innovationswettbewerbs »Künstliche Intelligenz als Treiber für volkswirtschaftliche relevante Ökosysteme« gefördert wurde.

Forschungsaufgabe des Projekts »Spaicer« war die Entwicklung von Softwaretools, die auf der Grundlage von Datenmodellen und Künstlicher Intelligenz Störungen der Produktion vorhersagen, Prozesse und Produkte optimieren und auf diese Weise die Resilienz des Unternehmens fördern können [TRAU22]. Dazu stützt sich die vorliegende Studie auf das Branchenwissen der Luftfahrtexperten am Fraunhofer IPT, das durch zahlreiche Industrie- und Forschungsprojekte sowie verschiedenen Expertengesprächen und Konferenzen über mehrere Jahrzehnte aufgebaut wurde. Hervorzuheben ist hier das ICTM Aachen – International Center for Turbomachinery Manufacturing, in dem jährlich mehrere Konsortialprojekte zu aktuellen Themen der Fertigung von Luftfahrtkomponenten durchgeführt werden. Zudem fungiert die zweijährlich stattfindende ICTM Conference mit Beteiligung von Entscheidungsträgern aus Industrie und Forschung als Impulsgeber für die Luftfahrtbranche, indem umfassende Einblicke in die Herausforderungen und Lösungsansätze gegeben werden.

Zunächst erfolgt ein detaillierter Einblick in den Status quo der Luftfahrt. Anschließend wird das Resilienzmanagement erläutert und ein Zielbild für die Luftfahrt definiert, in dem verschiedene Dimensionen der Resilienz eingeführt werden. Die Beschreibung von Handlungsfeldern in den Dimensionen Technologie, Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Mitarbeitende bildet schließlich den inhaltlichen Kern des Whitepapers.

Der Status quo in der Luftfahrt

Der Klimawandel und die Energiewende prägen die zukünftige Produktion für die Luftfahrt in besonderem Maße: Erlebte die Branche seit Beginn der zivilen Luftfahrt jahrzehntelang ein stetiges Wachstum mit deutlich steigenden weltweit zurückgelegten Passagierkilometern, musste sie seit Beginn der Coronapandemie durch globale Einreisebeschränkungen einen starken Einbruch verzeichnen [GLOB21]. So sind die weltweiten Flugpassagierkilometer im Jahr 2020 im Vergleich zum Vorjahr um 64,5 Prozent reduziert [WALS21]. Dies geht einher mit einem Umsatzrückgang der Luftfahrtbranche in Höhe von 137 Milliarden Euro [WALS21]. Umwelt- und Klimaschutz, schon vor der Coronapandemie in »Flighpath 2050« wichtige Ziele, rückten nun nochmals deutlich stärker in den strategischen Fokus der Luftfahrtunternehmen und ihrer Zulieferer. Für ein wettbewerbsfähiges und resilientes Unternehmen ist es deshalb unerlässlich, auch nach der Krise auf die folgenden Ziele aus »Flightpath 2050« hinzuarbeiten [EURO11]:

- CO_2 Reduktion um 75 Prozent
- NO_x Reduktion um 90 Prozent
- Reduktion von Geräuschemissionen um 65 Prozent

Veranlasst durch die politischen Diskussionen um Alternativen zu Kurzstreckenflügen und die Vorgaben, sowohl während des Flugs als auch während der gesamten Produktion der Flugzeugkomponenten weniger Emissionen auszustoßen, sind hier radikal neue Ansätze gefragt. Dies gilt besonders für zukünftige Antriebskonzepte, die einen Beitrag gegen den Klimawandel leisten sollen. So kündigten die beiden großen Hersteller Airbus und Boeing bereits an, die Fertigung vierstrahliger Flugzeuge wie dem Airbus A380 und der Boeing 747 bis Ende 2022 einzustellen [HANK19]. Vielmehr sollen zukünftig evolutionäre Entwicklungen für zweistrahlige Flugzeuge, aber auch revolutionäre Ansätze wie die Nutzung von Flüssigwasserstoff als Treibstoff und der Antrieb mittels Brennstoffzellen forciert werden. Diese Maßnahmen kennzeichnen einen deutlichen Umbruch in der Branche, durch den emissionsfreies Fliegen in der Zukunft möglich werden kann.

Was bedeutet Resilienz?

Ursprünglich aus der Psychologie stammend bedeutet der Begriff der Resilienz Widerstandsfähigkeit. Er beschreibt die Fähigkeit eines Menschen, außergewöhnliche Belastungen unbeschadet bewältigen zu können [THUN20]. Dazu greift der Mensch bei einer Krise auf erlernte Schutzmechanismen zurück. Durch die erworbenen persönlichen und sozialen Ressourcen kann der Mensch gesund, adaptiv und/oder integrativ reagieren. Die Krise wird nicht als reine Störung gesehen, sondern als Möglichkeit zur Verbesserung. Die Fähigkeit der Resilienz ist nicht ausschließlich abhängig von äußeren Einflüssen oder angeboren, sondern erlernbar. Dies ist auch der Grund, weshalb der Begriff der Resilienz in verschiedenen fachlichen Kontexten verwendet wird [BOOS21]. Im Umfeld der Produktion bedeutet der Begriff der Resilienz die Rückkehr zum Ausgangszustand oder das Erreichen eines im Vergleich zum Ursprungszustand wünschenswerten Zustands. Dementsprechend ist das Auftreten einer Störung ursächlich für die Resilienz.

Werden die in der Literatur vorhandenen Definitionen der Resilienz auf die Produktionstechnik übertragen, sind vier Eigenschaften von besonderer Bedeutung:

Robustheit
Robuste Produktionssysteme erzielen unter wechselnden Umgebungsbedingungen die beabsichtigte Funktionalität.

Agilität
Agile Systeme weisen die Eigenschaft auf, sich an geänderte Betriebsbedingungen anzupassen und schnell auf Bedarfsschwankungen zu reagieren.

Adaptivität
Ist eine Anpassung des Produktionssystems an die neuen Umgebungsbedingungen erforderlich, ist die Adaptivität des Systems von Bedeutung. Diese ermöglicht beispielsweise eine schnelle Anpassung an eine veränderte Produktgeometrie, sodass neue Kundenanforderungen umgesetzt werden können.

Integrativität
Eine integrative Produktion kombiniert Forschungs- und Lösungsansätze aus verschiedenen Disziplinen und führt zu einem ganzheitlichen Ansatz. So können möglichst viele Aspekte zusammenhängend betrachtet werden.

Resilienz in der Luftfahrt

Das Auftreten einer Störung ist ursächlich für die Resilienz. Auch in der Luftfahrt zeigt sich am Beispiel der Coronapandemie, dass kurzfristige Störungen – hier in Form des starken Rückgangs an Passagierzahlen – die gesamte Branche beeinflussen können. Zusätzlich sollen die vereinbarten Ziele der Vision »Flightpath 2050«, das Pariser Klimaabkommen 2015, der »Green New Deal« 2019 und der Europäische Klimapakt 2020 mittel- und langfristig zu einer nachhaltigeren Luftfahrt führen, indem evolutionäre und revolutionär neue Antriebskonzepte und Flugzeugdesigns entwickelt werden. Obwohl sie lediglich für circa 2,5 Prozent der globalen, menschengemachten CO_2-Emissionen verantwortlich ist [DEUT20] arbeitet die Luftfahrt mit hoher Priorität an nachhaltigen Antriebskonzepten.

Diese reichen von klassischen Bypass-Triebwerken, dem Getriebefankonzept, Ultra-high-Bypass-Triebwerken wie dem Rolls-Royce XWB Triebwerk oder Open-Rotor-Konzepten über die Kombination evolutionärer und revolutionärer Konzepte wie dem Water-Enhanced Turbofan (WET-Engine) der MTU Aero Engines AG [DILB21] bis hin zu revolutionären Triebwerkskonzepten durch die direkte Verbrennung von Wasserstoff oder der fliegenden Brennstoffzelle. Im Vergleich zu aktuellen Triebwerken sind dafür gänzlich neue Antriebseinheiten und -komponenten zu entwickeln, zu produzieren und für den Einsatz in der Luftfahrt zu zertifizieren.

Um die Anforderungen für diese neuen Technologien zu erfüllen, müssen OEMs und Zulieferer gemeinsam neue Lösungswege erarbeiten und Ihre Produktion neu aufstellen. Doch dafür sind auch neue Kompetenzen gefragt: OEMs, Zulieferer und Forschungseinrichtungen sind gleichermaßen gefordert, gemeinschaftlich und integrativ Forschungs- und Entwicklungsprojekte durchzuführen. Laut Reiner Winkler, ehemaliges Präsidiumsmitglied des Bundesverbands der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie, ist die Zusammenarbeit mit der Wissenschaft hier unerlässlich: »Deutschland verfügt über ein starkes Forschungsnetz mit ausgezeichneten Einrichtungen, die gemeinsam mit der Industrie die technologischen Grundlagen des klimaneutralen Fliegens schaffen werden.« [DEUT20, S. 3]

Für viele Unternehmen der Branche bieten sich durch die neuen Nachhaltigkeitsziele auch Chancen, ihr Produktportfolio zu erweitern und neue Märkte zu erschließen. Die Anpassungsfähigkeit durch Entwicklung neuer Produkte gilt in gleicher Weise für andere Unternehmensbereiche, vor allem jedoch für die Produktion. Nicht nur im Kontext der Flightpath-2050-Ziele, sondern auch durch die Forderungen von Kunden und Politik bedingt, rückt eine nachhaltige Fertigung stärker in den Fokus der Unternehmen. Für die Unternehmen gilt es nun strategische Fragen zu formulieren und zu beantworten: Was wird zukünftig gefertigt? Wo wird zukünftig gefertigt? Wie wird zukünftig gefertigt? Die Antworten auf diese Fragen sind keineswegs trivial und fordern vor allem in der Übergangszeit von den Unternehmen Robustheit und Agilität, um auf Bedarfsschwankungen angemessen reagieren zu können.

Verschiedene Dimensionen der Resilienz

Das Ziel eines Resilienzmanagements ist es, Entscheidungsträger und Mitarbeitende dabei zu unterstützen, Störungen bestmöglich zu erkennen und zu behandeln [HAME03]. Jede Störung kann als Chance betrachtet werden, ein Produktionssystem optimal an veränderte Marktbedingungen anzupassen, beispielsweise an den augenblicklich erwarteten Umbruch in der Luftfahrt. Aufgabe ist es daher, das Unternehmen, auf Grundlage der oben beschriebenen Ziele auf die Fertigung neuer Antriebskonzepte auszurichten, um Wettbewerbsvorteile daraus zu ziehen.

Die drei Ebenen des Resilienzmanagements

- **Makro-Ebene – Gesamte Lieferkette und ganzheitliche Produktionsökosystem:** OEMs und Zulieferer sind durch Störungen, beispielsweise in Gestalt von Änderungen politischer Rahmenbedingungen oder einer Pandemie, gleichermaßen betroffen.
- **Meso-Ebene – Produktionsstätte und die eigene Wertschöpfung:** Qualitätsmängel bei Werkstofflieferungen oder nicht funktionsfähige Betriebsmittel können etwa zu einer gestörten Produktion führen. Mangelnde Kommunikation, sowohl auf menschlicher, aber auch auf Maschinen- und Anlagenebene, kann dazu führen, dass Produktionsprozesse nicht ausreichend angepasst werden und in der Folge die hergestellten Komponenten nicht dem Anforderungsprofil entsprechen.
- **Mikro-Ebene – Shopfloor und konkrete Produktionsumgebung:** Ein Resilienzmanagement im Unternehmen, das diese Ebene fokussiert, verbessert die Zuverlässigkeit kritischer Prozessschritte gegenüber unerwarteten Prozessstörungen. Der Schwerpunkt liegt hier auf den operativen Tätigkeiten innerhalb eines einzelnen Prozessschrittes.

Die vier Dimensionen zur Betrachtung der Resilienz in der Luftfahrt

Technologie

Die Dimension der Technologie beschreibt auf Makro-Ebene zunächst das Triebwerk eines Luftfahrtantriebs. Aufgrund der hohen Komplexität des Triebwerks ist zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit ein Zusammenspiel zahlreicher verschiedener Komponenten erforderlich (Meso-Ebene). Schließlich sind aufgrund des hohen Anforderungsprofils von Luftfahrtkomponenten leistungsfähige Fertigungstechnologien erforderlich.

Digitalisierung

Die Digitalisierung ist ein Querschnittsthema, das auf der Makro-Ebene eine allgemeine Definition des digitalen Zwillings und seiner Anwendung umfasst. Wie sich die Daten, die im Fertigungsprozess aufgezeichnet werden, in einer leistungsfähigen IT-Infrastruktur analysieren und verwerten lassen, ist Bestandteil der Meso-Ebene. Inhalt der Mikro-Ebene ist schließlich die komponentenbezogene Datenakquisition. Am Beispiel der Fertigung einer sicherheitsrelevanten Triebwerkskomponente wird gezeigt, wie die daten- und modellgestützte Beschreibung der Produktgeometrie für einen Fräsprozess aussehen kann.

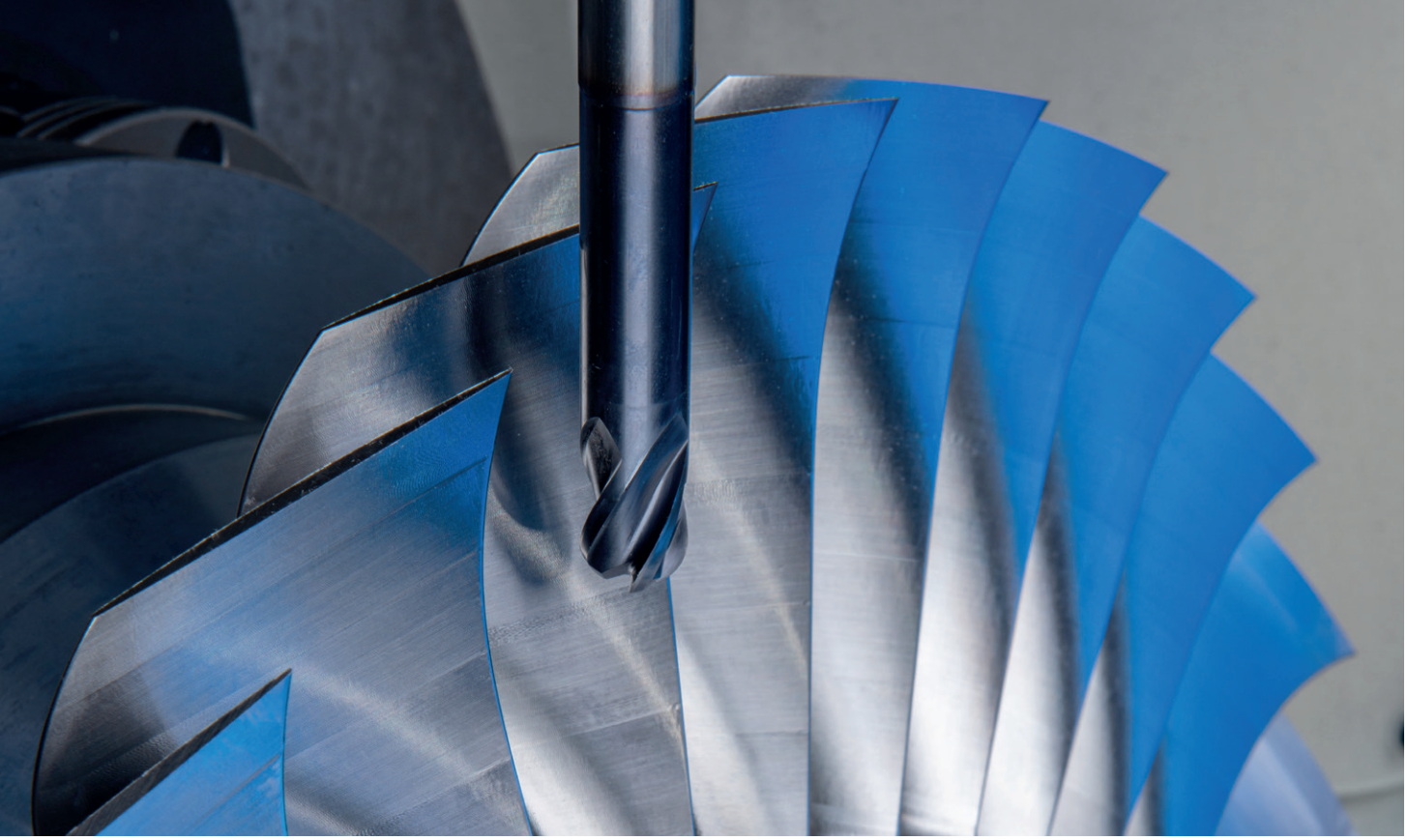
Nachhaltigkeit

Die Dimension der Nachhaltigkeit erstreckt sich von der allgemeinen, gesellschaftlichen Bedeutung bis zur speziellen Bedeutung für die Luftfahrt: Auf der Basis des allgemeinen Verständnisses von Nachhaltigkeit lassen sich ebenso die Auswirkungen auf das einzelne Unternehmen ableiten. Die Grundlage einer nachhaltigen Unternehmensausrichtung ist eine entsprechende Bewertung der Komponenten, die auf der Mikro-Ebene ausführlich beschrieben wird.

Personal

Die Dimension Personal umfasst auf der Makro-Ebene den Einfluss der Unternehmenskultur auf die Resilienz des Unternehmens. Auf der Meso- und Mikro-Ebene stehen die Möglichkeiten des Wissensmanagements und der Qualifizierung des Personals im Kontext der Resilienz.

	Technologie	Digitalisierung	Nachhaltigkeit	Personal
Makro-Ebene	Triebwerk	Digitaler Zwilling	Bedeutung der Nachhaltigkeit	Unternehmenskultur
Meso-Ebene	Komponenten des Triebwerks	Digitale Infrastruktur	Nachhaltigkeit im Unternehmen	Wissensmanagement
Mikro-Ebene	Prozessketten und Fertigungstechnologien	Datenaufnahme und -verwertung	Nachhaltige Bewertung von Komponenten	Mitarbeiterqualifikation



Dimension Technologie

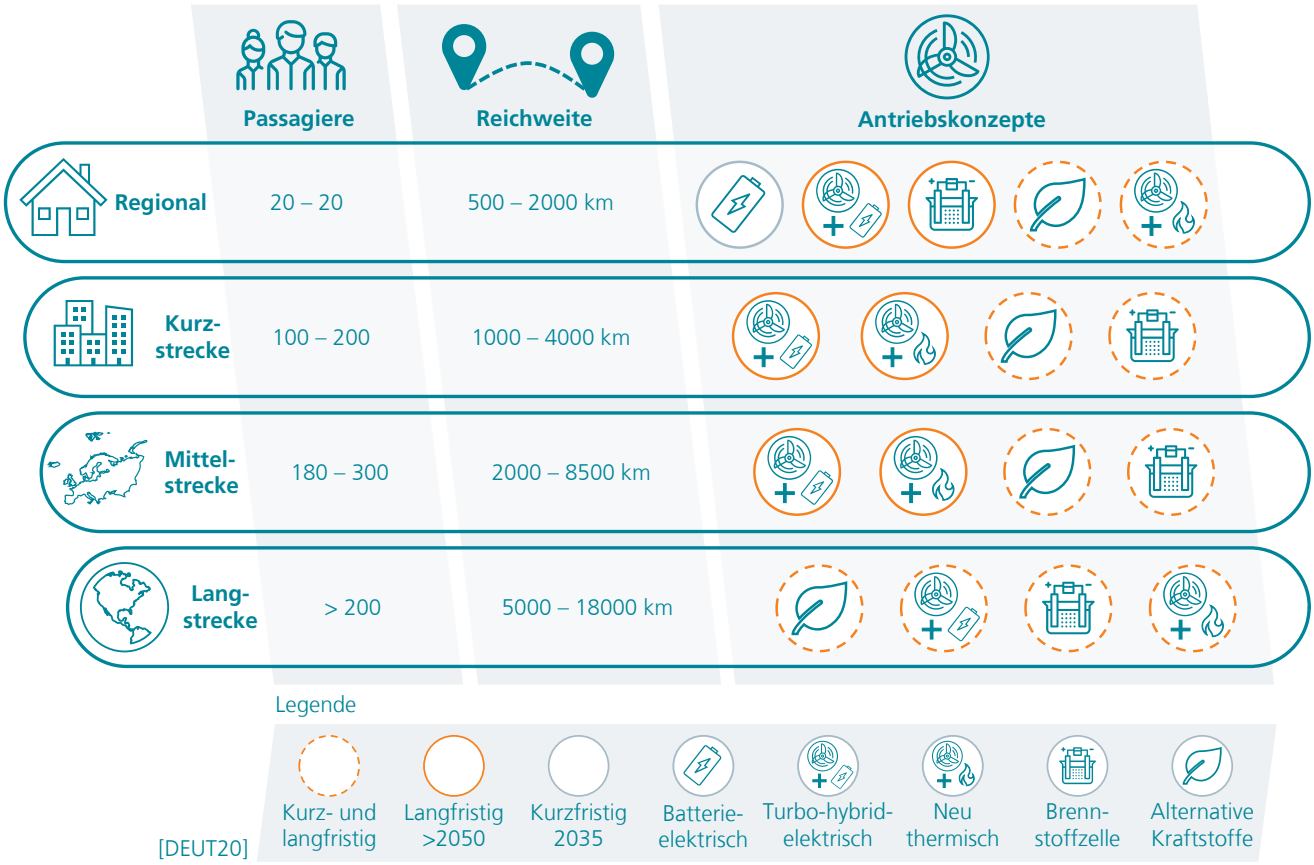
Die bisher auf langfristige Planungshorizonte ausgelegte Luftfahrtbranche muss nun in kürzerer Zeit Lösungen entwickeln, um den politischen und gesellschaftlichen Randbedingungen hinsichtlich der Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Den stärksten Einfluss hat hier der Antrieb, denn er leistet den größten Beitrag zum Emissionsausstoß während des Fluges. Zudem hat der Antrieb unabhängig von der Reichweite einen durchschnittlichen Wertanteil von 16 bis 25 Prozent am gesamten Flugzeug [RAIN22], [KELL16], [AERO18], [CFM19]. Welche aktuellen Entwicklungen gibt es also bei den Triebwerken und wie wirken sich diese auf die einzelnen Triebwerkskomponenten aus?

Emissionsfreie Triebwerke verlangen nach neuen Antriebskonzepten

Der Umbruch hin zu emissionsfreiem Fliegen erfordert neue Antriebskonzepte für die Kurz- und Mittelstrecke sowie neue Lösungen für bestehende Triebwerkskonzepte, um die Effizienz auf der Langstrecke zu steigern und SAFs (engl. Sustainable Aircraft Fuels) großflächig einzusetzen. Hierzu ist allerdings eine Industrialisierung der Herstellung des alternativen Treibstoffs notwendig. Für die Kurz- und Mittelstrecke sollen vor allem flüssiger Wasserstoff als Treibstoff und Brennstoffzellen eingesetzt werden.

Die Verwendung von Flüssigwasserstoff ist bereits in aktuellen Triebwerksgenerationen grundsätzlich technisch möglich, allerdings muss dafür die Brennkammer, unter anderem aufgrund der abweichenden Flammcharakteristik, weiterentwickelt werden [BOHN19]. Zusätzlich zur Anpassung der bestehenden Triebwerke an die Nutzung von Wasserstoff ist es eine weitere wichtige Aufgabe, zu klären, wie der Wasserstoff im Flugzeug mitgeführt und zum Triebwerk geleitet wird. Für die Langstrecke bieten Weiterentwicklungen evolutionärer Antriebskonzepte wie des Getriebe-Fans und der entsprechenden Komponenten effiziente Möglichkeiten Ressourcen einzusparen und Emissionen in Kombination mit SAFs zu reduzieren. Allerdings existieren bisher für weite Flugstrecken über 3500 nautischen Meilen [DILB21] keine Konzepte für den Einsatz von Brennstoffzellen sowie für die Nutzung von Flüssigwasserstoff. Aufgrund der deutlich geringeren volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff gegenüber Kerosin gibt es hier noch keine technisch sinnvollen Lösungen für das Mitführen von Treibstoff auf längeren Strecken.

Die reine Effizienz der Triebwerke kann jedoch durch mehrere Maßnahmen verbessert werden: So können zukünftige Triebwerksgenerationen durch ein höheres Nebenstromverhältnis effizienter betrieben werden. Dafür wird der Kerndurchmesser des Triebwerks verkleinert. Ebenfalls sind Effizienzsteigerungen durch höhere Temperatur- und Druckverhältnisse möglich, ebenso wie durch die gezielte Reduktion des Flugzeug- und Triebwerkgewichts. Durch diese Maßnahmen werden jedoch auch die erforderlichen Komponenten kleiner und filigraner, die einzuhaltenden Toleranzen geringer und die exakten Geometrien der ohnehin schon komplexen Komponenten schwieriger zu bearbeiten. Bei der Entwicklung neuer Komponenten ist stets der gesamte Lebenszyklus zu betrachten und hinsichtlich Qualität und Nachhaltigkeit zu bewerten. So nimmt eine höhere Effizienz im Betrieb entscheidenden Einfluss auf den Produktionszyklus, auf das Design, den Werkstoff und die damit verbundenen Anforderungen sowie auf das Recycling der Komponente.



[DEUT20]

Komponenten der Triebwerke aus neuen Werkstoffen

Bei der Komponentenentwicklung nehmen neue Werkstoffe eine immer wichtigere Rolle ein. Ihre Bandbreite erstreckt sich von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) über evolutionär weiterentwickelte metallische Werkstoffe bis hin zu hochtemperaturfesten Faserverbundkeramiken wie Ceramic Matrix Composites (CMC). Gerade letztere bieten aufgrund ihrer geringen Dichte und hohen Temperaturfestigkeit ein enormes Potenzial zur Verbesserung des Leistungsgewichts und können so zu einer höheren Effizienz des Triebwerks beitragen [STEI19]. Bei Strömungsbauteilen aus Verbundkeramik wie SiC/SiC Ceramic Matrix Composites kann in der Hochdruckturbine Kühlluft eingespart und direkt über den Nebenstrom für den Vortrieb genutzt werden. Außerdem können Komponenten aus beschichteten Metalllegierungen, beispielsweise Nickelbasiswerkstoffe, substituiert werden.

CMC-Werkstoffe verfügen über eine deutlich bessere Hochtemperaturbeständigkeit als beschichtete Nickelbasislegierungen – bei gleichzeitig geringerem spezifischem Gewicht. Allerdings sind diese Werkstoffe aufgrund ihrer hohen Härte deutlich schwerer zu bearbeiten und weisen eine deutlich geringere Zähigkeit auf. Dies beeinträchtigt die Schadenstoleranz und damit nicht zuletzt auch die Sicherheit des Bauteils, sodass hier noch einige Entwicklungen hinsichtlich Werkstoffdesign und Fertigbarkeit erforderlich sind.

Im »kalten« Bereich des Triebwerks, beispielsweise am Fan und Niederdruckverdichter, werden zum Teil bereits neue Leichtbauwerkstoffe auf Kunststoffbasis eingesetzt und sollen zukünftig verstärkt zum Einsatz kommen. So können beispielweise kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) dabei helfen, die Effizienz weiter zu steigern und den Ausstoß von Emissionen während des Flugbetriebs zu senken [BREN20]. Jedoch geht es auch bei diesen Werkstoffen nicht nur um die ökologischen Vorteile während des Flugbetriebs, sondern auch um eine Bewertung der Fertigungsroute anhand der geforderten Nachhaltigkeitskriterien. Zusätzlich zu den fertigungstechnischen Anforderungen müssen deshalb auch neue Recyclingkonzepte entwickelt werden, um die Produkte nachhaltig zu gestalten.

Als weitere Möglichkeit Gewicht einzusparen, liegt die Reduzierung des Werkstoffeinsatzes auf der Hand: Für diesen Fall bedeutet das bei gleichbleibenden Anforderungen, dass die Sicherheitsreserve geringer wird, um die Effizienz zu steigern. Die Sicherheit geht dadurch nicht verloren, allerdings muss exakt bekannt sein, wie nah man sich an der Belastungsgrenze befindet. Hier ist es unbedingt erforderlich, die Streuungen in der Herstellung und der Prognose der Belastung zu reduzieren. Die Digitalisierung der Fertigung entlang der gesamten Prozesskette kann dabei einen wichtigen Beitrag leisten. Anhand qualitativ hochwertiger Daten kann es gelingen, selbst bei verringertem Werkstoffeinsatz die Sicherheit des Bauteils transparent nachzuweisen [BERG21].

Entsprechend ist der gesamte Auslegungsprozess, angefangen beim Werkstoffdesign über die Strukturmechanik und Lebensdauerberechnung sowie die Herstellungsprozessschritte bis hin zu aufwendigen Qualitätssicherungsprozessen, geprägt von strengen Vorgaben an eine durchgängige Dokumentation und Nachverfolgbarkeit aller Wertschöpfungssequenzen. Eine ausgereifte Simulation der Auslegung von Fertigungsprozessen und eine deutlich bessere Zugänglichkeit von Informationen über Prozesszustände können die Überwachung und Regelung von Fertigungsprozessen verbessern. Ansätze der integrativen computergestützten Auslegung (engl. Integrated Computational Materials & Manufacturing Engineering, kurz: ICM²E), sind zwar als wissenschaftliche Methode bereits etabliert, aber in den Produktionsumgebungen der Hersteller noch nicht angekommen. Bei der Übertragung solcher Ansätze und Methoden in die konkrete Fertigung besteht daher immer noch ein erheblicher Industrialisierungsbedarf.

Damit die Komplexität der neuen Komponentenspezifikationen und der technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Randbedingungen beherrschbar wird, brauchen die Hersteller eine domänenübergreifende digitalisierte Infrastruktur, die den Wertschöpfungszyklus von der Planung neuer Produkte über die Fertigung bis hin zur Qualitätssicherung ohne Medienbrüche garantiert und adaptive Prozessketten ermöglicht.

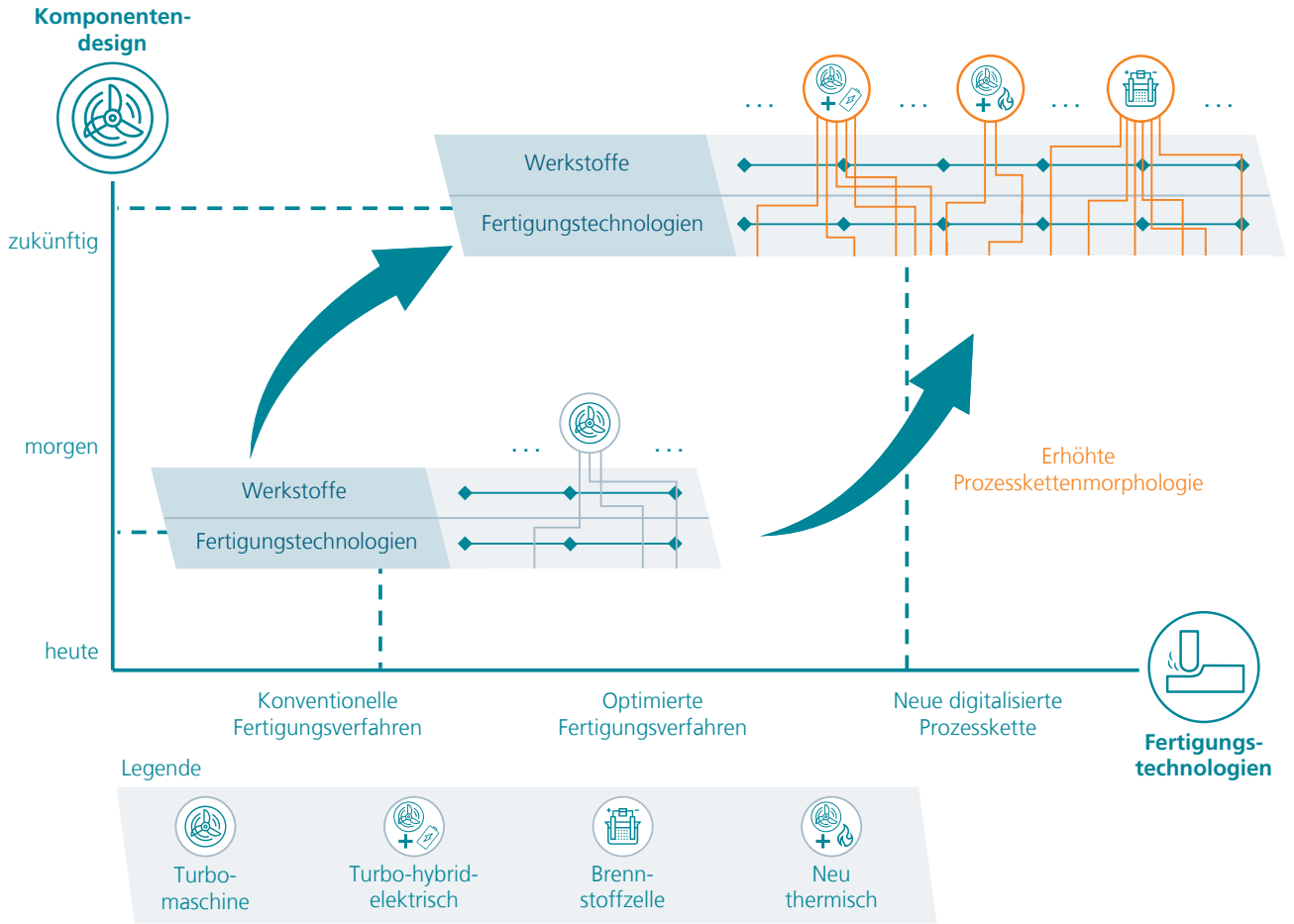
Prozesskette und Fertigungstechnologien

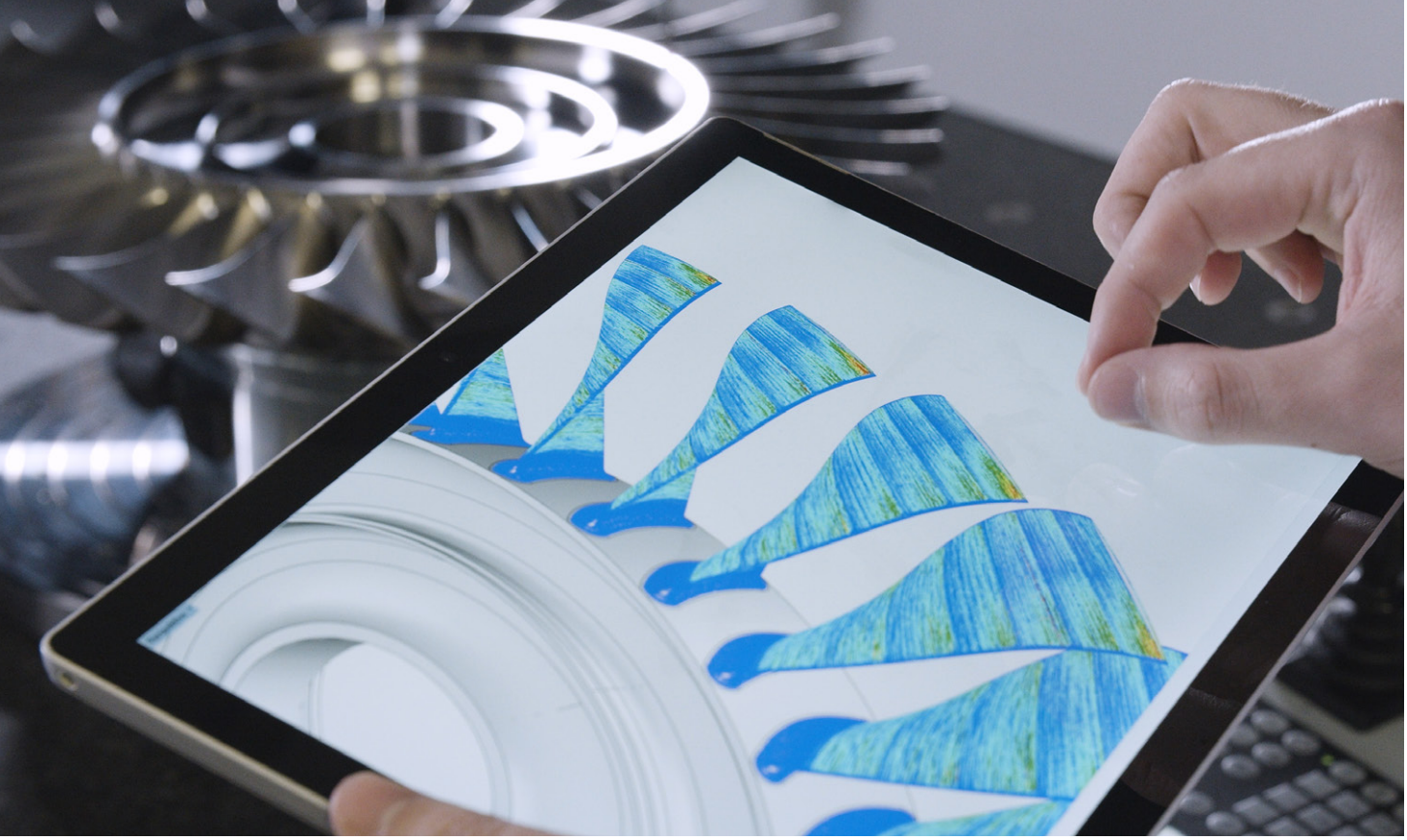
Zur Sicherstellung der Bauteilintegrität und für einen Ressourcenüberblick in der Fertigung müssen die Einzelprozesse optimiert, Prozessentwicklungszyklen verkürzt und durchgängige Transparenz geschaffen werden. Der digitale Zwilling ist dazu in der Lage, diese Datendurchgängigkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg und hier speziell während des Produktionszyklus sicherzustellen.

Die Fertigung der Zukunft verlangt neue Lösungen, um einerseits die geforderten Komponenten zu fertigen und andererseits die Transparenz über den Ressourceneinsatz und damit schließlich die ökologische Effizienz entlang der Prozesskette sicherzustellen. Bisher konnten Komponenten mit weitestgehend etablierten Prozessketten und konventionellen Fertigungsverfahren wie der Fräs- oder Drehbearbeitung oder durch Räumen gefertigt werden, da sich Geometrien und Werkstoffe lange Zeit sehr ähnlich waren. Für zukünftige Triebwerkskomponenten wird dies schwieriger werden: Die bestehenden Prozessketten müssen aufgrund steigendender

technischer, ökonomischer und ökologischer Anforderungen neu gedacht werden. Konventionelle Verfahren können im Triebwerksbau entweder durch weniger genutzte Verfahren in einer Prozesskette ergänzt oder substituiert werden. Alternative Fertigungsverfahren sind die elektrochemische Metallbearbeitung (ECM), die Funkenerosion (EDM), die Wasserstrahlbearbeitung sowie pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren wie die Laser Powder Bed Fusion (LPBF) und die Direct Energy Deposition (DED) in Form des Laserauftragschweißens. Diese Verfahren können durch ihre technologischen Vorteile die oben beschriebenen steigenden Anforderungen an die Komponentenfertigung erfüllen, auch und besonders in Kombination mit den etablierten Fertigungsverfahren.

Die daraus neu entstehenden, vollständig digitalisierten Prozessketten erweitern die Bandbreite an Möglichkeiten und damit die Prozesskettengestaltung. Entscheidend ist es nun, neben den Kernprozessen auch die Schnittstellen zwischen den Einzelprozessen ohne Medienbrüche abzubilden, um die physisch durchgängige Fertigung auch digital darzustellen. Nur so kann aus der Kombination der einzelnen Verfahren eine Prozesskette entstehen, die hinsichtlich Qualität, Fertigungszeit und Nachhaltigkeit optimiert ist. Auch wird es zukünftig notwendig sein, die Fertigungstechnik bereits zeitgleich, während der Komponentenentwicklung zu qualifizieren, um den immer kürzeren Planungshorizonten gerecht zu werden. Schon während der Entwicklung hochkomplexer neuer Komponentendesigns müssen Prozessketten gestaltet werden, die leistungsfähige Fertigungstechnologien einbeziehen und vollständig digitalisierbar sind.





Dimension Digitalisierung

Einer der Megatrends der vergangenen Jahre ist die Digitalisierung in allen Bereichen unserer Gesellschaft. Die flächendeckende Konnektivität verändert das gesellschaftliche Leben aber auch die Arbeits- und Produktionswelt nachhaltig. Die Aufnahme, Analyse und Verwertung von Daten schaffen die Grundlage für zukünftige Produkte, Prozesse und Dienstleistungen. Im Fokus der Produktion steht hier der digitale Zwilling, der die verfügbaren Daten und Informationen über den Lebenszyklus eines realen Objekts hinweg aggregiert, strukturiert und nutzbar macht [BERG20].

Was ist der digitale Zwilling?

Der digitale Zwilling fungiert als Bindeglied zwischen den Objekten der realen und digitalen Welt. Er führt die verfügbaren Daten und Informationen zu einem realen Objekt in einer digitalen Umgebung zusammen [BERG20]. Die früheste Definition des digitalen Zwillings geht auf die University of Michigan zurück, die 2002 mit dem »Mirrored Spaces Model« erstmals ein virtuelles System beschreibt, das alle Informationen des realen physischen Systems speichert [GRIE17]. Darauf aufbauend beschreibt die Deutsche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) den digitalen Zwilling als ein möglichst vollständiges Abbild der Realität unter der Verwendung von Prozessmodellen und Simulationen. Der Input wird in Form des sogenannten digitalen Schattens bereitgestellt, der ein hinreichend genaues Abbild der Prozesse in der Produktion, Entwicklung sowie angrenzenden Bereichen ist. Der digitale Schatten überträgt auf diese Weise reale Produktionsdaten in die virtuelle Welt. [BAUE16]

Ziel des digitalen Zwillings sind Prozess- und Qualitätsverbesserungen, also etwa eine optimierte Prozessplanung oder eine schnellere Reaktion bei Prozessabweichungen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind mehrere Schritte zu gehen: Den ersten Schritt bildet eine deskriptive Datenanalyse, um Erkenntnisse aus historischen Daten zu erlangen. Anschließend werden Datenexplorationen durchgeführt, sodass Korrelationen aufgedeckt werden können. Ziel der dritten Stufe unter dem Schlagwort »Predictive Analytics« ist die Prognose, um anhand statistischer Modelle und vorhandener Daten Vorhersagen für die zukünftige Entwicklung zu treffen und die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Ereignisse zu benennen. Der letzte Schritt »Prescriptive Analytics« wendet schließlich Optimierungsalgorithmen und Simulationsansätze an, um Handlungsempfehlungen abzuleiten. [BAUE16]

Eine Betrachtung der Definitionen zeigt, dass eine Differenzierung zwischen dem digitalen Schatten und digitalen Zwilling notwendig ist: Der digitale Schatten bezeichnet die reine Zuordnung von Daten zu einem bestimmten Objekt zu einem bestimmten Zeitpunkt. Zweck des digitalen Schattens ist daher auch nicht der Erkenntnisgewinn. Er schafft vielmehr die Grundlage für statistische Analysen zwischen verschiedenen Instanzen eines Objekts oder zwischen einzelnen Prozessschritten. Erst die Anwendung von Prozessmodellen, die die Zustandsänderungen beschreiben, führt zum digitalen Zwilling. Dieser bezeichnet damit die virtuelle Darstellung des physikalischen Zustands. [BERG20]

Der Fräsprozess zur Herstellung eines integralen Verdichterrotors liefert ein gutes Beispiel: Eine gemessene Aktivkraft, die einer Position am Werkstück zugeordnet ist, ist ein digitaler Schatten. Der digitale Zwilling liegt vor, wenn physikalische Eigenschaftsänderungen am Werkstück beschrieben werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass eine Modellierung allein auf Grundlage der Daten keine direkt verwertbaren Erkenntnisse liefert. Die vorhandene Datenmenge reicht nicht aus, um das komplexe Problem zu beschreiben. Erst durch den Einsatz technologischer Modelle wird die »Simplizität« des Problems erhöht. Eine erfolgreiche Anwendung des digitalen Zwillings erfordert somit Wissen und Daten gleichermaßen.

Für den Aufbau von Resilienz ist der digitale Zwilling hilfreich, um bei Störungen schnell reagieren zu können. Die aggregierte Darstellung der Informationen ermöglicht gekoppelt mit entsprechenden Prozessmodellen die Vorhersage erforderlicher Zustandsänderungen und Prozesse. Eine Störung kann dadurch schnell visualisiert und erkannt werden. Verschiedene Lösungsvarianten lassen sich anhand der hinterlegten Modelle ableiten und simulieren. Zudem befähigt der digitale Zwilling dazu, Komponenten hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten, da er als zentrale Informationsquelle fungiert und Transparenz über die gesamte Zulieferkette schaffen kann.

Digital Framework für die digitalisierte Fertigung

Das digitale Rahmenwerk (engl. Digital Framework) bildet das Fundament für die Datenaufnahme und -verwertung und damit für die digitalisierte Fertigung. Das Fraunhofer IPT hat gemeinsam mit Partnern aus der Industrie im Rahmen des International Center for Networked, Adaptive Production (ICNAP) und des ICTM Aachen – International Center for Turbomachinery Manufacturing ein digitales Framework für die Anforderungen der Luftfahrt entwickelt. Es vereint die beiden existierenden Ansätze in Form des domänenspezifischen Ansatzes der ISO 23247 »Automation systems and integration. Digital twin framework for manufacturing« mit der Lambda-Architektur [MARZ15], [INTE21b], [GANS21]. Indem eine resiliente und robuste IT-Architektur zugrunde gelegt wird, wird eine ganzheitliche Nutzung des digitalen Zwillings möglich.

Die Lambda-Architektur differenziert zwischen zwei Datenströmen, einem Batch Layer und einem Stream Layer. Der Batch Layer dient der Verarbeitung großer Datenmengen, die nicht in Echtzeit benötigt werden, beispielsweise Daten für Simulationsmodelle. Im Stream Layer werden kleinere Datenmengen mit geringer Latenz in Echtzeit oder echtzeitnah verarbeitet. Ein Beispiel sind Sensordaten aus dem Fertigungsumfeld, etwa Temperatur- oder Kraftmesssensoren. Batch Layer verbinden die Datenquellen mit dem Serving Layer und stellen so die Daten für Anfragen bereit. [GANS21]

Der domänenspezifische Ansatz nach ISO 23247 gilt auch als allgemeines Digital-Twin-Framework für die Fertigung. Es besteht aus den vier Hauptbereichen Benutzerdomäne (engl. User Domain), Kerndomäne (engl. Core Domain), Datenerfassungs- und Gerätesteuerungsdomäne (engl. Data Collection Domain) sowie der beobachtbaren Fertigungsdomäne (engl. Observable Manufacturing Domain) [GANS21], [BERG21].

Die Funktionen der jeweiligen Domänen sind folgende:

- User Domain: Menschen, Geräte, Systeme, die Anwendungen und Dienste aus der Kerndomäne nutzen
- Core Domain: Betrieb und Verwaltung des digitalen Zwillings (Bereitstellung, Überwachung, Optimierung, etc.)
- Data Collection Domain: Überwachung und Sammlung von Daten aus sensorischen Geräten
- Observable Manufacturing Domain: Physische Fertigungsressourcen wie Personal, Ausrüstung, Material

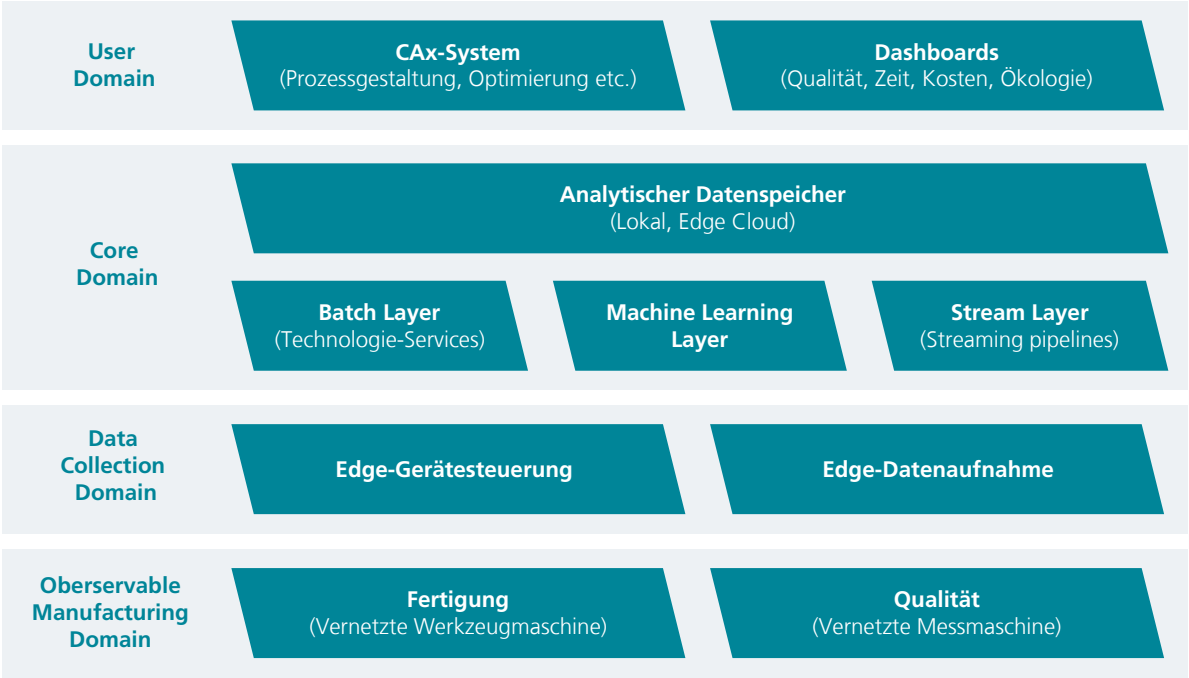
Die Kombination der beiden existierenden Architekturen ermöglicht es, verschiedene Bausteine der Prozesssimulation, der Cloud-Infrastruktur, der Batch- und Stream-Datenverarbeitung sowie der Maschinendatenverarbeitung zusammenzuführen. Das Digital Framework dient damit als Befähiger für eine vollständig digitalisierte Fertigung und einen datenkonsistenten digitalen Zwilling.

Mit dem Ziel einer stärkeren Resilienz bietet das digitale Framework eine schnelle und transparente Visualisierung von Daten in Form aufgabebezogener Dashboards. Angebundene CAx-Systeme oder andere Planungssoftware zur Core Domain unterstützen eine genauere Quantifizierung der Qualität. Kurzfristige Störungen lassen sich dadurch vermeiden; die Prozessplanung wird durch eine höhere Anzahl von Simulationsergebnissen genauer und kann schwer vorhersehbare Szenarien besser berücksichtigen, sodass die Fertigung insgesamt resilienter wird. Entscheidend ist nicht zuletzt auch die Datenkonsistenz, damit Prozessqualifizierungen und Zertifizierungen sowie auch Nachhaltigkeitsbewertungen digital unterstützt werden.

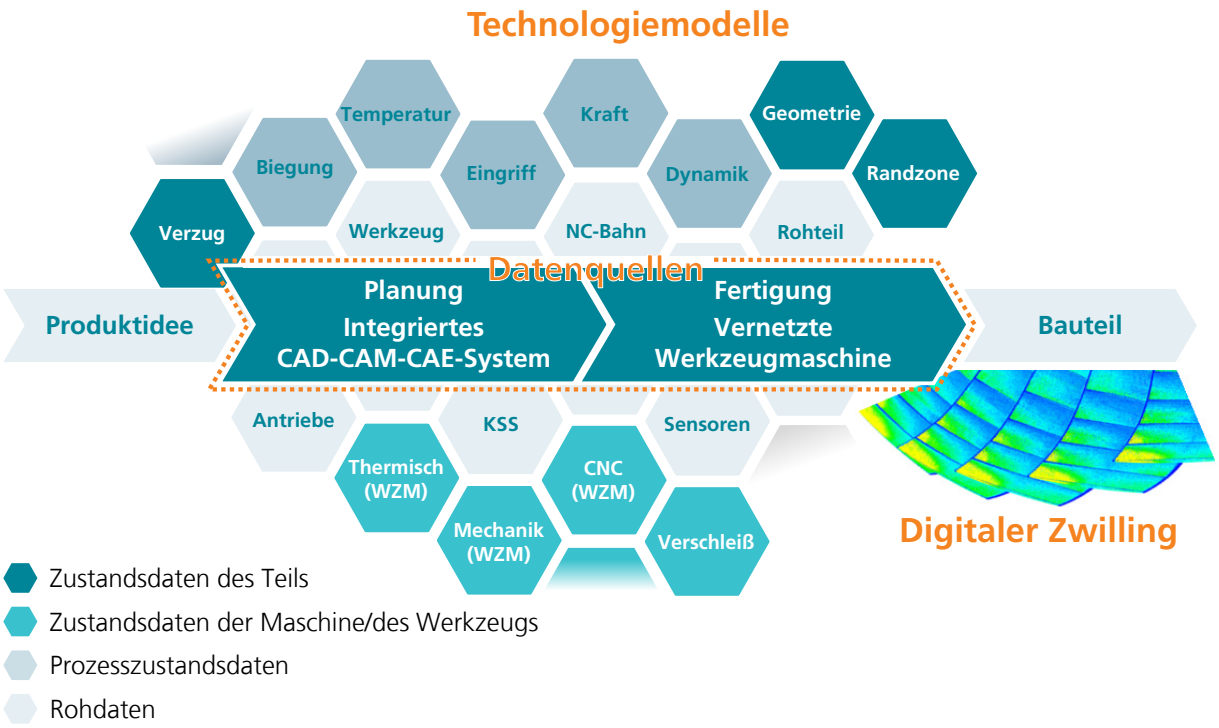
Fertigungsprozesse: Beispiel für daten- und modellgestützte Beschreibung der Produktgeometrie

Blisks, Verdichterrotoren in integraler Bauweise, werden im Triebwerk von Flugzeugen eingesetzt. Die anspruchsvollen Geometrien dieser Bauteile müssen unter Einhaltung höchster Toleranzanforderungen gefertigt werden. Denn im Betrieb sind sie extremen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt und müssen hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen. Die werkstoffspezifischen Sicherheitsaufschläge sind dabei so gering wie möglich zu halten, damit das Triebwerk eine hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig guter Effizienz aufweist. Es bestehen bereits heute strenge Anforderungen an die Qualifizierung und Dokumentation der Fertigungsprozesse entlang der gesamten Prozess- und Zulieferkette. Die Dokumentationspflichten werden mit zunehmender Bedeutung der Nachhaltigkeit weiter steigen, weil Kunden entsprechende Nachweise für eine nachhaltige Produktion und Materialien fordern werden. Mit dem Ziel, die Abweichung zwischen den Eigenschaften des konkret gefertigten Bauteils und den gewünschten Eigenschaften des Idealbauteils möglichst präzise zu bestimmen, bietet die Produktion der Blisks ein gutes Beispiel, wie eine daten- und modellgestützte Beschreibung der Geometrie aussehen kann:

Die Herstellung der Blisks geschieht im Wesentlichen durch Fräsprozesse. Nach vorgelagerten Prozessschritten wie dem Drehen des Rohteils dient das Fräsen der Erzeugung der Schaufelgeometrien. Die Bearbeitungsdauer liegt für moderne Bauteildesigns bei mehreren zehn Stunden [BERG20]. Obwohl während der Bearbeitung große Datenmengen von der



[GANS21]



Werkzeugmaschine entstehen, beispielsweise Positions- oder Sensordaten, sind Bauteilinformationen üblicherweise nicht verfügbar. Dies liegt daran, dass bisher keine direkte Messung der Bauteileigenschaften innerhalb der Maschine möglich ist. Ziel von Forschungsarbeiten am Fraunhofer IPT ist es daher, die heute verfügbaren Daten für die Beschreibung des Bauteilzustands während der Bearbeitung nutzbar zu machen.

Bereits heute ist es möglich, die Positionsdaten der Maschinenachsen zu erfassen, in einen zeitlichen Bezug zur Bearbeitungssequenz zu setzen und so einen digitalen Schatten des Bauteils zu generieren. Durch eine Transformation vom Koordinatensystem der Werkzeugmaschine in das des Werkstücks lässt sich die theoretische Bahn des Werkzeugmittelpunkts (engl. Tool Center Point, TCP) als Punktewolke darstellen. Werden zusätzlich der Radius und die jeweilige Orientierung des eingesetzten Fräswerkzeugs berücksichtigt, ist auch die Bahn des theoretischen Werkzeugkontaktpunktes (engl. Tool Contact Point) bekannt. In einem weiteren Schritt können die bisher als ideal angenommenen Bedingungen für die Werkzeuggeometrie und die Steifigkeit der Werkzeugmaschine, des Fräswerkzeugs und des Bauteils in Technologiemodellen berücksichtigt werden.

Verschleißeffekte des Fräswerkzeugs lassen sich anhand einer Häufigkeitsverteilung der Eingriffszeit entlang der Werkzeuggeometrie bestimmen. Dafür werden die Daten der theoretischen geometrischen Eingriffsbedingungen in Relation zur Einsatzdauer des Werkzeugs gesetzt. Diese Informationen können in Verbindung mit einem Verschleißmodell verwendet werden, das weitere Parameter wie Schneidstoff, Makro- und Mikrogeometrie des Werkzeugs sowie den zu bearbeitenden Werkstoff einbezieht und sogenannte Verschleißkurven erzeugt.

Weitere Einflüsse auf den Fräsprozess lassen sich mit entsprechenden Technologiemodellen für Prozesskräfte, Bauteil- und Werkzeugabdrängung berücksichtigen. Werden alle Ergebnisse der Modellanwendungen gleichermaßen betrachtet und wird mittels Superposition eine Prognose für die bearbeitete Geometrie des Bauteils erstellt, lässt sich die Differenz gegenüber dem Nominal in Falschfarben darstellen. Die lokalen Abweichungen auf der Bauteiloberfläche werden dadurch erkennbar. Praxiserfahrungen bei der Herstellung von Blisks am Fraunhofer IPT zeigen, dass die datenbasierte Prognose der lokalen Abweichungen auf der Bauteiloberfläche je nach Schaufelposition in einer Spanne zwischen +5 µm und +35 µm liegen. Dies konnte mit Messungen einer Koordinatenmessmaschine in gleicher Größenordnung bestätigt werden [BERG20].

Dimension Nachhaltigkeit

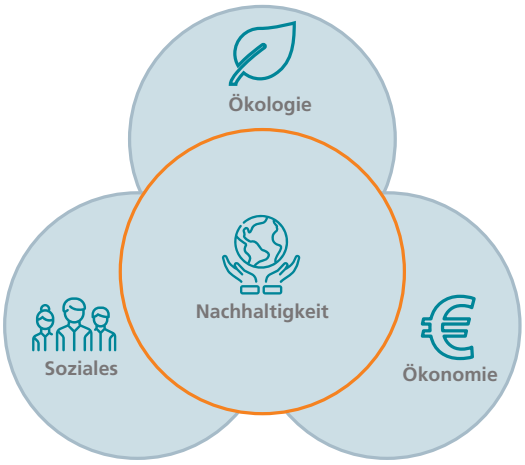
Dominierte in den vergangenen Jahrzehnten in produzierenden Unternehmen vielfach noch ein sehr kapital- und ressourcenintensives Produktivitätsdenken, wandelt sich das Zukunftsbild heute hin zu einer ökologisch bewusst denkenden Gesellschaft [SCHU21]. Das Thema Nachhaltigkeit hat in der jüngsten Vergangenheit, und aktuell noch einmal besonders durch die Coronapandemie und die damit verbundenen wirtschaftlichen Implikationen für die Luftfahrt, enorm an Bedeutung gewonnen.

Bedeutung von Nachhaltigkeit in der Produktion

Der Begriff der Nachhaltigkeit ist durch die drei Bereiche Ökologie, Ökonomie und das Soziale gekennzeichnet [BERG21], [KROP19]:

Ökologische Nachhaltigkeit bedeutet hier, natürliche Ressourcen nur in einem Ausmaß zu verbrauchen, das ein Nachwachsen erlaubt [KRÜG10]. Ein ökonomisch nachhaltiges System ist fähig, kontinuierlich Güter und Dienstleistungen zu produzieren, gleichzeitig Ressourcen zu schonen und Ungleichgewichte zu vermeiden, die die Produktion gefährden [OTT08]. Soziale Nachhaltigkeit bedeutet Einhaltung von Standards im Arbeitsumfeld wie Arbeitssicherheit, Gesundheitsschutz aber eine angemessene Vergütung [NOWA22].

Politik und Wirtschaft haben ambitionierte Ziele, die Nachhaltigkeit in der Gesellschaft und Industrie zu steigern. Das Pariser Klimaabkommen 2015, der »Green New Deal« 2019 und der Europäische Klimapakt 2020 forcieren Entwicklungen, den



weltweiten Ressourcenbedarf und Emissionen signifikant zu reduzieren und Produkte sowie deren Fertigung nachhaltiger zu gestalten. Das bisherige »magische Dreieck«, bestehend aus den Eckpunkten Qualität, Kosten und Zeit, erweitert sich damit um eine vierte Dimension [BERG21]. Die Komplexität für fertigungstechnische Lösungen nimmt dadurch stark zu, denn neben den bisherigen Kriterien sind nun auch ökologische und soziale Aspekte bei neuen Entwicklungen zu berücksichtigen. Für die Fertigung zukünftiger Triebwerkskomponenten ergeben sich aus den steigenden technologischen Anforderungen wie einer höheren Komplexität und schwieriger zu bearbeitenden Werkstoffen in Kombination mit dem Anspruch möglichst nachhaltig zu fertigen, neue Herausforderungen: Ein Schlüssel dazu, diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine durchgängige Digitalisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling.

Wie auch schon bei der Dimension der Digitalisierung beschrieben, kann durch die Erfassung der Daten im digitalen Zwilling die erforderliche Transparenz hinsichtlich Ressourcenverbrauch, Emissionsausstoß und Global Warming Potential (GWP) geschaffen werden. So kann der digitale Zwilling einen entscheidenden Beitrag zu einer nachhaltigen Fertigung leisten und zur Resilienz des Unternehmens beitragen.

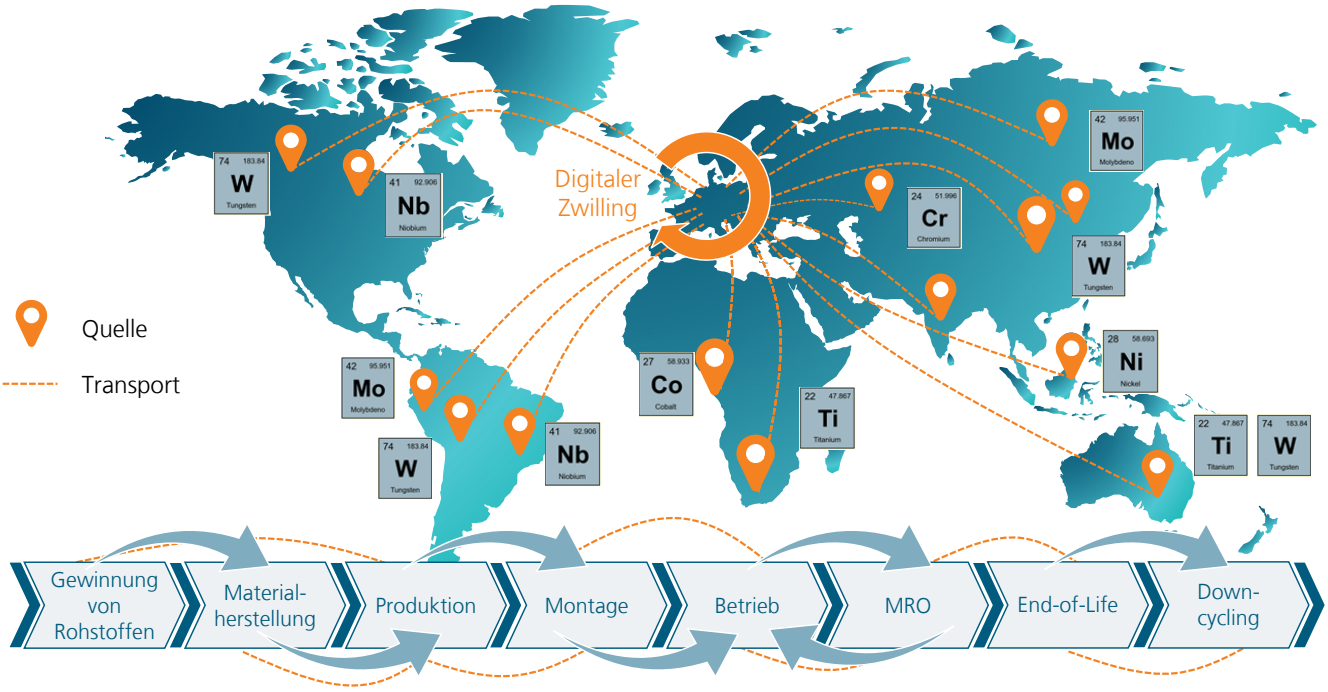
In Zukunft kann die transparente Darstellung von Emissionen, eingesetzten Ressourcen, Werkstoffen sowie deren Ursprung und Verfügbarkeit zuzüglich weiterer nachhaltigkeitsbezogener Kennzahlen einen großen Einfluss darauf nehmen, ob ein Unternehmen, auch bei sich verändernden Kapitalmarkt- und Kundenanforderungen, seine Produkte am Markt absetzen kann [BERG21].

Bewusstsein für Nachhaltigkeit in Unternehmen

Unternehmen, die nachhaltig produzieren, tun dies in einem fairen Arbeitsumfeld durch wirtschaftlich sinnvolle Prozesse, die negative Auswirkungen auf die Umwelt minimieren und gleichzeitig Energie und natürliche Ressourcen schonen [BERG21]. Gesetzliche Vorgaben fordern jedoch neben dem guten Willen immer stärker auch den Nachweis dafür – und damit die Erfassung belastbarer Produktionsdaten zur Quantifizierung der eingesetzten Ressourcen, Energie und Betriebsmittel als Beleg für die Nachhaltigkeit der Produktion.

Für Unternehmen ergeben sich aus diesen Rahmenbedingungen fünf gute Gründe für ein nachhaltiges Handeln: [BERG21]

- Verbesserte langfristige betriebliche Effizienz durch reduzierte Produktionskosten
- Stärkung und Schutz der Unternehmensmarke durch ein größeres Vertrauen der Öffentlichkeit
- Kundengewinnung und Wettbewerbsvorteile durch eine nachhaltige Wertschöpfung
- Langfristige Rentabilität und Erfolg durch die Vermeidung kurzfristiger Profit-Strategien
- Präventiver Schutz vor regulatorischen Beschränkungen und daraus resultierende Chancen am Markt



Das neue Bewusstsein für eine nachhaltigere Fertigung stellt Unternehmen vor drei konkrete Fragen:

»Wo fertigen wir zukünftig?«
Diese Frage umfasst gleich zwei Aspekte: Einer bezieht sich vornehmlich auf globale Vorkommen von Werkstoffen sowie deren Verfügbarkeit und Abbau. So sind beispielweise seltene Erden weltweit in nur sehr eingeschränktem Umfang und an wenigen Orten verfügbar. Hier spielen neben den Kosten und der Verfügbarkeit vor allem Abhängigkeiten von Nicht-EU-Ländern eine wichtige Rolle, aber damit verbunden auch die soziale Verantwortung und lokale Arbeitsbedingungen. So wird es zukünftig immer wichtiger werden, seltene Erden als Legierungselemente durch andere Werkstoffe zu ersetzen, beispielsweise Kobalt in Zerspanungswerkzeugen. Aufgrund der extremen Anforderungen an hochtemperaturbeständige Superlegierungen gibt es aus technologischer Sicht im Triebwerksbau jedoch kaum Alternativen für diese Legierungselemente. Die Erfahrung der vergangenen Jahrzehnte hat gezeigt, dass die Entwicklung und Qualifizierung neuer Werkstoffe für solche Anwendungen in der Größenordnung von einer Dekade und zehn Milliarden Euro liegt.

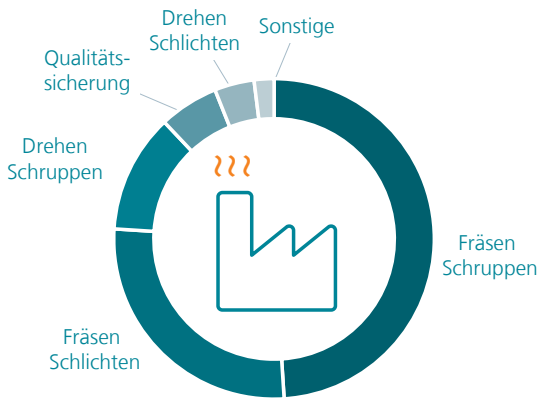
Ein zweiter Aspekt bezieht sich auf den Transportweg, die Art des Transports und auch auf die Frage, wo hochenergieintensive Prozesse der Werkstoffherstellung zukünftig stattfinden. Aus ökologischer Sicht sind hier Standorte sinnvoll, die einen hohen Anteil erneuerbarer Energien bereitstellen können.

»Was fertigen wir zukünftig?«
Diese Frage zielt auf eine Anpassung des Produkt- und Technologieportfolios in Unternehmen: Sich wandelnde Randbedingungen verlangen in der Luftfahrt nach neuen Antriebskonzepten, die auch neue Komponenten und Baugruppen enthalten. Hier ist es für Unternehmen wichtig, frühzeitig in neue Technologien und das dazugehörige Know-how zu investieren, um nachhaltig fertigen zu können. Mit der Einführung von Triebwerken, die Wasserstoff als Energieträger nutzen, werden sich die Anforderungen an spezielle Baugruppen wie die Brennkammer unter anderem aufgrund der veränderten Flammcharakteristik wandeln [BOHN19]. Bei einem Wechsel der gesamten Antriebseinheit von einer Turbomaschine hin zur Brennstoffzellentechnologie ändern sich die zu fertigenden Komponenten und damit auch die Fertigungsprozesse im erheblichen Maße. Parallel zu der evolutionären Entwicklung mit primärem Augenmerk auf die Sicherheit und die Prozesssicherheit in der der Produktion müssen sich Unternehmen nun erstmalig mit völlig neuen und disruptiven Entwicklungen beschäftigen. Dies muss zudem in nun deutlich kürzeren Zykluszeiten – resultierend aus den zu Beginn genannten Zielen – sowie unter steigenden technologischen Anforderungen erfolgen. Um das Unternehmen resilient aufzustellen, müssen diese neuen Entwicklungen frühzeitig bewertet und gegebenenfalls in ein erweitertes Technologieportfolio aufgenommen werden.

»Wie fertigen wir zukünftig?«
Diese Frage bezieht sich auf eine ressourceneffizientere Fertigung und Reduktion von Emissionen durch einen verminderten Einsatz von Druckluft und Vermeidung von Leckagen in den Zuführungssystemen, eine Verringerung der Menge von Kühlschmierstoff sowie dessen Aufbereitung, auf den bedarfsgerechten Einsatz von Werkstoffen und auf die längere Nutzung von Werkzeugen mithilfe geeigneter Systeme zur Verschleißanalyse. Auch eine gezielte Modernisierung von Anlagen und Maschinen kann hier bereits einen Beitrag am Standort leisten. Darüber hinaus gilt es zu analysieren, wo Energie oder Ressourcen nicht effizient genutzt werden, und wo es Möglichkeiten gibt, Produktionsabfälle zu reduzieren oder zu vermeiden und Recycling zu nutzen. Unnötige Stand-by-Zeiten von Werkzeugmaschinen oder Leckagen in der Druckluftversorgung sind hier die »Low hanging fruits«, die schon kurzfristig angepasst und geerntet werden können, um Energie einzusparen. Rückkopplung von Energie, zum Beispiel für Gebäudewärme, bietet eine zusätzliche Chance, Energie und Ressourcen zu sparen.

Weitere Potenziale sind direkt bei den Fertigungsprozessen zu erschließen, wenn auch die Zusammenhänge deutlich komplexer sind. Werkzeugwerkstoffe, die Zusammensetzung von Kühlschmierstoffen, Werkzeugreparaturintervalle aber auch die Prozessauslegung können hier näher in Betracht gezogen werden: So trägt etwa schon ein stabilerer Prozess dazu bei, Werkzeugressourcen in größerem Umfang einzusparen.

Übergeordnetes Ziel ist es deshalb, entlang der gesamten Wertschöpfungs- und Fertigungskette solche Potenziale zu identifizieren und auszuschöpfen. Eine geeignete Methode, um Energieverbräuche und Emissionen zu erfassen ist die Ökobilanz (engl. Life-Cycle Assessment, LCA). Gekoppelt mit einer digitalen Datenerfassung zum digitalen Zwilling schafft sie Transparenz auch über die Prozesse außerhalb der Unternehmensgrenzen, da sie den gesamten Lebenszyklus eines Produkts einbezieht. Hier ist die Qualität der Life-Cycle-Inventory-Daten (LCI), in- and outputs jedes einzelnen Prozessschrittes



Relatives GWP der Blisk-Produktion (exkl. Rohmaterialerstellung)

einschließlich der Massen- und Energieflüsse, ein entscheidender Faktor. Dies ist besonders dann zu berücksichtigen, wenn die Daten nicht im eigenen Unternehmen erhoben wurden [FRIC21].

Das LCI ist zudem der Schlüssel für eine valide LCA. Da in bisher verfügbaren Datenbanken die Daten nicht in der erforderlichen Granularität vorliegen, um eine valide LCA im Produktionsumfeld durchzuführen, ist die Aufnahme von produktionsbezogener LCI eine der wichtigsten Aufgaben der Ökobilanzierung. Besonderes Augenmerk verdient außerdem die Aktualität der Daten und deren ständige Aktualisierung, da sich beispielsweise Recyclingraten von Werkstoffen über die Jahre stark verändern können, wie das Beispiel von Aluminium zeigt. Nur der digitale Zwilling als virtuelles Abbild der physikalischen Komponente entlang des Lebenszyklus bietet die Möglichkeit einer objektiven und transparenten Darstellung in der ökologischen Bilanzierung.

Wertschöpfungskettenübergreifende Nachhaltigkeitsbewertung auf Komponentenebene

Bisher wurden in der Fertigung von Komponenten vor allem ihre technologischen und ökonomischen Kennwerte wie die erzielbare Qualität, Prozesssicherheit, Verfügbarkeit, Fertigungsdauer sowie Kosten zur Bewertung herangezogen. Zukünftig wird die ökologische Nachhaltigkeit als eine weitere wichtige Kenngröße hinzukommen [SCHU21].

Die Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/14044 [DIN21a], [DIN21b] ist der Standard zur Bewertung der Umweltwirkungen von Produktsystemen [BRUN18]. Sie beschreibt ein Vorgehen zur »Zusammenstellung und Beurteilung der In- und Output-Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs« [DIN21b]. Das Vorgehen umfasst vier Phasen:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (engl. Goal and Scope)
- Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory, LCI)
- Wirkungsabschätzung (engl. Impact Assessment, IA)
- Auswertung (engl. Interpretation) [DIN21a]

Um die verschiedenen Dimensionen entlang der Wertschöpfungskette zu erfassen, bedarf es einer Klassifizierung der Treibhausgase und einer Einstufung welcher Industriepartner diese emittiert. An dieser Stelle ist es entscheidend, dass alle Treibhausgase betrachtet werden und nicht nur Kohlenstoffdioxid (CO_2). Das Greenhouse-Gas Protocol (GHG) ist eine Methode zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen. Es bildet die etablierte Grundlage für Berichte zu CO_2-Emissionen in Unternehmen [DELO11].

Die Klassifizierung umfasst drei Bereiche:

- Bereich 1 (Scope 1) bezieht sich ausschließlich auf das eigene Unternehmen und umfasst beispielsweise die betriebenen Gebäude sowie Fahrzeuge.
- Bereich 2 (Scope 2) bezieht sich ausschließlich auf die gekaufte Energie für den Eigenbedarf wie Strom, Wärme und Kälte.
- Bereich 3 (Scope 3) umfasst alle indirekten Aktivitäten wie entstandene Emissionen, zum Beispiel beim Transport der Güter, die An- und Abreise der Mitarbeitenden zum Unternehmen, zugekaufte Teile und deren Nutzung, beispielsweise Werkzeuge oder Werkstoffe, die Nutzung des gefertigten Produkts und zuletzt auch das Recycling.

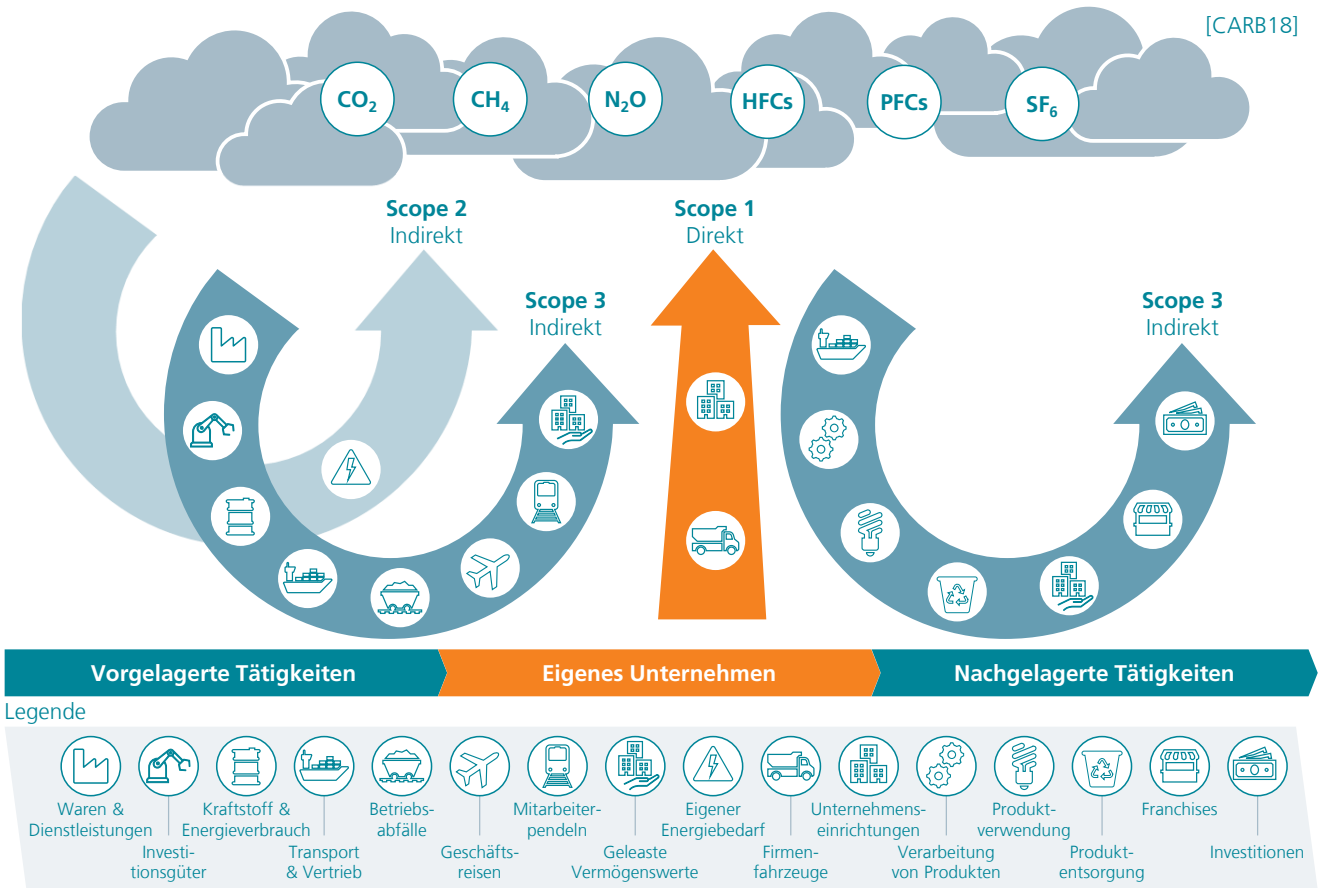
Bei der Bilanzierung der Scopes 2 und 3 spricht man von indirekten Emissionen, bei Scope 1 von direkten Emissionen. Die Aufteilung zeigt deutlich, dass eine nachhaltige Fertigung und Nutzung von Produkten bereits bei der Gewinnung der Ausgangswerkstoffe beginnt und erst mit dem Recycling endet. Neben ökologischen Aspekten spielen bei der Betrachtung der Nachhaltigkeit auch ökonomische und soziale Randbedingungen eine wichtige Rolle [CARB18]. Die Bilanzierung kann sich unter dem Motto »cradle to gate« auf unterschiedliche Bereiche des Lebenszyklus oder unter »cradle to grave« auf den gesamten Lebenszyklus beziehen, der von der Gewinnung des Werkstoffs, über die Fertigung der Komponente bis hin zum Recycling reicht. Unter Berücksichtigung steigender technologischer Anforderungen an zukünftige Bauteile hinsichtlich Toleranzen, Design und Werkstoff muss dies auch unter den Vorgaben einer ökologisch nachhaltigeren Fertigung umgesetzt werden.

Um das Spannungsfeld zwischen steigenden technologischen Anforderungen und immer strikteren Vorgaben hinsichtlich Nachhaltigkeit in der Fertigung auch in Zukunft gestalten zu können, müssen radikal neue Technologien entwickelt und Ressourcenverbräuche und Emissionen durch digitale Lösungen transparent erfasst werden. Der Produktionszyklus kann hier großen Einfluss auf die Performance des Produkts nehmen. Doch führt dies auch zu einer hohen Komplexität in der Bilanzierung des Lebenszyklus. Ein instabiler Fertigungsprozess kann beispielsweise nicht nur einen erhöhten Energie- und Werkzeugverbrauch oder Zusatzverbräuche durch Nacharbeit bewirken. Eventuell kann auch eine, zum Teil nicht-lineare, negative Wechselwirkung auf die Performance im User-Cycle auftreten, die zu erheblichen Verbrauchsunterschieden des Triebwerks führt. Solche Effekte können nur in einer durchgängigen Betrachtung identifiziert werden. Das zentrale Hilfsmittel ist auch hier wieder der digitale Zwilling, der die Daten übergreifend zusammenführt. Die Ökobilanz in Kombination mit den Daten des digitalen Zwillings wird so zum Schlüssel für die Bewertung der Ressourceneffizienz. Sie dient

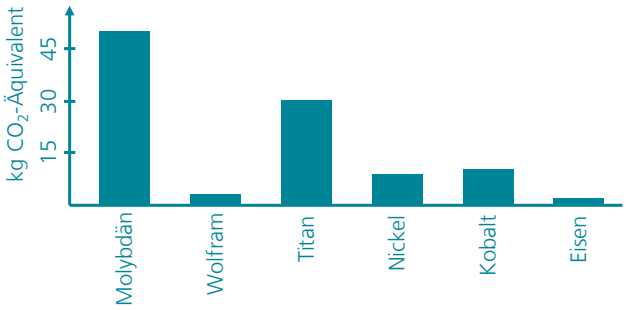
damit als Entscheidungshilfe, welche Prozesskette die Nachhaltigste ist und welche Effekte in der Fertigung Einfluss auf die Performance der Komponente haben.

Die LCA gewährleistet also eine transparente Darstellung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder einer Komponente und schafft über die technischen und wirtschaftlichen Bewertungen hinaus ein ganzheitliches Bild des Ressourcenverbrauchs und Emissionsaustoßes. Durch Bilanzierung von Kennzahlen wie des Global Warming Potential (GWP), der Ökotoxizität, der Flächennutzung und des Wasserverbrauchs geht sie weit über die einfache Ermittlung des CO_2-Fussabdrucks hinaus. Unternehmen können damit ökologische Einsparpotenziale wahrnehmen und ausschöpfen.

Für das Beispiel der Fertigung einer Blisk bedeutet dies, dass nun nicht nur die eingebrachten Ressourcen und Energien (LCI) wie Werkstoff, Kühlschmierstoff, Werkzeuge und Druckluft, sondern auch die entstehenden Produkte nach der Fertigung in die Bewertung einbezogen werden, die neben dem gefertigten Bauteil in Form von Spänen, Kühlschmierstoff und verschlissenen Werkzeugen anfallen [FRIC21]. Ebenso werden der Primärenergiebedarf sowie die genutzte Menge an Ressourcen mit bewertet. Nach der Sachbilanzierung der LCI wird in Phase 3 die Wirkung bewertet und eine Interpretation der Ökobilanzierung vorgenommen. Deutlich wird dabei, dass der Hauptanteil des Primärenergiebedarfs für die Schrupp-Fräsbearbeitung aufgewendet werden muss [FRIC21]. Ebenso weisen die typischen Werkstoffe hier stark unterschiedliche GWPs auf. Molybdän als Legierungselement hat hier beispielsweise ein um Faktor 5 höheres GWP als Nickel. Das Beispiel zeigt, dass das Produkt durch eine Reduktion oder den Ersatz von Molybdän durch ein alternatives Legierungselement deutlich nachhaltiger gestaltet werden könnte. Eine Anpassung des Werkstoffs erfolgt im Triebwerksbau allerdings nur in Ausnahmefällen. Dieser Effekt muss innerhalb der Fertigung immer auch im Kontext des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden, da beispielsweise eine Anpassung der Legierungselemente eine nichtlineare Wechselwirkung auf die Bilanzierung des Betriebs ausüben kann. Ein weiteres Beispiel zeigt, dass auch in der Weiterentwicklung von Keramikwerkzeugen für das Schruppen von Nickelwerkstoffen ein enormes Ökopotenzial vorliegt: Die Gegenüberstellung zu Hartmetallwerkzeugen lässt das Nachhaltigkeitspotenzial bereits erahnen, da die Werte für einige Kriterien wie das GWP oder die Toxizität deutlich unterhalb der Werte von Hartmetallwerkzeugen liegen. Die eingesetzten Ressourcen und Emissionen für die Herstellung der Fräswerkzeuge gehen in Scope 3 in die Ökobilanz ein und haben dadurch auch Einfluss auf die Gesamtbilanz.



Neben der Optimierung einzelner Prozesse oder Prozessketten kann auch die vollständige Substitution bestehender Fertigungsprozesse durch neue Verfahren wie das Electro Chemical Machining (ECM) oder die Additive Fertigung Beiträge zu mehr Nachhaltigkeit leisten. Abhängig vom Anwendungsfall und den Randbedingungen muss dies entsprechend analysiert und bewertet werden. Auch hier bietet eine Ökobilanz unter Einbezug des digitalen Zwillings eine objektive, transparente und valide Darstellung.



CO_2-Fußabdruck (GWP) der Rohstoffproduktion (1 kg)

Die Energieverbräuche und die Emissionen in der Produktion scheinen gegenüber den hohen Verbräuchen der Werkstoffherstellung und dem Betrieb der Triebwerke zunächst gering. Allerdings sind die nichtlinearen Wechselwirkungen der Fertigung auf den User-Cycle nicht zu vernachlässigen. Die Fertigung kann durchaus als »Enabler« für einen nachhaltigeren Betrieb gesehen werden. Zudem sind für ein realistisches Bild vor- und nachgelagerte Prozesse der Produktion wie die Herstellung der Werkzeuge und Maschinen selbstverständlich mit zu betrachten. So kann eine adaptive Prozesskette, in der Teilprozesse vollständig ausgetauscht werden, auch einen wertvollen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten.

Um auch zukünftig den steigenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit gerecht zu werden und Unternehmen gegenüber Krisen resilienter aufzustellen, sind weitere Entwicklungen in allen Teilbereichen wie der Werkstoff-, Maschinen-, Werkzeug- und Kühlschmierstoffentwicklung erforderlich. Dies wird umso deutlicher, wenn man davon ausgeht, dass schon in der näheren Zukunft die eingesetzte Energie »grün«, also etwa in Form von grünem Wasserstoff oder SAFs, bereitgestellt wird. Denn dies würde bedeuten, dass die dringendste Aufgabe nun die Reduzierung der eingesetzten Ressourcen und der durch die Produktion ausgestoßenen Schadstoffe ist.

Dimension Personal

Eine der wichtigsten Ressourcen in der Wertschöpfung eines jeden Unternehmens sind seine Mitarbeitenden. [SEIS20]. Gerade bei der Herstellung hochkomplexer und sicherheitskritischer Produkte für die Luftfahrt sind das individuelle Wissen und die langjährige Erfahrung der Mitarbeitenden entscheidend. Die Grundlage für eine resiliente Produktion ist die Qualifikation der Mitarbeitenden, die – gut ausgebildet und informiert – jederzeit anforderungsgerecht reagieren können. Ein unternehmensweites Wissensmanagement mit zentraler Sammlung von Wissen und Vorgehensweisen ist ein weiteres zentrales Element in der Dimension »Personal«. Auch die Unternehmenskultur nimmt Einfluss auf die Resilienz des Unternehmens.

Beim Umgang mit sich ändernden Erfordernissen und Entwicklungstendenzen muss die Organisation ihr momentanes Wissen berücksichtigen [..] «

ISO EN 9100 [DIN18]

Qualifikation des Personals

Die Entwicklung disruptiver Antriebskonzepte und die Fertigung sicherheitskritischer Komponenten für die Luftfahrt erfordert ein umfangreiches Fachwissen der Mitarbeitenden. Nur so kann eine effiziente und gleichzeitig qualitativ hochwertige Produktion unter Einhaltung der Luftfahrtanforderungen gewährleistet werden, die flexibel auf Prozessstörgrößen reagieren kann. Unternehmen sollten daher mit gezielter Weiterbildung die oft schon sehr hohe Leistungsfähigkeit und ausgeprägte Qualitätskultur der Mitarbeitenden weiter steigern. Entsprechend einer Studie der International Air Transport Association (IATA) empfehlen sich heute neben konventionellen Seminaren vor allem digitale Angebote wie E-Learnings, Virtual Classrooms oder Webinare [INTE21a]. Idealerweise werden die internen sowie externen Weiterbildungsmöglichkeiten mit den Mitarbeitenden in jährlich stattfindenden Gesprächen thematisiert, um langfristig eine synergetische Entwicklung der Qualifizierung des Personals mit Unternehmenszielen zu gewährleisten.

Wissensmanagement

In der hochspezialisierten Branche der Luftfahrt hat das Wissensmanagement zwei zentrale Funktionen: Einerseits dient es der unternehmensweiten Sammlung von individuellem Wissen und Erfahrungen der Mitarbeitenden, andererseits ist es eine grundlegende Anforderung der Zertifizierung nach der Norm DIN EN 9100 [DIN18]. Für den Aufbau von Resilienz liegen die Vorteile des zentralen Wissensmanagements auf der Hand: Gebündeltes Know-how und eine übersichtliche Darstellung, zum Beispiel in unternehmensinternen Wikis oder Apps, ermöglicht es den Mitarbeitenden, im Störfall schnell an passende Informationen zu kommen. Neben der Befähigung zur sicheren Problemlösung bei spontan auftretenden Ereignissen führt ein zentrales Wissensmanagement mit klar definierten und auffindbaren Standards und Verantwortlichkeiten zu weniger Fehlern während der Produktion und auf diesem Wege zu geringeren Produktionskosten. In der Fertigung neuer Komponenten für revolutionäre Antriebskonzepte befähigt ein zentrales Wissensmanagement die Mitarbeitenden dazu, Sicherheitsanforderungen für die neuen Komponenten schnell zu adaptieren. Eine domänenübergreifende digitalisierte Wertschöpfungskette als Single-Source-of-Truth ist dabei wünschenswert.

Unternehmenskultur

Unerlässlich für eine krisen- und zukunftssichere Ausrichtung des Unternehmens ist die gelebte Unternehmenskultur. Diese beschreibt die »Grundgesamtheit gemeinsamer Werte, Norme und Einstellungen, die Handlungen und das Verhalten der Organisationsmitglieder prägen« [LIES18]. Zur Herstellung von Resilienz sind eine hohe Transparenz und Agilität der einzelnen Akteure von hoher Bedeutung, die diese Werte idealerweise fest in der Unternehmenskultur verankert haben. Vor allem in der lebenszyklusübergreifenden Zusammenarbeit kann so die Effizienz über verschiedene Domänen hinweg, etwa zwischen Konstruktion, Fertigung und Qualitätssicherung, weiter gesteigert werden. Ein offener und kommunikativer Umgang auf gleichem Hierarchielevel aber auch mit den Führungskräften ist anzustreben. Dies fördert ein aktives Fehlermanagement, sodass sich Fehler kurzfristig beheben und langfristig vermeiden lassen. Nicht zuletzt ist für Unternehmen der Luftfahrt eine stabile Unternehmenskultur Voraussetzung für den Erfolg einer ganzheitlichen Digitalisierungsstrategie und die Entwicklung neuer, disruptiver Antriebskonzepte. Sie trägt zum bewussten Umgang zwischen den Mitarbeitenden bei und schafft so das Bewusstsein für die unternehmenseigenen Nachhaltigkeitsziele.

Referenzen

[AERO18] aeroTELEGRAPH: Die Listenpreise 2018 von Airbus, 2018. URL: https://www.aerotelegraph.com/die-listenpreise-2018-von-airbus [Stand: 15.03.2022]

[BAUE16] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0, 2016. URL: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Presse/Presseinformationen/2016/Juni/WGP_Standpunkt_Industrie_40.pdf [Stand: 12.04.2022]

[BERG20] Bergs, T.; Gierlings, S.; Augspurger, T.: Mit dem Digitalen Zwilling Prozessgrenzen überwinden. In: Bergs, T. et al. (Hrsg.): Internet of Production – Turning Data into Value. Statusberichte aus der Produktionstechnik 2020. Aachen: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT; Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, 2020, 81-113. DOI: 10.24406/IPT-N-589615

[BERG21] Bergs, T.; Gierlings, S.; Augspurger, T.; Ganser, P.; Barth, S.; Fricke, K.; Grünebaum, T.: Nachhaltige Produktion mit dem Digitalen Zwilling. In: Bergs, T. et al. (Hrsg.): 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2021. Internet of Production – Turning Data into Sustainability. Aachen: Apprimus Verlag, 2021, S. 119–150. DOI: 10.24406/ipt-n-640534

[BOHN19] Bohn, D.: Neue Verbrennungstechnologien in Gasturbinen-Brennkammern vor dem Hintergrund der Energiewende. In: ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (Hrsg.): ASUE Expertenkreis Gasturbinentechnik in Bremen, 25./26. Juni 2019. Tagungsband. Sammelband der Präsentationen, 2019, S. 33–45. URL: https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gasturbinen/2019/broschueren/ASUE_Expertenkreis-Gasturbinen_Tagungsband_Juni_2019.pdf [Stand: 25.04.2022]

[BOOS21] Boos, W.; Trauth, D.; Arntz, K.; Prümmer, M.; Niemitz, P.; Wilms, M.; Lürken, C.; Mayer, J.: Wettbewerbsfaktor Resilienz. Handlungsfelder für den krisensicheren Werkzeugbau, 2021. URL: https://www.ipt.fraunhofer.de/de/branchen/werkzeugbau/studien/studie-wettbewerbsfaktor-resilienz/download.html [Stand: 12.04.2022]

[BREN20] Brenken, B.: Faserverbundwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrt, 2020. URL: https://composites-united.com/branche/luftfahrt/ [Stand: 19.04.2022]

[BRUN18] Brundage, M. P.; Bernstein, W. Z.; Hoffenson, S.; Chang, Q.; Nishi, H.; Kliks, T.; Morris, K. C.: Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. In: Journal of cleaner production, 2018, Nr. 187, S. 877–892. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.187

[BUND22] Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V. (BDLI): Annual Report 2021. Branchendaten der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie. URL: https://www.bdli.de/sites/default/files/2022-06/Branchendaten_2021_D_v4.pdf [Stand: 06.07.2022]

[CARB18] carbon-connect AG: CO2-Bilanz (corporate carbon footprint), 2018. URL: https://www.carbon-connect.ch/media/filemanager/casestudy/corporate-carbon-footprint-carbon-connect-ag-1.pdf [Stand: 12.04.2022]

[DEUT20] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): Zero Emission Aviation – Emissionsfreie Luftfahrt, 2020. White Paper der deutschen Luftfahrtforschung. URL: https://www.dlr.de/content/de/downloads/2020/white-paper-zero-emission-aviation.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Stand: 12.04.2022]

[CFM19] CFM International: Peach Aviation Places $294 Million LEAP-1A Engine Order. First Leap Engine Operator in Japan, 2019. URL: https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/peach-aviation-places-294-million-leap-1a-engine-order/ [Stand: 15.03.2022]

[DELO11] Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft: Neue Standards für die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen, 2011. URL: https://www.iasplus.com/de/news/2011/October/neue-standards-fuer-die-berichterstattung-ueber-treibhausgasemissionen [Stand: 12.04.2022]

[DILB21] Dilba, D.: Mit Wasserstoff in die Zukunft. In: Aero-Report, 7. Jg., 2021, Nr. 1, S. 4–11

[DIN18] DIN EN 9100:2018-08 (2018): DIN EN 9100:2018-08, Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung; Deutsche und Englische Fassung EN 9100:2018. DOI: 10.31030/2853003

[DIN21a] DIN EN ISO 14040 (2021): DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze

und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. DOI: 10.31030/3179655

[DIN21b] DIN EN ISO 14044 (2021): DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. DOI: 10.31030/3179656

[EURO11] European Union: Flightpath 2050. Europe's Vision for Aviation. Maintaining Global Leadership & Serving Society's Needs. Report of the High Level Group on Aviation Research, 2011. URL: https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/296a9bd7-fef9-4ae8-82c4-a21ff48be673 [Stand: 12.04.2022]

[FRIC21] Fricke, K.; Gierlings, S.; Ganser, P.; Seimann, M.; Bergs, T.: A Cradle to Gate Approach for Life-Cycle-Assessment of Blisk Manufacturing. In: Proceedings of ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. June 7-11, 2021, virtual, online. Volume 7: Industrial and cogeneration, manufacturing materials and metallurgy. New York, N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers, 2021, No. V007T17A009. DOI: 10.1115/GT2021-59479

[GANS21] Ganser, P.; Venek, T.; Rudel, V.; Bergs, T.: DPART – A Digital Twin Framework for the Machining Domain. In: MM Science Journal, 2021, Special Issue HSM 2021, S. 5134–5141. DOI: 10.17973/MMSJ.2021_11_2021168

[GLOB21] Global Aerospace & Defense Research Team at Frost & Sullivan: Global Commercial Air Travel Growth Opportunities. Strategic Partnering Among Airlines and Digitalization at Airports will Prove Critical in Maintaining Costs During Recovery from COVID-19's Impact, 2021. URL: https://store.frost.com/global-commercial-air-travel-growth-opportunities.html [Stand: 12.04.2022]

[GRIE17] Grieves, M.; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A. (Hrsg.): Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. New Findings and Approaches: Springer, 2017, S. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4

[HAME03] Hamel, G.; Välikangas, L.: The Quest for Resilience. In: Harvard Business Review, 81. Jg., 2003, Nr. 9, S. 52–63

[HANK19] Hanke, T.: Airbus stellt Produktion des Riesenfliegers A380 ein, 2019. URL: https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/weltgroesster-passagierjet-airbus-stellt-produktion-des-riesenfliegers-a380-ein/23985520.html [Stand: 19.04.2022]

[INTE21a] International Air Transport Association (IATA): Workforce skills & training to fuel the revitalization of the aviation industry. The view of HR decision makers, 2021. URL: https://airtravellersassociation.org/wp-content/uploads/2021/07/IATA-Training-Workforce-Skills-Report-July-2021-IATA.pdf [Stand: 12.04.2022]

[INTE21b] ISO 23247-2 (2021): Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 2: Reference architecture

[KELL16] Kellner, T.: GE Started Testing The World's Largest Jet Engine, 2016. URL: https://www.ge.com/news/reports/video-ge-started-testing-the-worlds-largest-jet-engine [Stand: 22.04.2016]

[KROP19] Kropp, A.: Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019. DOI: 10.1007/978-3-658-23072-2

[KRÜG10] Krüger, W.; von Schubert, B.; Wittberg, V.: Unternehmerische Nachhaltigkeit als Leitmotiv in einer neuen Wirtschaftsordnung. In: Krüger, W.; von Schubert, B.; Wittberg, V. (Hrsg.): Die Zukunft gibt es nur einmal! Plädoyer für mehr unternehmerische Nachhaltigkeit. Wiesbaden: Gabler Verlag; Springer Fachmedien, 2010, S. 11–21. DOI: 10.1007/978-3-8349-8967-3_1

[LIES18] Lies, J.: Unternehmenskultur, 2018. URL: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/unternehmenskultur-49642/version-272870 [Stand: 12.04.2022]

[MARZ15] Marz, N.; Warren, J.: Big data. Principles and best practices of scalable real-time data systems. Shelter Island, NY: Manning, 2015

[NOWA22] Nowak, A.; Leymann, F.: Soziale Nachhaltigkeit, 2022. URL: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/soziale-nachhaltigkeit-53451/version-276540 [Stand: 12.04.2022]

[OTT08] Ott, K.; Döring, R.: Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit. (Reihe: Beiträge zur Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit, 1). 2., überarb. und erw. Aufl. Marburg: Metropolis-Verlag, 2008

[RAIN22] Rains, T.: Die Lufthansa hat Boings 777X mit faltbaren Flügeln bestellt — so sieht der neue Riesen-Flieger aus, 2022. URL: https://www.businessinsider.de/wirtschaft/mobility/die-lufthansa-hat-boeings-777x-mit-faltbaren-fluegeln-bestellt-so-sieht-der-neue-riesen-flieger-aus-d/#:~:text=Versand%2C%20Datenschutz%20%26%20Widerruf-,Die%20

Boeing%20777X%20ist%20das%20neue%20Aush%C3%A4ngeschild%20des%20Herstellers%20f%C3%BCr,2023%20soll%20sie%20zugelassen%20werden [Stand: 14.03.2022]

[SCHU21] Schuh, G.; Breit, S.; Echterfeld, J.; Graberg, T.; Kreutzer, R.; Manz, S.; Michaelis, M.; Patzwald, M.; Pieper, T.; Schön, N.; Volm, M.: Value Capture - Datengetriebene Geschäftsmodelle erfolgreich in nachhaltig produzierenden Unternehmen implementieren. In: Bergs, T. et al. (Hrsg.): Internet of Production. Turning Data into Sustainability. Aachen: Apprimus Verlag, 2021, S. 67–90. DOI: 10.24406/ipt-n-640534

[SEIS20] Seisreiner, A.: Personalplanung. In: Wagner, D. (Hrsg.): Praxishandbuch Personalmanagement. (Reihe: Haufe Fachbuch. 4344). 2. Aufl. Freiburg, München, Stuttgart: Haufe Group, 2020, S. 21–61

[STEI19] Steibel, J.: Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation. In: American Ceramic Society Bulletin, 98. Jg., 2019, Nr. 3, S. 30–33

[THUN20] Thun-Hohenstein, L.; Lampert, K.; Altendorfer-Kling, U.: Resilienz – Geschichte, Modelle und Anwendung. In: Zeitschrift für Psychodrama und Soziometrie, 19. Jg., 2020, Nr. 1, S. 7–20. DOI: 10.1007/s11620-020-00524-6

[TRAU22] Trauth, D.; Bergs, T.; Feuerhack, A.; Gülpen, C.; Janzen, S.; Maass, W.; Mattfeld, P.; Niemitz, P.; Piller, F.: #SPAICER —The Vision. AI-based Resilience Management in Production Engineering, 2022. URL: https://medium.com/spaicer-resilient-manufacturing/spaicer-ai-based-resilience-management-in-production-engineering-1d0c39588a2f [Stand: 12.04.2022]

[WALS21] Walsh, W.: Annual Review 2021, 2021. URL: https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a-4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2021.pdf [Stand: 12.04.2022]

Autoren

Dr.-Ing Sascha Gierlings
Leiter Geschäftsbereich Turbomaschinen
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Prof. Dr.-Ing Thomas Bergs, MBA
Mitglied des Direktoriums
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Philipp Ganser
Abteilungsleiter Hochleistungszerspanung
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Daniel Heinen
Geschäftsfeldleitung Turbomaschinen
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Rainer Horstkotte
Geschäftsfeldleitung Werkzeugbau
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Experten

Dr.-Ing Martin Seimann
Leiter Prototypenfertigung
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Dr.-Ing Henning Janssen
Abteilungsleiter Faserverbund- und Lasersystemtechnik
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Kilian Fricke
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Hochleistungszerspanung
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Kontakt

Dr.-Ing. Sascha Gierlings
Leiter Geschäftsbereich Turbomaschinen
Telefon +49 241 8904-779
sascha.gierlings@ipt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
www.ipt.fraunhofer.de

DOI: 10.24406/ipt-n-649134