

DYNAMISIERUNG DER GESTALTUNGSPROZESSE VON FLUGTRIEBWERKEN

P. Jeschke,
Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen
RWTH Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Im hier vorliegenden Artikel wird aufgezeigt, dass die historisch seit Mitte des letzten Jahrhunderts gewachsenen Zulassungsverfahren von Flugtriebwerken zum weitaus größten Teil auf Zulassungstests basieren und dass diese zwangsläufig zum Einfrieren der Gestaltungsprozesse (Design, Serienfertigung, Reparatur, ...) der Flugtriebwerke führen. Die aufwändigen und teuren Zulassungstests führen demnach zu extrem langen Innovationszyklen und damit zu technologisch veralteten Triebwerksflotten. Die heute verfügbaren leistungsstarken numerischen Verfahren gepaart mit der siebzigjährigen Erfahrung in der zivilen Luftfahrt lassen aber einen veränderten Zulassungsprozess zu und ermöglichen so eine Dynamisierung der Gestaltungsprozesse. Ein solcher veränderter Zulassungsprozess wird im Folgenden beschrieben und es werden beispielhaft die hierfür noch zu entwickelnden ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen genannt. Die mit diesem veränderten Zulassungsprozess möglichen kurzen Innovationszyklen sind nötig, um den zukünftigen anspruchsvollen wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen der zivilen Luftfahrt zu entsprechen.

1. EINLEITUNG

Der Luftverkehr ist der am schnellsten wachsende Verkehrsträger, für den bis zum Jahr 2020 eine Verdopplung der Passagierkilometer gegenüber dem Jahr 2000 vorausgesagt wird. Gleichzeitig fordert die strategische Forschungsagenda des Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE) für den Luftverkehr im Jahr 2020 eine Reduktion der CO₂ Emissionen um 50% gegenüber dem Jahr 2000. Hierzu hat sich die europäische Luftfahrtindustrie verpflichtet. Es besteht also ein sehr großer Bedarf, Innovationen im Triebwerksbau schnell und effizient umzusetzen.

Allerdings gelten für die Luftfahrt höchste Sicherheitsanforderungen, die von den Zulassungsbehörden (z.B. der European Aviation Safety Agency, EASA) festgelegt sind und die ausgehend von den Ursprüngen Mitte des letzten Jahrhunderts großteils historisch gewachsen sind. Aufgrund der damaligen fehlenden Möglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung basieren die zur Zulassung eines Triebwerkes nötigen Nachweise der Triebwerksanforderungen vorwiegend auf empirischen Methoden, nämlich auf Triebwerkstests. Hinsichtlich der Flugsicherheit haben sich diese empirischen Nachweise sehr bewährt. Allerdings sind sie sehr teuer, benötigen viel Zeit und verhindern, dass technische Neuerungen schnell eingeführt werden können. Dies zeigt sich insbesondere daran, dass die in den letzten Jahrzehnten mit numerischen Verfahren entwickelten modernen Beschauelungen nur in geringem Umfang nachträglich in ältere Triebwerke integriert wurden, da hierzu – sofern es sich um signifikante Veränderungen an sicherheitskritischen Bauteilen handelt – jeweils eine zumindest teilweise Wiederholung der teuren Zulassungstests erforderlich ist. Somit treibt z.B. das 1970 erstmalig zugelassene Triebwerk CF6 trotz zahlreicher

Nachzertifizierungen noch heute Teile der Airbus- und Boeing-Flugzeugfamilie mit einer Basistechnologie an, die in einer Zeit entwickelt wurde, als es noch nicht einmal elektronische Taschenrechner gab. Es bleiben also technologisch bereits realisierte Verbesserungspotentiale weitgehend ungenutzt, da eine wirtschaftliche Umsetzung mit derzeitigen Zertifizierungsverfahren nicht möglich ist.

Das ist so, da die am Gesamttriebwerk durchgeführten Zulassungstests ausschließlich die Integrität der getesteten Bauteile nachweisen, im Allgemeinen ohne eine Aussage über die funktionalen Zusammenhänge zwischen Bauteilgestaltung und Bauteileigenschaften zu machen. Die konsequente Folge ist, dass nach erfolgreichem Test die Werkstoffeigenschaften, Geometrien und Fertigungsmethoden entsprechend der Testbauteile in einem engen Toleranzband eingefroren werden, da unbekannt ist, wie sich Veränderungen auswirken und ob damit noch die Integrität des Triebwerkes gewährleistet ist. Dieses Einfrieren der Bedingungen (*Fixed Process*) verhindert neben der Einführung von neuen Technologien in bestehende Triebwerksgenerationen insbesondere auch eine adaptiv korrigierende Serienfertigung. Da alle Fertigungsschritte einzeln eingefroren sind, dürfen nämlich auch kleinere Abweichungen in der frühen Fertigungsphase nicht durch gezielte Maßnahmen in den nachfolgenden Fertigungsphasen kompensiert werden. Dies führt in vielen Fällen zu technisch unnötig hohen Ausschussraten oder unnötig vorsichtiger Fertigung und damit zu unangemessen hohen Serienfertigungskosten.

Daher ist das in diesem Artikel vorgeschlagene Ziel, durch Bereitstellung der *funktionalen Zusammenhänge* zwischen der Bauteilgestaltung (Design, Herstellungsprozess, ...) und den Bauteileigenschaften (Lebensdauer, Wirkungsgrad, ...) die empirischen Zulassungstests weitgehend zu ersetzen, um somit die Voraussetzung zu schaffen, dass die neuen technologischen Erkenntnisse

schnell in Innovationen am Triebwerk umgesetzt werden können.

Wenn das genannte Ziel erreicht wird, kann die Entwicklung und Herstellung der Triebwerke in wesentlichen Bereichen der Wertschöpfungskette dynamisiert werden: Zum einen wird eine Dynamisierung in der *langen Zeitskala* möglich, indem die über Jahre gereiften technologischen Fortschritte in bestehende Triebwerksgenerationen integriert werden können (Abb. 4), und zum anderen eine Dynamisierung in der *kurzen Zeitskala* (Abb. 5), indem eine adaptiv korrigierende Serienfertigung, das heißt eine individuell angepasste Fertigung, realisiert werden kann.

Hierfür müssen allerdings noch erhebliche ingenieurwissenschaftliche Aufgaben bewältigt werden. So müssen noch in vielen Disziplinen die funktionalen Zusammenhänge so sicher bereitgestellt werden, daß sie dem Flugsicherheitsanspruch genügen. Um dies zu erreichen, werden diese funktionalen Zusammenhänge idealerweise vornehmlich deterministisch, also unter Zuhilfenahme von physikalisch basierten Methoden, entwickelt. In Summe könnte ein numerisches und physikalisch-deterministisches Triebwerksmodell den Tauglichkeitsnachweis liefern. Da die physikalischen Gesetze im Gegensatz zu den bisherigen empirischen Nachweisen universelle Gültigkeit besitzen, können die Erkenntnisse vergangener Zulassungen zur Schärfung bzw. zum Training der Modelle verwendet werden. Dieses Training der funktionalen Zusammenhänge, auf das wir nun nach vielen Jahrzehnten Flug Erfahrung zurückgreifen können, überkompensiert wahrscheinlich die Unsicherheit der physikalischen Modelle und führt somit zur einer zumindest gleichgroßen Flugsicherheit wie diejenige der Zulassungstests mit „binärem Ergebnis“ (Test bestanden oder nicht) ohne Aussage über das Warum und die Robustheit des Ergebnisses.

Im vorgeschlagenen Fall liefern die trainierten, theoretischen und physikalischen Modelle den Tauglichkeitsnachweis. Hierfür müssen dann aber auch konsequenterweise neuartige Prozessfähigkeits- und Wissensmanagementmethoden, deren Qualitätssicherung flugsicherheitstauglich ist, entwickelt werden.

Um den hiermit beschriebenen Weg der Dynamisierung der Gestaltungsprozesse von Flugtriebwerken zu ermöglichen, müssen demnach diese drei ingenieurwissenschaftlichen Aufgaben, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden, gelöst werden: A) Bereitstellung der funktionalen Zusammenhänge, B) Bereitstellung der Methoden der langen und kurzen Dynamisierung und C) Schaffung der Prozessfähigkeit und Prozesssicherheit.

Obwohl die Technologie zur Erreichung der ACARE Ziele 2020 wahrscheinlich vorhanden sein wird (siehe Trendlinie in Abb. 1), wird der Großteil der Flugzeugflotte in 2010 ohne die hier diskutierte Dynamisierung noch mit Triebwerken angetrieben werden, deren Verbrauch weit höher als technologisch möglich in 2020, nämlich im Bereich der jeweiligen Triebwerkserstzertifizierung, liegen wird. Somit können die zukünftigen anspruchsvollen ökologischen Anforderungen der zivilen Luftfahrt nur dann erreicht werden, wenn die Innovationszyklen wie

beschrieben deutlich verkürzt und damit die Triebwerksflotten aktuell gehalten werden können.

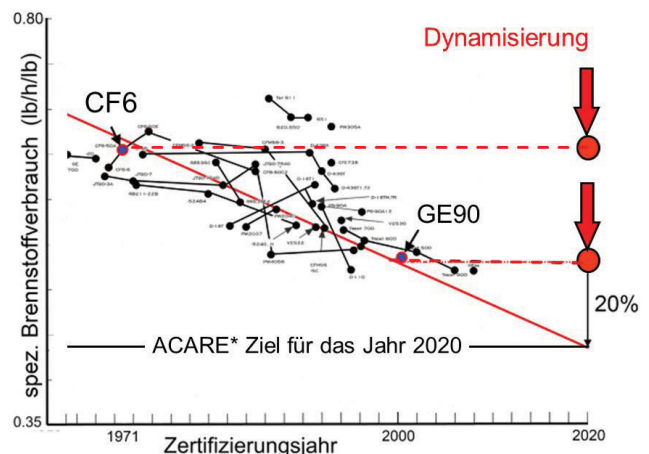


Abbildung 1: Brennstoffverbräuche in Abhängigkeit der Zertifizierungsjahre. Durch kurze Innovationszyklen (=Dynamisierung) kann die gesamte Triebwerksflotte die Verbrauchsziele erreichen.

2. BISHERIGER STAND UND MOTIVATION

Triebwerke werden Stand heute vereinfacht zusammengefasst vornehmlich aero-, thermo- und strukturmechanisch entwickelt und noch vor der Zertifizierung verschiedenen Komponenten- und einigen wenigen Triebwerkstests unterzogen. Oft simulieren die Triebwerkshersteller hierbei numerisch und in einfacheren Tests auch experimentell die späteren Verhältnisse der teuren und zerstörerischen Zulassungstests, um ein Versagen auszuschließen. Das so fertig entwickelte und vorab getestete Triebwerk wird dann im Rahmen der Zertifizierung verschiedenen, zum Teil genormten und sehr teuren Zulassungstests („Performance Test“, „Stress Test“, „150h Block Test“, „Initial Maintenance and Inspection Test“, ...) zum Nachweis der aerodynamischen Stabilität, der Dauerfestigkeit, der Inspektionsintervalle etc. unterzogen. Der Nachweis einer anforderungsgerechten Beschaffenheit der Bauteile wird über den sogenannten „First Article Inspection Report“ (FAIR) geliefert und dokumentiert. Im Erfolgsfall erhält der Triebwerkshersteller damit die Zulassung, aber nur für genau diese getestete und freigegebene Konfiguration. Damit sind für die gesamte Triebwerkslebensdauer von typischerweise etwa vierzig Jahren die Geometrien, Rohmaterialien, Fertigungsmethoden und Qualitätssicherungsverfahren samt aller Detailspezifikationen de facto eingefroren („Fixed Process“), da jede Änderung neue Zulassungstests erfordert, was, von Ausnahmen abgesehen, aufgrund der hohen Kosten nicht gemacht wird. Siehe Abbildung 2.

So wurden z.B. die heute noch in großer Zahl betriebenen zivilen Triebwerke CF6 und CFM56 in den frühen 70er bzw. 80er Jahren praktisch ohne den Einsatz numerischer Berechnungsverfahren entwickelt, da es die hierfür nötigen Computer noch nicht gab. Der „Fixed Process“ führt dazu, dass diese technisch veralteten Triebwerke bis heute weitgehend nach ihren ursprünglichen Geometrien und Fertigungsmethoden in Serie hergestellt werden.

In Abbildung 3 sind z.B. die Fanschaufeln des CF6 mit denen der Mitte der 90er Jahre zugelassenen und vergleichsweise modernen Triebwerks GE90 verglichen. Die Materialien und Geometrien sind erheblich unterschiedlich, was in erster Linie durch das höhere Technologieniveau der 90er Jahre zu erklären ist. Der spezifische Brennstoffverbrauch und damit natürlich auch der CO₂-Ausstoß sind demzufolge beim GE90 erheblich geringer als beim CF6-Triebwerk, wodurch das im CF6 ungenutzte Potential quantifiziert ist. Wie in Abbildung 4 skizziert, könnte durch Dynamisierung der laufend größer werdende technologische *Fortschrittsraum* auch für die alten Triebwerke erschlossen werden.

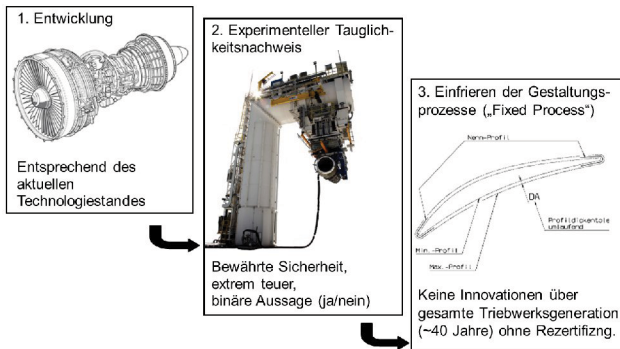


Abbildung 2: Klassischer Zulassungsprozess und daraus zwangsweise folgendes Einfrieren der Gestaltungsprozesse.

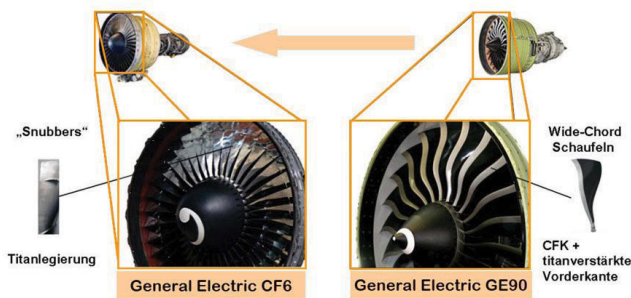


Abbildung 3: Technologieunterschied zwischen Anfang der Siebziger Jahre (-> CF6 Erstzulassung) und Mitte der Neunziger Jahre (-> GE90 Erstzulassung), den es in Zukunft gilt laufend wett zu machen durch *Dynamisierung in der langen Zeitskala*.

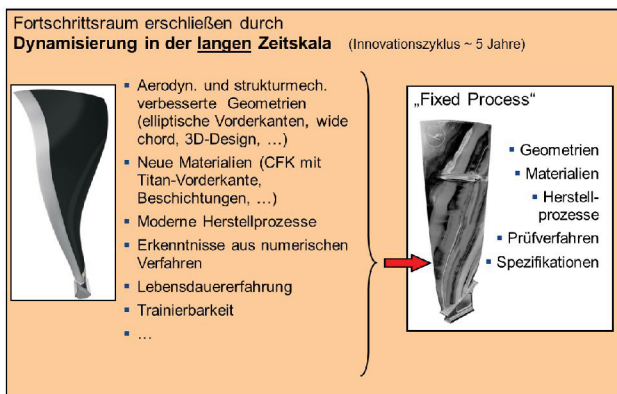


Abbildung 4: Erschließen des laufend größer werdenden technologischen Fortschrittraumes durch *Dynamisierung in der langen Zeitskala*.

Gleichermaßen verhindert der „Fixed Process“ auch die Einführung von vergleichsweise kleinen Änderungen. Dies soll an folgendem Beispiel deutlich gemacht werden: Wird die Fertigung einer Hochdruckverdichterschaufel z.B. an einen Unterlieferanten vergeben, der diese im Gegensatz zum FAIR nicht fräst, sondern die Geometrie durch elektrochemisches Abtragen (Electro-Chemical-Machining, ECM) herstellen will, so ist das nur dann ohne Zulassungstests möglich, wenn es unzweifelhaft zu einer Verbesserung aller Bauteileigenschaften führt. Eine Veränderung der Geometrie hin zu einem variablen Übergangsradius zwischen Schaufelblatt und Schaufelfuß, der mehrkostenfrei durch ECM zu fertigen wäre, kann nicht durchgeführt werden, da ein numerischer Nachweis der zu erwartenden Verbesserungen nicht anerkannt und ein Zulassungstest nicht wirtschaftlich ist. Die Folge ist, dass die Geometrie nicht verändert und die Prozesskette nicht adaptiert werden kann und somit die Vorteile eines variablen Übergangsradius ungenutzt bleiben. Gleiches gilt für die Einführung einer sogenannten elliptischen Vorderkante. Es muss nach heutigem Stand der Dinge paradoxerweise mit erheblichem Mehraufwand durch ECM eine runde Vorderkante gefertigt werden, da die mit dieser Technik viel leichter zu fertigende und insgesamt bessere elliptische Vorderkante nicht anerkannt wird. Somit bleibt die ursprüngliche vom Designer eventuell vor vielen Jahren und vor dem Hintergrund eines Fräsprozesses festgelegte Geometrie auch für den heutigen ECM-Unterlieferanten bindend und die entsprechenden Potentiale bleiben ungenutzt.

Noch deutlich größeres Potential ergäbe sich, wenn der „Fixed Process“ durch ein „intelligentes“ und adaptives Verändern der Prozesskette während der Serienfertigung ersetzt werden könnte. Wenn z.B. die Oberflächenrandzone mit Korngrenzflächenbeeinflussung nach dem Fräsen tiefer ist als von der im FAIR festgelegten Spezifikation erlaubt, muss das Bauteil auch heute noch zu Ausschuss erklärt werden, selbst wenn dies nach heutigem Kenntnisstand keinen Einfluss hat und/oder durch einen nachfolgenden Prozess (z.B. Kugelstrahlen) behoben werden könnte. Auch in diesem Zusammenhang könnten hinreichend präzise und robuste theoretische Modelle die eventuell vor Jahrzehnten festgelegten Schliffbilder an Bauteilproben zur Erfassung der fertigungsbedingten Randschichtbeeinflussung ersetzen und zudem prädiktiv zeigen, um welchen Betrag die Schwingfestigkeit durch die im Fertigungsprozess aufgetretene Abweichung verändert wird. Verbunden mit einer lokalen Bewertung, die berücksichtigt, dass die Spannungsmaxima je nach Schwingungseigenform nur an bestimmten Stellen im Schaufelblatt, an denen das Gefüge durch die Fertigung eventuell kaum beeinflusst wird, auftreten, könnte eine solche Schaufel direkt weiterverwendet bzw. durch eine geeignete Nachbearbeitung „gerettet“ werden. Siehe Abbildung 5. Die für eine solche adaptive Serienfertigung notwendigen Modelle und Methoden samt ihrer Prozess- und Qualitätssicherungsmaßnahmen sind heute nicht verfügbar und, müssten bereitgestellt werden.

Die adaptive Serienfertigung ist insbesondere für die seit wenigen Jahren neu eingeführten Integralbauteile, wie z.B. die „Blink“ („Blade-Integrated-Disk“), „Bling“ („Blade-Integrated-Ring“) oder „Leitschaufelcluster“, bei denen jeweils viele Schaufeln in einem einzelnen Gesamtbauteil integriert sind, von entscheidender Wichtigkeit. Eine

typische Hochdruckverdichter Blisk hat etwa 100 Schaufeln. Nach heutigen Design- und Zulassungsprozessen ergibt sich eine Serienprozessausschussrate von typischerweise 1-3%, was bei einer klassischen Schaufelreihe bestehend aus Einzelschaufeln kein signifikantes Problem ist. Bei einer Blisk, bestehend aus 100 Schaufeln, müsste unter den genannten Bedingungen aber jede Blisk zu Ausschuss erklärt werden. Deshalb haben die Triebwerkshersteller heute keine andere Möglichkeit, als die Prozesse an vielen Stellen im Wertschöpfungsprozess weit unterhalb der technischen Leistungsgrenze zu betreiben - sie realisieren in der Praxis eine extrem vorsichtige und kostspielige „Null-Ausschuss“ Fertigung. Erst das im Rahmen dieses Artikel vorgeschlagene und zu entwickelnde Grundlagenverständnis und die Formulierung funktionaler Zusammenhänge sowie der zugehörigen Herstell- und Qualitätssicherungsprozesse schaffen die Voraussetzung für adaptive Serienfertigungsverfahren und tragen damit erheblich zur Effektivität der Herstellung solcher Integralbauteile bei.

Eine zusammenfassende Würdigung der Literatur zeigt, dass einzelne physikalische Zusammenhänge erforscht sind. Dies gilt für die Aerodynamik der Turbomaschinenbeschaufelung mit ihren Gestaltungseigenschaften, wie die der Schaufelprofilierung, der Vorder- und Hinterkantenformen, der Übergangsradien usw. Gleiches gilt auch für die Werkstoff- und Strukturmechanik der Randzonen sowie die Lebensdaueranalysen von Scheiben und Schaufeln z.B. unter High-Cycle- und Low-Cycle-Fatigue Belastungen. Ebenso sind in der Produktionswissenschaft die Wirkzusammenhänge beispielsweise beim Fräsen, Electro-Chemical-Machining (ECM) und Schleifen von Triebwerkskomponenten großteils erforscht. Dies gilt auch für die Bewertung und Risikoabschätzung von Herstellungsprozessketten. Dieser vorliegende Kenntnisstand aus der Literatur ist eine sehr gute Basis, auf die aufgebaut werden kann.

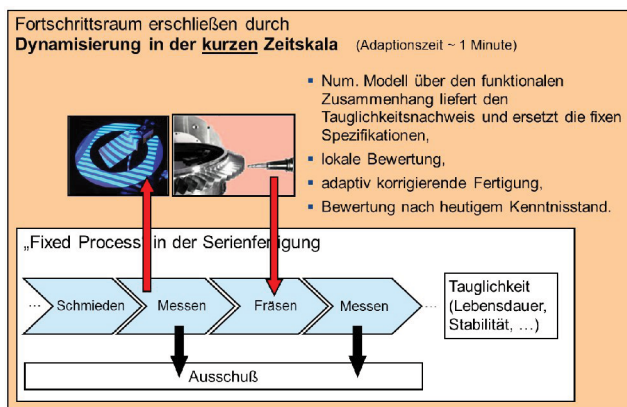


Abbildung 5: Adaptive Serienfertigung und damit mögliche Dynamisierung in der kurzen Zeitskala.

Großteils unerforscht ist allerdings die Verbindung dieser Erkenntnisse zur Erreichung der hier angestrebten Dynamisierung der Gestaltungsprozesse. Beispielsweise existieren keine Untersuchungen, die den Zusammenhang von geometrischen Fehlstellen, die in der Serienfertigung entstehen und deren Topologie abhängig vom jeweiligen Fertigungsverfahren ist, und den Gesamttriebwerkeigenschaften wie z.B. der

Scheibenlebensdauer oder dem Pumpgrenzabstand herstellen. Darüber hinaus sind die aus der Literatur bekannten funktionalen Zusammenhänge nicht so formuliert, dass sie systematisch mit Hilfe der historischen Erfahrung trainiert werden könnten. Außerdem existieren keine schnellen Verfahren, die innerhalb weniger Sekunden während der Serienfertigung eine Analyse der Bauteileigenschaften und eine adaptive Korrektur der nachfolgenden Fertigungsprozesse erlauben. Des Weiteren sind die nötigen Methoden zur Gewährleistung der Prozesssicherheit einer adaptiven Serienfertigung, die den strengen Anforderungen einer Zulassungsbehörde genügen, unerforscht. Weitere Beispiele sind im folgenden Kapitel aufgeführt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Ziel des im Folgenden vorgestellten Konzeptes darin besteht, die bestehenden Kenntnisse wissenschaftlich abgesichert zu erweitern, um so die Voraussetzungen zu schaffen, die industriellen Gestaltungsprozesse von Flugtriebwerken vollständig neu, nämlich dynamisch auszulegen.

3. INGENIEURWISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

Um den zuvor beschriebenen Weg der Dynamisierung der Gestaltungsprozesse von Flugtriebwerken zu ermöglichen, müssen zumindest in diesen drei Bereichen noch die entsprechenden ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen geschaffen werden:

- Bereitstellung der funktionalen Zusammenhänge
- Bereitstellung der Methoden der langen und kurzen Dynamisierung
- Schaffung der Prozessfähigkeit und Prozesssicherheit

Im Bereich A müssen die funktionalen Zusammenhänge grundlegend erforscht und die identifizierten Lücken der Literatur geschlossen werden. Im Projektbereich B müssen die Methoden zur adaptiven Serienfertigung und zur Einführung von neuen Technologien in bestehende Triebwerke geschaffen werden. Aufgrund der großen Veränderungen in den Gestaltungsprozessen und dem nach wie vor sehr hohen Flugsicherheitsanspruch müssen im Bereich C neue Methoden zur Sicherstellung der Prozessfähigkeit und zur wirtschaftlichen Bewertung neuer Prozessabläufe erforscht und in Modellen abgebildet werden. Der Projektbereich C übernimmt damit eine integrierende Aufgabe für die Bereiche A und B.

Um die Diskussion im Folgenden zu vereinfachen, sollen die möglichen Lösungsansätze exemplarisch an einem Hochdruckverdichter (HDV) eines typischen zivilen Großraumflugzeuges diskutiert werden. In einem solchen HDV sind mit den Blisen die Bauteile mit den stringentesten Lebensduranforderungen vertreten. Zudem könnte deren Serienfertigung am meisten von einer adaptiven Fertigung profitieren. Des Weiteren ist die aerodynamische Stabilität des Triebwerkes großteils durch das Verhalten des HDVs bestimmt. Auch in der heute angewandten Praxis werden im Rahmen der Zulassungstests u.a. die Modulcharakteristika ermittelt, in

dem die Testläufer unter den für das jeweilige Modul stringentsten Bedingungen betrieben werden. Demnach ist der Nachweis der Tauglichkeit des HDV-Moduls ein in weiten Grenzen separater Baustein für das Gesamttriebwerk und damit gut als Exempel geeignet.

3.1. Bereich A: Bereitstellung der funktionalen Zusammenhänge

Die funktionalen Zusammenhänge im Bereich A (siehe Abb. 6) sollen vornehmlich deterministisch, also unter Zuhilfenahme von physikalisch basierten Methoden und nur zum geringeren Anteil durch empirische und probabilistische Ansätze erstellt werden. Sie sollen z.B. den Zusammenhang zwischen den freien aerodynamischen Designvariablen, die die Schaufelgeometrie beschreiben (Schaufelprofil, Vorder- und Hinterkantenradien, Übergangsradien, 3D-Gestalt, ...), und den daraus resultierenden Eigenschaften (Gitterverlust, Profilverlust, Sekundärverlust, ...) herstellen. Dies ist für die optimalen Sollgeometrien, die so in der Designphase festgelegt werden, in weiten Teilen bereits erforscht. Der vorhandene heutige Wissensstand ist jedoch bei weitem nicht ausreichend, um hierauf aufbauend eine adaptive Serienfertigung zu realisieren. Um dies zu ermöglichen, müssen insbesondere die Auswirkungen von kleinen Fertigungsabweichungen (Formtoleranzabweichungen am Profil und an den Vorder- und Hinterkanten sowie an den Übergangsradien, Welligkeiten und lokale Fehlstellen (z.B. verursacht durch Kratzer), ...) in ihrer physikalischen Wirkung im Detail analysiert und die Methoden zur Erfassung der i.d.R. kleinen Effekte entwickelt werden. Auf diesem Gebiet wurden jedoch bisher außer im Bereich des aerodynamischen Einflusses der Oberflächenrauigkeit nur sehr wenige Forschungen durchgeführt. Auch sind keine multidisziplinären Untersuchungen, wie sie hier vorgeschlagen werden, bekannt. So könnte zum Beispiel die Topologie von Fehlstellen über einen funktionalen Zusammenhang in Verbindung mit den Fertigungsparametern gebracht werden und deren Auswirkungen multidisziplinär, also sowohl aerodynamisch wie auch struktur- und werkstoffmechanisch bestimmt werden. Nicht zuletzt müssen diese Funktionale auch noch trainierbar und prozesssicher nach dem Maßstab einer Zulassungsbehörde gestaltet werden. Dies geht in Summe deutlich über den bisherigen Kenntnisstand hinaus.

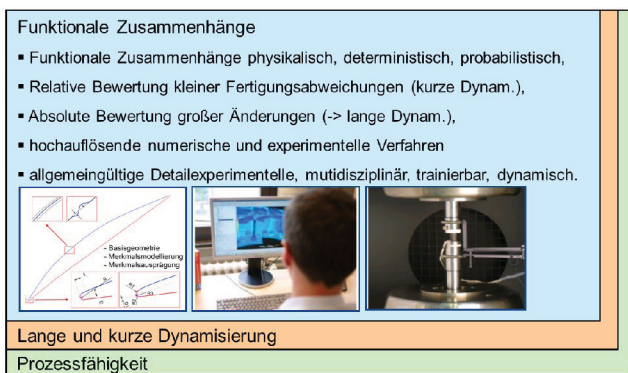


Abbildung 6: Herausforderungen bei der Bereitstellung der funktionalen Zusammenhänge.

Diese grundlegende Erforschung kleinskaliger aerodynamischer Effekte ist für die adaptive Fertigung ausgesprochen wichtig, da durch sie die Fertigungsabweichungen bewertet werden. So könnten mit Hilfe hochauflösender Methoden die Grundlagen für das Verständnis und die funktionale Beschreibung der auftretenden Strömungsphänomene geschaffen werden. Hierzu zählen im Bereich des Experimentes die Particle Image Velocimetry (PIV) Technik im stereoskopischen und tomographischen Aufbau, deren mehrdimensionale Analysen durch die punktuelle Laser Doppler Anemometrie (LDA) Messtechnik ergänzt werden könnte. Im Bereich der Numerik ist es notwendig, Grobstruktursimulationen durchzuführen, da für die detaillierte Erfassung der kleinskaligen Phänomene die Reynoldsgemittelten Navier-Stokes (RANS) Gleichungen wahrscheinlich nicht verwendet werden können. Gleichzeitig können aber gerade nur diese RANS-Verfahren die integrale Verdichteraerodynamik, die letztendlich die Tauglichkeit des Moduls bestimmt, mit angemessenem Aufwand erfassen. Hierzu muss das Zusammenspiel der kleinskaligen und großskaligen Effekte, welches in Turbomaschinenanwendungen weitgehend unerforscht ist, verstanden werden. Ähnliches gilt für die Erfassung von starken Off-Design Vorgängen, insbesondere beim sogenannten Pumpvorgang, dessen Quantifizierung für die aerodynamische und strukturelle Stabilität nötig ist.

In den Bereichen der Strukturmechanik und der Werkstoffwissenschaft müssen neben vielem anderen die Lastzustände High-Cycle-Fatigue (HCF), Low-Cycle-Fatigue (LCF) und Thermomechanical-Fatigue (TMF), insbesondere unter simultaner HCF-LCF und TMF-HCF Lastüberlagerung, in Abhängigkeit vom Werkstoffzustand sowie vom mikroskopischen und makroskopischen Oberflächenzustand quantifiziert werden. Auch auf diesem Gebiet existieren bisher vergleichsweise wenige Arbeiten. Dies gilt z.B. für den Einfluss der Oberflächenverfestigung (z.B. durch Kugelstrahlen) auf die Lebensdauer von Ni-Basis-Legierungen bei LCF- und HCF-Beanspruchung und die Stabilität des oberflächennahen Eigenspannungszustandes in Abhängigkeit der Beanspruchungsamplitude und der Temperatur. Eine systematische Studie der Zusammenhänge zwischen der durch spanende und spanlose Fertigungsverfahren und deren Prozessparameter bedingten Beeinflussung des Oberflächenzustandes und dem Ermüdungsverhalten von Nickel-Basislegierungen existiert bislang in der offenen Literatur nicht. Hierzu müssten zunächst Fließkurven, zyklische Spannungs-Dehnungs- und Wechselverformungskurven an einem Referenzzustand ermittelt, geeignete Probegeometrien bestimmt und die dabei gewonnenen Einflüsse in geeigneter Form formuliert werden. Dies wiederum ermöglicht die Erstellung von FEM basierten Rechenverfahren, welche numerisch die ermittelten konstitutiven thermo-mechanischen Gesetze umsetzen. Der funktionale Zusammenhang zwischen den Fertigungsparametern (Schneidstoffe, Schnittparameter, ECM Parameter, ...) und den mikroskopischen und makroskopischen Oberflächengeometrien sowie den Oberflächenbauteileigenschaften liefert dann eine quantifizierbare Aussage über die nötigen/möglichen adaptiven Fertigungsparameter.

Um die aerodynamischen und strukturellen Auswirkungen von Fertigungsabweichungen zu

bestimmen, müssen die fertigungsphysikalischen Wirkzusammenhänge ermittelt werden. Die hierzu nötigen Arbeiten können auf empirisch gewonnenen Erkenntnissen aufbauen. Die möglichst allgemeingültige Modellierung des Einflusses der Fertigungshistorie auf die aerodynamischen und strukturmekanischen Bauteil- und Moduleigenschaften stellt aber eine wesentliche neue Herausforderung dar.

Die funktionalen Zusammenhänge des Bereiches A ermöglichen darüber hinaus eine an die Lebensdaueranforderung des jeweiligen Triebwerkes angepasste Optimierung. Es können gezielt die freien Designvariablen je nach Anforderung hinsichtlich Maximierung der aero-thermodynamischen sowie strukturmekanischen Eigenschaften und gleichzeitig Minimierung der Herstellkosten festgelegt werden. Dies kann dann unter simultaner Beachtung aller Disziplinen und aller „Nebenbedingungen“, wie z.B. einer minimalen geforderten Lebensdauer oder einer festgelegten Reparaturstrategie, geschehen. Eine solche Optimierung kann auch für die adaptive Serienfertigung zur Festlegung der vielen Freiheitsgrade des mathematisch gesehen stark unterbestimmten Problems genutzt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß im Projektbereich A die grundlegenden Wirkmechanismen auf physikalischer Basis formuliert und miteinander verknüpft werden müssen.

3.2. Bereich B: Bereitstellung der Methoden zur langen und kurzen Dynamisierung

Im Projektbereich B müssen zum Einen die Methoden zur adaptiven Serienfertigung entwickelt werden. Dies ist die Dynamisierung in der kurzen Zeitskala. Zum Anderen müssen aber auch die Grundlagen bereitgestellt werden, die es ermöglichen, die ggf. über Jahre gereiften Technologieverbesserungen in ein bestehendes und zertifiziertes Triebwerk zu integrieren, ohne dabei die teuren Zulassungstests wiederholen zu müssen. Dies ist die Dynamisierung in der langen Zeitskala. Siehe Abbildung 7.

Methoden zur kurzen Dynamisierung:

Der Weg hin zur Dynamisierung des Serienprozesses kann darin bestehen, die Zeichnungen und Spezifikationen des „Fixed Process“ durch ein numerisches Triebwerksmodell zu ersetzen. Dieses Modell stellt den Zusammenhang zwischen den Merkmalen (z.B. Geometrie und Bauteilhistorie) und den Eigenschaften (z.B. Lebensdauer) her. Hierbei ist es ausreichend, ein spezielles, dem konkreten Triebwerk angepasstes, numerisches Modell zu erstellen. Idealerweise ist dies das gleiche, auf dessen Basis die Erstzulassung des Triebwerkes gemacht wurde. Lediglich die Erfahrungen, die seit dieser Erstzulassung z.B. während der Triebwerksüberholung über entsprechende Trainingsmethoden in das Modell eingeflossen sind, haben es ggf. geschärft.

Wahrscheinlich wird es nie möglich oder wünschenswert sein, ein einziges „großes“ numerisches Modell, welches die genannten Zusammenhänge vom Design über die Fertigung bis zu den Betriebseigenschaften des gesamten

Triebwerkes vorhersagt, zu erstellen. Dies wird auch hier nicht angestrebt. Vielmehr sollen Teilaspekte durch individuelle Teilmodelle erfasst werden.

Für die kurze Dynamisierung müssen in jedem Fall aber schnelle Soft- und Hardwarelösungen zur Erfassung der Ist-Eigenschaften des angefertigten Bauteils und der daraus abgeleiteten Einstellparameter für den verbleibenden Fertigungsprozess geschaffen werden. Hierzu gehören z.B. die optischen und röntgenographischen zerstörungsfreien Messverfahren, die schnellen aerodynamischen und strukturmekanischen Analyseverfahren sowie die Berechnung der Endbearbeitungsparameter samt der maschinellen Umsetzung. Hierbei geht es um die rechnerinterne Abbildung der Bauteileigenschaften, der ortsabhängigen Toleranzen (funktionsorientiertes Toleranzmapping) und der Fertigungshistorie. Hieraus werden dann Bearbeitungsstrategien und Bearbeitungsfolgen abgeleitet.

Insbesondere kommt es bei der adaptiven Fertigung auf die Geschwindigkeit der Mess- und Analyseverfahren an, da in der Serienfertigung pro Bauteil nur wenige Sekunden oder Minuten für diese Berechnungen zur Verfügung stehen. Keinesfalls können deshalb klassische Navier-Stokes-Lösungen für die Aerodynamik, die u.U. mehrere Tage Rechenzeit benötigen, angewandt werden. Vielmehr müssen Methoden auf Basis von Antwortflächen, adjungierten Verfahren oder anderen Methoden entwickelt werden. Dieses Themengebiet ist für die hier betrachtete Anwendung nur ansatzweise erforscht.

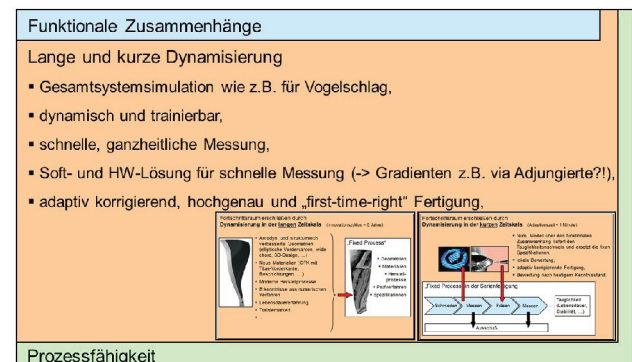


Abbildung 7: Methoden der langen und kurzen Dynamisierung.

Methoden zur langen Dynamisierung:

Für die lange Dynamisierung müssen die Grundlagen entwickelt werden, die es ermöglichen, die ggf. über Jahre gereiften Technologieverbesserungen in ein bestehendes und zertifiziertes Triebwerk zu integrieren, ohne dabei die teuren Zulassungstests wiederholen zu müssen. Beispielhaft sei eine neue oder zusätzliche Stufe in einem Hochdruckverdichter genannt. Hierzu muss wieder ein numerisches Modell geschaffen werden, das diese Veränderungen erfasst und den Tauglichkeitsnachweis, der klassischer Weise durch den Zulassungstest erfolgt, liefert. Dieses Modell muss nun deutlich größere Eingriffe in das Triebwerk – anstatt z.B. einer kleinen Formabweichung einer einzelnen Schaufel während der Serienfertigung – erfassen. Allerdings bestehen keine

stringenten Anforderungen an die Analysezeit. Demnach handelt es sich um eine weitgehend andere Aufgabe.

Exemplarisch kann hierzu ein Modell für die aeroelastische Antwort des Hochdruckverdichters nach einem Vogelschlag genannt werden. Aufgrund der sehr hohen Komplexität der hierbei abzubildenden Wechselwirkungen sind die bisher in der Literatur beschriebenen numerischen Modelle zu diesem Thema von starken Vereinfachungen geprägt. Da die quantitative Vorhersagegenauigkeit der rein numerischen Verfahren sicherlich noch auf Jahrzehnte ungenügend ist, müssen diese Modelle speziell trainierbar gestaltet werden. Zum Einen trainierbar durch einfache und kostengünstige Experimente mit soweit es geht allgemeinem Aussagecharakter, so dass in Zukunft ggf. auf eine Art Ergebnisdatenbank zurückgegriffen werden kann. Zum Anderen müssen die Modelle einen höheren Abstraktionsgrad aufweisen und so universell sein, dass sie auch durch andere Triebwerke, die unter Umständen erheblich unterschiedlich gebaut sind, trainiert werden können. Nur dann können die Ergebnisse vergangener Zulassungen und damit z.B. die der sehr zahlreich durchgeführten Vogelschlagtests verwertet werden.

Es kann vermutet werden, dass die wie beschrieben trainierten numerischen Modelle den Triebwerkstauglichkeitsnachweis bei Vogelschlag sicherer vorhersagen als die heutigen Vogelschlagtests im Rahmen der Zertifizierung. Diese Tests finden unter singulären Bedingungen statt, und es ist anzuzweifeln, ob sie wirklich repräsentativ für die davon i.d.R. stark abweichenden Vogelschlagbedingungen im realen Flugbetrieb sind. Ein trainiertes Modell ist dagegen robust aufgrund seiner physikalischen Grundlage und des Trainings mit einer großen Datenbasis und ermöglicht das Simulieren verschiedenster Vogelschlagfälle des realen Flugbetriebes.

3.3. Bereich C: Schaffung der Prozessfähigkeit und Prozesssicherheit

Der Bereich C, innerhalb dessen die Modelle und Methoden zur Schaffung der Prozessfähigkeit entwickelt werden sollen (Abbildung 8), nimmt eine wichtige Integrationsaufgabe wahr und bildet eine strukturelle Klammer. Hier müssen die durch die Dynamisierung nötigen neuartigen und von einer Zulassungsbehörde freizugebenden Methoden des Qualitätsmanagements im Allgemeinen und speziell die Methoden der Trainierbarkeit und der Optimierung der Prozesskette entwickelt werden. Trainierbarkeit und Optimierung werden durch die Auflösung des „Fixed Process“ möglich. Diese Themen der Prozess- und Qualitätssicherheit sind aufgrund des nach wie vor sehr hohen Flugsicherheitsanspruches von besonderer Wichtigkeit.

Bislang repräsentiert der „Fixed Process“ das Paradigma, eine einmalig empirisch gefundene technische Realisierung in einem in seiner Größe unbekannten Lösungsraum festzuschreiben. Zugrunde liegt dabei der Gedanke, dass bei der Annahme einer beherrschten und fähigen Fertigung mit hinreichend geringer Streuung eine Fehlentscheidung über die Eignung von Komponenten als Fehler 1. Art zu Lasten des Herstellers geht (wirtschaftliches Produzentenrisiko) und der damit

verbundene Fehler 2. Art (potenziell flugsicherheitstechnisch kritisches Konsumentenrisiko) akzeptabel gering ist. Erst eine definierte Verschiebung dieses bisherigen Paradigmas ermöglicht die Trainierbarkeit – also das systematische Lernen – und die Optimierung der Prozesse auf der Grundlage von Erfahrungen. Eine dazu notwendige Auflösung des „Fixed Process“, die erst eine kontinuierliche technische und organisatorische Weiterentwicklung innerhalb einer oder zwischen aufeinander folgenden Triebwerksfamilien ermöglicht, stellt die Themen der Prozess- und Qualitätsfähigkeit aufgrund der Notwendigkeit, den sehr hohen Flugsicherheitsanspruch aufrecht halten zu müssen und der Wechselwirkung von Fehlern 1. und 2. Art, vor besondere Herausforderungen. Der Forschungsansatz, um die unterschiedlichen Ansprüche befriedigen zu können, muss hierbei auf die Beherrschung der Gesamtstreuung der Fertigung für spezifische Triebwerkskomponenten und einer geschlossenen Darstellung der Vorhersagbarkeit von Variationen von Einzelschritten auf das Endprodukt abzielen.

Zur Dynamisierung der Serienfertigung müssen das Qualitätsmanagement, aber auch die Fertigungsprozesse, das heißt insbesondere die CAX-Ketten für strömungsflächenengenerierende Fertigungsverfahren unter Berücksichtigung des Bauteilverhaltens, mit neuen Methoden generiert werden. Das derzeit existierende Qualitätsmanagement fokussiert überwiegend auf den Aspekt der Qualitätskontrolle und baut auf dem oben beschriebenen „Fixed-Process“ auf. Alle maschinellen und manuellen Fertigungsprozesse werden hinsichtlich ihrer Wiederholtreue und – im Rahmen von engen Toleranzen – Einhaltung der immer gleichen Ergebnisse von den Prüfungsgesellschaften auditiert und zertifiziert („Repeatability“). So basieren die Prüfvorschriften auf statistischen Einzelprüfungen der Bauteile, da vorausgesetzt wird, dass alle Bauteile nur im Rahmen einer Wiederholung bekannter Vorgänge – und damit angenommen innerhalb sehr enger Grenzen – variieren und einer durch technische Rahmenbedingungen definierten Grundgesamtheit entstammen. Die einzelnen Bauteile werden, von wenigen Ausnahmen abgesehen, auch nicht fortlaufend nummeriert. Denn es wird angenommen, dass alle Bauteile dem gleichen Satz von Zeichnungen, Fertigungs- und Prüfvorschriften gehorchen.

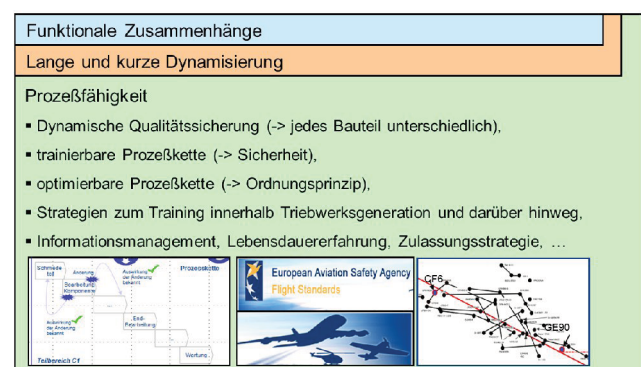


Abbildung 8: Schaffung der Prozessfähigkeit z.B. durch Erforschung des Qualitätsmanagements, der Zulassungs- und Trainingsstrategien sowie der Prozessoptimierung

Eine Dynamisierung der Fertigungs- und Gestaltungsprozesse von Flugtriebwerken mit einer

angestrebten adaptiven Fertigung führt zu kleineren Grundgesamtheiten von jeweils unter identischen Bedingungen gefertigten Triebwerkskomponenten. Hier müssen angepasste Methoden des Qualitätsmanagements grundlegend untersucht und gestaltet werden, die diesem Aspekt Rechnung tragen und sicherstellen, dass trotz größerer Entscheidungsunsicherheit die Irrtumswahrscheinlichkeit gering und Fehler 2. Art hinreichend sicher vermieden werden („Reproducibility“). Grundlage hierfür sind beherrschte Prozesse. Unter anderem steigen damit die Anforderungen an die Exaktheit der Fertigung deutlich, da die Fertigungsparameter nicht mehr iterativ durch einen Soll-Ist-Abgleich über viele (gleiche) Schaufeln eingestellt werden können. Jede unterschiedliche Einzelschaufel muss nun ohne Iteration sicher dem (adaptiv veränderlichen) Sollwert entsprechen. Es wird davon ausgegangen, dass manuelle Bearbeitungen deshalb nicht mehr möglich sind, da die Mitarbeiter für jeden neuen Sollwert zuerst geschult werden müssten, sowie dass die maschinellen Prozesse in erheblichem Maße neu entwickelt werden müssen. Zudem ist es notwendig, dass die jeweils unterschiedlichen Eigenschaften der Bauteile diesen orts aufgelöst zugeordnet werden können („Registrierung“), um eine Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten („Traceability“). Dies kann dadurch geschehen, dass während der Bearbeitung bereits ein orts aufgelöstes Mapping der Bauteileigenschaften erfolgt. Voraussetzung hierfür ist, dass eindeutige Korrelationen zwischen den Bauteileigenschaften und den signifikanten Einstellbedingungen der Prozesse bekannt sind. Neben der Ortsauflösung muss auch eine Auflösung entlang der gesamten Herstellungsprozesskette erfolgen. So sind Parametervariationen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die gesamte Prozesskette mit dem Ziel zu analysieren, resultierende notwendige Parameterveränderungen in nachfolgenden Schritten vorhersagen und einstellen zu können sowie eine anforderungs- und zulassungsgerechte Produktgestaltung zu gewährleisten.

Viele Triebwerkeigenschaften werden noch auf lange Sicht nicht vollständig ohne Experimente nachweisbar sein. So müssen in der Regel Experimente zur Festlegung des Niveaus einzelner Effekte herangezogen werden. Sensitivitäten und Trends bei kleineren Änderungen können dagegen gut durch physikalisch abgeleitete und theoretische Methoden vorhergesagt werden. Dies wird im Rahmen der kurzzeitigen Dynamisierung der Serienfertigung ausgenutzt, da dort nur kleine Unterschiede zu beurteilen sind.

Bei der langfristigen Dynamisierung, also der Einführung einer neuen Technologie in ein bestehendes Triebwerk, sind dagegen nicht veränderungsbezogene relative, sondern absolute Aussagen nötig. Dies kann durch ein physikalisch abgeleitetes numerisches Modell erfolgen, welches absolute Aussagen tätigt. Dieses muss dann jedoch notwendigerweise durch Experimente geschärft, also trainiert wird. Ein solches physikalisches Modell für absolute Aussagen erfordert und ermöglicht damit gleichermaßen das Training. Da die physikalischen Gesetzmäßigkeiten für alle Triebwerksprogramme in gleicher Weise gelten, können sich die Triebwerksprogramme erstmals untereinander trainieren. D.h. die Zulassungstests eines Triebwerkes können erstmals als Basis – und somit zur Schärfung der theoretischen Methoden – für die Zulassung eines

weiteren Triebwerkes herangezogen werden. Bisher werden für jedes neue Triebwerk jeweils alle Zulassungstests erneut durchgeführt. Somit kann auf eine enorme historische Erfahrung über alle Triebwerke hinweg zurückgegriffen werden. Um aber ein Training der numerischen Modelle durch andere Triebwerksprogramme zu ermöglichen, müssen die Grundlagen universeller Modelle beforscht werden, um damit auch über die geometrischen und sonstigen Unterschiede der Triebwerke hinweg ein Training zu ermöglichen. Damit steigen die Anforderungen an den Abstraktionsgrad und die Trainingsmethoden erheblich. Ein möglicher Lösungsansatz besteht darin, die physikalisch deterministischen Methoden verstärkt durch statistische zu ergänzen.

Einfacher gestaltet sich das Training innerhalb eines Triebwerksprogramms. Hier können die zugelassenen Triebwerke, die in den Jahren nach der Zulassung überholt werden und deren Zustand damit nach realen Betriebsbedingungen erfasst werden kann, zum experimentellen Schärfen von z.B. analytisch schwer erfassbaren (Rest-)Lebensdauervorhersagen benutzt werden. Auf diese Weise können dem Beispiel folgend die Triebwerksscheiben anfangs mit einer vorläufigen Lebensdauer von z.B. 5000 Belastungszyklen zugelassen werden. Auf Basis einzelner Scheiben, die nach den 5000 Zyklen analysiert werden, kann anschließend die Lebensdauer der gesamten Triebwerksflotte auf z.B. zugelassene 20000 Zyklen erweitert werden. Somit ergibt sich eine erhebliche Steigerung der Vorhersagegenauigkeit und damit der Sicherheit sowie eine sehr große Kostenersparnis, da bei der Erstzulassung z.B. nicht über langwierige Schleudertests der Nachweis über 20000 Zyklen Betriebssicherheit geführt werden muss.

Die Dynamisierung durch Einführung deterministischer Modelle und Trainingsstrategien hat also zwei sich gegenseitig verstärkende Momente und beinhaltet sowohl technologische als auch organisatorische Forschungsinhalte. Es müssen die Trainingsstrategien entwickelt werden, und es müssen die heutigen Zulassungsvorschriften abgewandelt und flexible Zulassungsstrategien entworfen werden, in die die gewonnenen Erkenntnisse und neuen Freiheitsgrade einfließen. Die Entwicklung der Trainingsstrategien muß zum Ziel haben, die Modellbeziehungen zwischen den formal wie inhaltlich sehr heterogenen Systemen, wie sie teils bereits in der Praxis existieren bzw. in den Bereichen A und B wesentlich weiter entwickelt werden, auf einer für gängige Datenbank-, Kommunikations- und Softwaretechnologien verarbeitbare Weise so zu repräsentieren, dass eine Änderungsverwaltung in einer über heutige Lösungen weit hinausgehenden Präzision möglich ist. Die Erfahrungsdaten, die zu den jeweiligen Modellen gehören, könnten auf Basis der vernetzten Modelle so homogenisiert werden, dass ein modellübergreifendes Training (Modellverbesserung) mittels semi-automatischer Lernverfahren möglich ist.

Durch Auflösung des „Fixed Process“ der Serienfertigung sind nun im Rahmen gewisser Grenzen verschiedene Fertigungsalternativen möglich. Es muss also ein Entscheidungsprinzip gefunden werden, das in der Serienfertigung die Fertigungsfolge jedes einzelnen Bauteils bestimmt. Diese Entscheidungsfreiheit kann nun

aufgrund der bekannten funktionalen Zusammenhänge zwischen Bauteilgestaltung und Bauteileigenschaft unter Zuhilfenahme einer multikriteriellen Optimierung in besonders günstiger Weise genutzt werden. So können unter anderem gezielt die Fertigungskosten unter Einhaltung der geforderten Eigenschaften der Bauteile minimiert werden. Diese Optimierung wird sicherlich genauso auch für die (einmalige) Einführung einer neuen Technologie im Rahmen der langfristigen Dynamisierung genutzt.

Zur letztendlichen Bewertung und Entscheidung über die Realisierung einer Fertigungsfolge reicht es aber nicht aus, nur die Fertigungskosten zu betrachten. Es kommt vielmehr darauf an, bereits in der Planungsphase bei der Gestaltung von Prozessketten technologisch geeignete Fertigungsalternativen so miteinander zu kombinieren, dass verschiedene betriebswirtschaftliche und andere, übergeordnete Optimierungskriterien erreicht werden können. Untereinander stehen die Optimierungsgrößen in einem komplexen Beziehungsgebilde mit einer Vielzahl technologisch dominierter, aber im Allgemeinen nichtlinearer Rückkopplungen. Optimierungsverfahren, mit denen bereits in der Planung dynamisch bei Änderung von Fertigungsvorgängen direkt die betriebswirtschaftliche Auswirkung berechnet wird, existieren bis heute nur in eingeschränktem Umfang. Eine weitere Notwendigkeit zur dynamischen Optimierung und Bewertung ergibt sich bei der Neufertigung, Nacharbeit oder Ausschuss von Bauteilen. Auch für diese Fragestellungen liegen im Flugtriebwerksbau bisher keine konsistenten Modelle vor. Stand der Technik ist, dass Entscheidungen aufgrund vorliegender Erfahrungen häufig „ad-hoc“ direkt nach Auftreten eines Problems getroffen werden. Auch hier besteht umfangreicher Entwicklungsbedarf, um Entscheidungsträger in der letzten Entscheidungsstufe zu befähigen, weitreichende Änderungen in der Prozesskette freizugeben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Potenzial der Dynamisierung sehr groß ist, dass aber die hierfür nötigen Modelle und Methoden größtenteils noch entwickelt werden müssen und dass dies eine nicht minder große Herausforderung an die Ingenieurwissenschaften ist. Hier sind die Forschungseinrichtungen und Hochschulen gefordert.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Im hier vorliegenden Artikel wurde diskutiert, dass die heutige Situation aufgrund der inzwischen verfügbaren leistungsstarken numerischen Verfahren gepaart mit der siebzigjährigen Erfahrung in der zivilen Luftfahrt eine ganz andere ist als die Mitte des letzten Jahrhunderts als die Zulassungsbehörden ins Leben gerufen wurden. Damals mußte jedes Triebwerk seine Tauglichkeit durch Triebwerkstests nachweisen, ohne dabei Bezug auf die Erfahrung mit anderen Triebwerken nehmen zu können. Heute, so der Vorschlag, könnten die bereits bestehenden Tendenzen deutlich ausgeweitet werden und ein grundlegend neuer Tauglichkeitsnachweis – nach Bereitstellung der hierfür nötigen ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen – etabliert werden. So könnten experimentell verifizierte und durch die Flugerfahrung trainierte theoretische Modelle, die die funktionalen Zusammenhänge zwischen Bauteilgestaltung

und Bauteileigenschaften beschreiben, den Tauglichkeitsnachweis liefern. Dies ist wahrscheinlich in naher Zukunft technologisch möglich und verspricht ähnlich genaue, wenn nicht genauere Tauglichkeitsaussagen zu liefern. Zudem erscheint es so, daß dieser großteils numerisch-theoretische und damit kostengünstige Nachweis notwendige Voraussetzung für kurze Innovationszyklen und eine mit modernen Triebwerken ausgestattete Flugzeugflotte, die in Summe die herausfordernden ökologischen Ziele erreicht, ist.

Allerdings hat der vorgeschlagene Weg zur Folge, daß eine Umkehrung des Tauglichkeitsnachweises stattfindet. Die Modelle, die Methoden und die Qualitätssicherungsprozesse müssen dann flugsicherheitstauglich sein, wohingegen bisher das getestete Triebwerk den Tauglichkeitsnachweis liefert. Somit bestehen sicherlich noch erhebliche Herausforderungen an diese Modelle und Prozesse, die es zu erfüllen gilt.