Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132

Ein Ansatz zur Verbesserung der kollaborativen Entwicklung in der Luftfahrtindustrie

Modellbasierte Kopplung von Produkt und Produktion

Y. Ghanjaoui, F. Mantwill

ZUSAMMENFASSUNG Die steigende Komplexität und die Nachfrage nach kundenspezifischen Flugzeugen haben einen erheblichen Einfluss auf die Produktionsplanung in der Luftfahrtindustrie. Um mehr Flexibilität des Produktionssystems zu erreichen und industrielle Anforderungen frühzeitig in der Produktentwicklung zu berücksichtigen, wird ein neuer Ansatz vorgestellt. Durch die Anwendung und Kopplung von Model-based-Systems-Engineering (MBSE)-Modellen wird eine kollaborative Entwicklung ermöglicht, die produktionsgerechte Produkte gestaltet und die Komplexität der Produktionssysteme frühzeitig beherrscht. Dieser Ansatz berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen multidisziplinären Modellartefakten und erlaubt eine frühzeitige Optimierung der Produkte und der Produktion.

STICHWÖRTER

Produktentwicklung, Produktionsplanung, Luft-/Raumfahrt

Model-based coupling of product and production

ABSTRACT The increasing complexity and demand for customized aircraft have a significant impact on production planning in the aviation industry. To achieve more flexibility in the production system and to take industrial requirements into account at an early stage of product development, a new approach is presented. The application and coupling of Model-based Systems Engineering (MBSE) models enables collaborative development that designs production-orientated products and manages the complexity of production systems at an early stage. This approach considers the interdependencies between multidisciplinary model artefacts and allows products and production to be optimized at an early stage.

1 Einleitung

Angesichts der aktuellen wettbewerbs- und klimabezogenen Herausforderungen muss die Luftfahrtindustrie neue, effizientere und klimafreundlichere Technologien in Flugzeuge integrieren. Gleichzeitig bringt die Nachfrage nach kundenspezifischen Flugzeugkabinen zusätzliche Komplexität mit sich. Diese Komplexität beeinflusst nicht nur die Flugzeugentwicklung, sondern auch die Produktionsplanung und Industrialisierung. Derzeit ist die Flugzeugproduktion auf eine Produktfamilie ausgerichtet und zeichnet sich durch eine niedrige Fertigungsrate aus [1]. Die steigende Nachfrage nach individuellen Kabinenkonfigurationen erfordert eine Erhöhung der Produktionsrate und die Flexibilität, sich schnell an neue Produktionsszenarien anzupassen [2, 3].

In der Luftfahrtindustrie ist diese Fähigkeit aktuell aufgrund der spezialisierten und komplexen Produktionssysteme, die mit Ad-hoc-Ressourcen arbeiten, nicht gegeben [4]. Da die industriellen Anforderungen im Vergleich zur Automobilindustrie später in der Flugzeugentwicklung berücksichtigt werden, gestaltet sich die Optimierung der Produktion schwierig [5]. Dies erfordert eine kollaborative Produkt- und Produktionsentwicklung sowie die Rückführung industriellen Feedbacks in der frühen Konzeptionsphase. Zudem tragen neue industrielle Technologien und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Produktionsdomänen wie Fertigung, Montage, Test, Logistik und Supply-Chain zur steigenden Komplexität des Produktionssystems bei.

Von großer Relevanz sind vor diesem Hintergrund Methoden zur frühzeitigen produktionsgerechten Produktentwicklung und für gleichzeitiges Komplexitätsmanagement des Produktionssystems. Diese Arbeit stellt einen Ansatz vor, der diese kollaborative Entwicklung durch die Anwendung und Kopplung multidisziplinärer Model-based-Systems-Engineering (MBSE)-Modelle unterstützt. Dabei werden Modellartefakte zur Produktbeeinflussung und systematischen Produktionssystementwicklung analysiert und definiert. Die Wechselwirkungen zwischen diesen multidisziplinären Modellartefakten werden in einem kollaborativen Workflow beschrieben. Somit können die jeweiligen disziplinären Anforderungen validiert und die Produkte und die Produktion gleichzeitig optimiert werden.

2 Stand der Technik zur kollaborativen Produkt- und Produktionsentwicklung

Die Integration von Produktions-Stakeholdern in die Produktentwicklung ist von zentraler Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Methoden entwickelt, welche darauf ab-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

zielen, komplexe Produkte hinsichtlich ihrer Produktionsfähigkeit frühzeitig abzusichern und das Design mit der Produktionsplanung zu synchronisieren.

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die wesentlichen Ansätze der produktionsgerechten Produktentwicklung. Darüber hinaus werden Methoden zur frühzeitigen Entwicklung und Absicherung des Produktionssystems vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Analyse dieser Methoden im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen der Flugzeugentwicklung.

2.1 Überblick über Methoden der produktionsgerechten Produktentwicklung

Die Produktionsgerechtheit eines Produkts beschreibt den erforderlichen Produktionsaufwand, um das Produkt unter optimalen Bedingungen herzustellen. Im Gegensatz zur funktionalen Betrachtung, bei der das Zusammenwirken der Funktionen der Produktbestandteile im Vordergrund steht, fokussiert die produktionsgerechte Entwicklung auf die Optimierung des Produkts hinsichtlich seines Verhaltens in den Produktionsphasen [6].

Eine bedeutende Methode in diesem Zusammenhang ist die DFMA-Methode (Design for Manufacturability and Assembly), die von *Boothroyd* und *Dewhurst* entwickelt wurde [7, 8]. Sie umfasst Designprinzipien zur Optimierung der Montage und Fertigung, etwa durch die Reduzierung von Bauteilen, die Festlegung sinnvoller Toleranzen sowie durch die Modularisierung und Standardisierung von Komponenten. Diese Methode erfordert einen hohen Detaillierungsgrad des Produktentwurfs und zielt darauf ab, diesen Entwurf durch die Analyse und Bewertung der Fertigungs- und Montageaufgaben zu verbessern.

Mit der fortschreitenden Entwicklung moderner, rechnergestützter Systeme nehmen virtuelle Modelle und das Konzept des Digital Mock-Up (DMU) eine zunehmend zentrale Rolle in der kollaborativen Produktentwicklung ein. Das gesamte Netzwerk an digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen wird unter dem Begriff „Digitale Fabrik“ zusammengefasst, die eine ganzheitliche Planung und Evaluierung von Produkten, Prozessen und Ressourcen (PPR) anstrebt [9]. Diese digitale Plattform integriert standardisierte Produktionselemente und erlaubt es, durch definierte Beziehungen innerhalb eines PPR-Modells, die Wechselwirkungen der einzelnen Modellelemente zu verstehen [10]. Die 3D-basierten virtuellen Modellierungs- und Simulationswerkzeuge innerhalb der PPR-Toolchain, wie etwa für Kollisionsanalysen oder Fabriklayouts, unterstützen sowohl die Designvalidierung als auch die Produktionsplanung. Die Integration der PPR-Modell- und Analysedaten erfolgt über ein Product-Data-Management (PDM)-System. Allerdings führt dies zu Herausforderungen bei der Verwaltung großer Datenmengen sowie beim Austausch zwischen verschiedenen Systemen und Werkzeugen.

In der digitalen Fabrik befinden sich die Produkt-CAD-Modelle bereits in einem weit fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, was dazu führt, dass sich Prozesse und Ressourcen an diesen Modellen orientieren müssen. Dies erschwert aber die Erfüllung industrieller Anforderungen. Einige Ansätze aus der Karosserieentwicklung schlagen vor, die digitale Fabrik mit Startmodellen, Assistenzsystemen und Prüfmechanismen zu ergänzen, um die produktionsgerechte Beeinflussung des Produkts bereits in frühen Entwicklungsphasen zu unterstützen. Ziel ist es, die Machbarkeit produktionsrelevanter Aspekte im Sinne einer Grobplanung sicherzustellen.

2.2 Konzeptuelle Methoden zur Produktionssystementwicklung

Die konzeptuellen Entwicklungsphasen sind entscheidend, um potenzielle Produktionsprobleme frühzeitig zu identifizieren und zu vermeiden. Daher ist der Bedarf an Ansätzen und Werkzeugen zur Unterstützung der Produktionsplanung sowie der Bewertung in diesen Phasen besonders hoch. In diesem Zusammenhang können abstrakte Modelle des Produktionssystems, basierend auf dem Ansatz des Model-based Systems Engineering (MBSE) einen wesentlichen Beitrag leisten. Diese Modelle unterstützen die Erfassung industrieller Anforderungen sowie die Definition und Analyse von Systemartefakten. Durch formale Modellierung und interdisziplinäre Kommunikation kann die Komplexität eines Flugzeugproduktionssystems effektiv verwaltet werden.

Ein Literaturüberblick zur Anwendung von MBSE im Produktionsengineering hat verschiedene wichtige Anwendungsgebiete identifiziert [11]. Im Kontext von Industrie 4.0 wird MBSE unter anderem zur Entwicklung intelligenter Fertigungssysteme und zur Identifikation von IoT-Funktionen eingesetzt. Dies geschieht durch eine verbesserte Zusammenarbeit sowie eine präzisere Definition von Anforderungen und Randbedingungen im Entwurfsraum. Darüber hinaus wird MBSE im Management und in der Qualitätssicherung automatisierter Produktionssysteme sowie im Lebenszyklusmanagement verwendet. Dabei kommen konsistente Systemmodelle zum Einsatz, die disziplinspezifische Modelle (wie CAD, CAE, CAM) integrieren. Bei diesen Anwendungen wurden vor allem etablierte Sprachen aus der modellbasierten Systementwicklung sowie entsprechende Tools verwendet.

Besonders hervorzuheben ist die MBSE-Methodik bei der Entwicklung von Produktionssystemen. In der Literatur wurde ein Ansatz zur Modellierung der Struktur und des Verhaltens von Produktionssystemen vorgeschlagen [12, 13], welcher als Anforderungen-Funktional-Logisch-Physisch (RFLP)-Ansatz nach [14] bekannt ist. Dieser definiert eine PPR-Semantik sowie eine auf Systems Modeling Language (SysML) basierende domänenspezifische Sprache. Das Modell wird als Blackbox betrachtet und mit ereignisorientierten Simulationsmodellen für die Prozessablaufbewertung und -analyse verbunden. Die Entwicklung orientiert sich an einem spezifischen Produkt. Jedoch fehlt es in diesem Ansatz an einer systematischen Methode zur Produktbeeinflussung in Bezug auf Produktionsanforderungen und -kontexte.

Ein weiterer Ansatz wird in [15] beschrieben, wobei ebenfalls eine Entwurfssprache sowie ein Entwurfsprozess definiert werden. In einem Makrozyklus wird die Granularität der Fabrik- und Produktstrukturen detailliert und die Entwicklungsphasen von der Zielsetzung bis hin zur Produktionsausführung im Sinne des V-Modells unterstützt. Für jede dieser Phasen erfolgt ein Mikrozyklus mit der Modellierung von Anforderungen, Materialfluss, Dimensionierung und Struktur sowie technischer Lösungen. Auch in diesem Fall werden frühe Produktinformationen in jede Iteration der Produktionssystementwicklung integriert, ohne aber eine explizite Produktbeeinflussung zu beschreiben.

2.3 Methodenanalyse und Bewertung der Luftfahrtanforderungen

Die zunehmende industrielle Komplexität in der Luftfahrt erfordert eine frühzeitige Absicherung des Flugzeugproduktionssystems, gleichzeitig mit einer Beeinflussung des Produkts in den

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

● Anforderung erfüllt
◐ Anforderung teilweise erfüllt
○ Anforderung nicht erfüllt

Methoden & Referenzen	Alternativenanalyse der Produktarchitektur	Optimierung des Produktdesigns	Bewertung der Produktionsgerechtheit	Systematische Produktionsentwicklung	Digitale Durchgängigkeit	Ausführbarkeit und Validierung	Niedriges Reifegrad/ Informationsgehalt	Nachverfolgbarkeit der Anforderungen
Design for Manufacture and Assembly *Boothroyd & Dewhurst [7,8]*	◐	●	◐	◐	○	○	○	○
Montagegerechte Produktgestaltung *B.Lotter, S. Hesse et al. [6]*	●	●	◐	◐	○	○	○	○
Montagegerechtheit im Modularisierungskontext *N.Halfmann, D.Krause [17,18]*	●	●	◐	◐	◐	○	○	○
Frühzeitige Produktbeeinflussung *A.Lucko, Brockmeyer, F.Mantwill [25]*	●	●	◐	◐	◐	◐	●	○
Digitale Fabrik *M.Gregor, A. Štefánik [22]*	◐	◐	●	◐	●	◐	○	○
Datenintegration in die Digitale Fabrik *H.Bley, C. Franke [21]*	◐	◐	●	◐	●	◐	○	○
Montagealternativen mit PPR *B.R.Ferrer [10] / Y.Ghanjaoui [24] / G. Michalos [23]*	◐	◐	●	◐	●	◐	○	○
MBSE für Produktionssysteme *T. Sprock, A.Graunke, L.McGinnis et al. [12,13]*	◐	○	○	●	◐	●	●	●
Konzeptuelle Produktionssystementwicklung *C. Sinnwell, J.C. Aurich et al. [15]*	◐	○	◐	●	◐	◐	●	●
MBSE für Automatisierte Produktionssysteme *L. Beers, A. Fay et al. [19,20]*	◐	○	○	●	◐	●	●	◐

Bild 1. Übersicht der Anforderungen und Methoden in der konzeptuellen Entwicklungsphase. *Grafik: eigene Darstellung*

frühen Entwicklungsphasen. Einerseits muss es möglich sein, verschiedene Produktalternativen hinsichtlich ihrer Produktionsgerechtheit zu bewerten und zu optimieren. Dies sollte nicht nur auf Basis der Produkteigenschaften erfolgen, sondern auch unter Berücksichtigung der spezifischen Produktionsanforderungen. Andererseits müssen diese Anforderungen durch eine Verifizierung und Validierung der technischen Lösungsalternativen für das Produktionssystem abgesichert werden. Besonders wichtig ist dies für die Qualifizierung und Zertifizierung der Produktionsprozesse in der Luftfahrt, um Luftfahrttüchtigkeit nachzuweisen [16].

Eine durchgängige digitale Unterstützung dieser Aktivitäten ist entscheidend, um Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Produktionsentwicklung zu verstehen und gezielt für die Produktbeeinflussung zu nutzen. Ebenso wichtig ist die systematische Entwicklung des Produktionssystems sowie die Nachverfolgbarkeit der Produktionsanforderungen im Lösungsraum, um diese Aktivitäten teilweise zu automatisieren und klare Richtlinien bereitzustellen. All dies muss in der konzeptuellen Entwicklungsphase ermöglicht werden, in welcher der Informationsgehalt und der Reifegrad noch gering sind. Dies trägt dazu bei, die Kommunikation zwischen den Stakeholdern zu erleichtern und Änderungen schneller sowie flexibler umzusetzen [3]. **Bild 1** fasst diese Anforderungen tabellarisch zusammen. Zudem werden die wichtigsten Methoden zur produktionsgerechten Produktbeeinflussung und zur Entwicklung eines Produktionssystems aufgelistet, wobei die Erfüllung der jeweiligen Anforderungen durch jede Methode angezeigt wird.

Die Literaturanalyse zeigt, dass Methoden oft entweder einen Fokus auf die produktionsgerechte Produktgestaltung oder die Produktionsabsicherung legen, wodurch sie nicht alle relevanten Anforderungen abdecken. Ansätze [6–8, 17, 18] konzentrieren sich auf die Produktgestaltung und berücksichtigen die industriellen Anforderungen nicht in ihrer Gesamtheit. Das komplexe Verhalten des Produktionssystems kann nicht vollständig validiert werden, da die Prozesse mit Blick auf die Produkteigenschaften betrachtet und geplant werden. Einige dieser Ansätze, wie die DFMA, können erst in späteren Entwurfsphasen angewendet werden, in denen Projektparameter und Entwurfsinformationen, wie detaillierte Geometrien, bereits vorliegen.

Andererseits sind Ansätze [12, 13, 15, 19, 20], die auf die Produktionssystemmodellierung und -entwicklung fokussieren, von einer spezifischen Produktarchitektur abhängig, sodass das Produktionssystem gezielt für dieses Produkt entwickelt wird. Dies führt zu eingeschränkter Flexibilität. Außerdem geben diese Ansätze nicht vor, wie die Modellelemente und deren Ausführung genutzt werden können, um die Produktionsgerechtheit zu optimieren. Abschließend legen Methoden [10, 21–24], die auf der digitalen Fabrik und dem PPR-Modell basieren, einen stärkeren

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

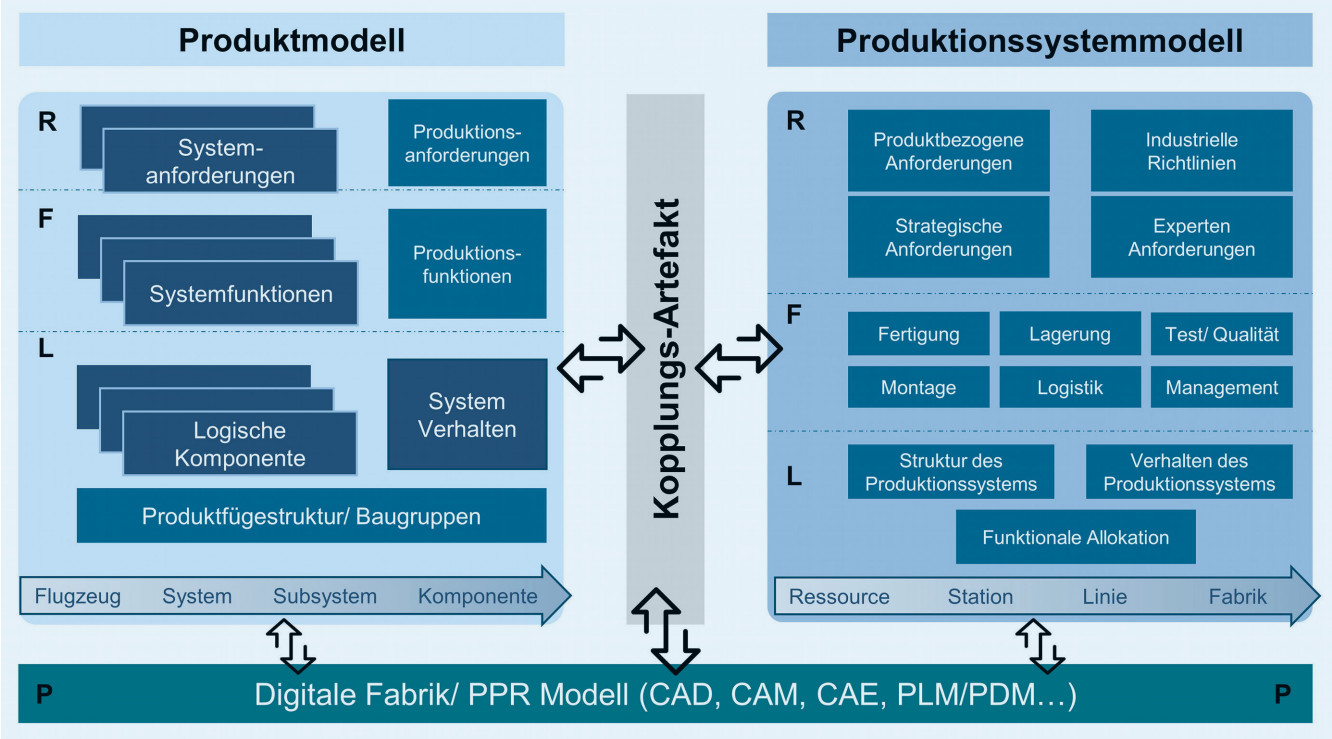

Bild 2. Ansatz zur Kopplung der abstrakten Produkt- und Produktionsmodelle. *Grafik: eigene Darstellung*

Fokus auf die Verknüpfung zwischen Produkt- und Produktionsentwicklung. Diese Ansätze verwenden Modelle mit höherem Reifegrad und detaillierterem Informationsgehalt, was jedoch zu Herausforderungen bei der Datenverwaltung führt, wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Zudem konzentrieren sich diese Ansätze vor allem auf die Validierung von Produktdesigns durch Machbarkeitssimulationen und -analysen [25]. Eine explizite, methodische Optimierung des Designs hinsichtlich der Produktionsgerechtheit wird nicht direkt adressiert.

Aus der Analyse ergibt sich eine Forschungslücke sowie die zentrale Fragestellung dieses Beitrags. Es wird untersucht, wie eine produktionsgerechte Produktentwicklung in Kombination mit der Absicherung des Produktionssystems in den frühen und konzeptuellen Entwicklungsphasen realisiert werden kann. Dabei sollen industrielle Anforderungen nachverfolgt und validiert werden. Zudem wird eine methodische Herangehensweise entwickelt, die es ermöglicht, aus den technischen Lösungen des Produktionssystems eine Designoptimierung abzuleiten, die zu einer verbesserten Produktionsgerechtheit führt.

3 Modellbasierte Methodik für die kollaborative Entwicklung

Als Reaktion auf die im vorherigen Kapitel dargelegten Anforderungen und die zugrunde liegende Forschungsfrage wurde eine modellbasierte Methodik entwickelt. Zunächst wird der Koppelansatz vorgestellt, der eine kollaborative Entwicklung von Produkt und Produktion ermöglicht. Daraufhin werden die Wechselwirkungen zwischen den domänenspezifischen Artefakten beschrieben, welche sowohl die Grundlage für die Synthese eines Produktionssystemmodells als auch für die produktionsgerechte Beeinflussung des Produkts bilden. Abschließend wird ein Workflow erläutert, der veranschaulicht, wie der entwickelte Ansatz in der Praxis angewendet werden kann.

3.1 Ansatz zur Kopplung der Produkt- und Produktionsmodelle

Der entwickelte Ansatz basiert auf der Trennung der Entwicklung des Produkts und des Produktionssystems in zwei domänenspezifische, abstrakte (MBSE-) Modelle. Diese Systemmodelle sind über ein Kopplungsartefakt miteinander verbunden, das zudem eine Schnittstelle zur digitalen Fabrik und zum PPR-Modell ermöglicht. **Bild 2** stellt die zentralen Aspekte des Ansatzes grafisch dar.

In beiden Modellen wird ein RFLP-Ansatz nach [14] verfolgt und durch Modellartefakte ergänzt, die in Bezug zur Produktion stehen. Das Produktmodell wird gemäß Systemmodellierungsrichtlinien der Luftfahrtindustrie in [16] für die verschiedenen Systemgranularitäten entwickelt. Auf der Anforderungsebene (R) werden neben den funktionalen und nicht-funktionalen Produktanforderungen auch neue, produktionsbezogene Anforderungen abgebildet. Diese sind nicht Anforderungen an das Produktionssystem, sondern müssen durch spezifische Produkteigenschaften verifiziert werden. Beispiele sind Anforderungen an Verbindungstechniken oder Komponenten mit Montagefunktionen. Auf der funktionalen Ebene (F) werden produktionstechnische Anforderungen integriert und mit den entsprechenden Systemfunktionen sowie weiteren Anforderungen im Modell verknüpft. Die technischen Lösungen (zum Beispiel Verbindungstechniken oder Montagekomponenten) zur Erfüllung der Produktionsanforderungen und -funktionen werden auf der logischen Ebene (L) modelliert. Zudem wird eine neue, produktionsorientierte Fügestruktur des Produkts definiert, die sich von der funktionalen Struktur unterscheidet. Hier werden Informationen zu Baugruppen und Bauteil-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

schnittstellen spezifiziert. Die physische Ebene (P) wird nicht direkt im Modell, sondern in der digitalen Fabrik abgebildet, in der das Produkt physisch modelliert wird, und ist mit den entsprechenden Artefakten im MBSE-Modell verknüpft.

Der RFLP-Ansatz wird auch auf die Modellierung des Produktionssystems angewendet. Die Unterschiede zum Produktmodell bestehen vor allem in der Art und Weise, wie Artefakte des Produktionssystems auf den jeweiligen Ebenen abgebildet und miteinander verknüpft werden. Auf der Anforderungsebene werden produkt- beziehungsweise produktfamilienbezogene Anforderungen aus dem Produktmodell abgeleitet. Diese enthalten beispielsweise Anforderungen wie die Fertigung eines bestimmten Teils oder die Montage zweier Komponenten. Die genauen Abhängigkeiten werden im Kapitel 3.2 erläutert. Zudem werden nicht direkt produktbezogene Anforderungen formuliert, die Aspekte wie Produktionskosten, -zeiten, -kapazitäten umfassen, die sich aus strategischen industriellen Analysen ableiten lassen. Auch der Produktionskontext, einschließlich der Schnittstellen des Produktionssystems zu externen Systemen (wie andere Produktionssysteme oder externe Logistik), wird in diesem Zusammenhang modelliert. Weiterhin werden Anforderungen zu industriellen Richtlinien, etwa im Bereich der Arbeitssicherheit oder Ergonomie, definiert. Angesichts der Tatsache, dass Produktionssysteme nicht immer vollständig neu entwickelt werden, können auch Anforderungen an spezifische Produktionskonzepte und -szenarien, die Automatisierung bestimmter Prozesse oder die Berücksichtigung von Produktionsvarianten formuliert werden.

Aus diesen Anforderungen lassen sich Funktionen des Produktionssystems auf der funktionalen Ebene ableiten. Die Funktionen werden in sechs Kategorien unterteilt: Fertigung, Montage, Logistik, Lagerung, Test und Qualitätssicherung sowie Fabrikmanagement. Die Funktionsartefakte werden im Modell den logischen Komponenten des Produktionssystems auf der logischen Ebene zugeordnet. Diese logischen Komponenten entsprechen der Granularität des Produktionssystems und können Fabriken, Linien, Stationen oder Ressourcen darstellen. Sie werden dimensioniert, wobei etwa die Anzahl der Ressourcen, ihre geometrischen Eigenschaften oder das Layout der Fabrik spezifiziert werden. Ebenso werden die Aktivitäten und Zustände dieser Komponenten modelliert, welche die Realisierung der Funktionen erlauben. Die Modellelemente werden schließlich, analog zum Produktmodell, mit den physischen Modellen in der digitalen Fabrik verknüpft. In der digitalen Fabrik wird das Produktionssystem physisch modelliert. Dort erfolgen detaillierte Analysen, wie etwa Materialflussbetrachtungen und Kollisionserkennung, die eine Validierung der zuvor definierten Architektur ermöglichen.

Die beiden Modelle sind über ein Kopplungsartefakt miteinander verknüpft. Eine der Hauptaufgaben dieses Artefakts besteht darin, vorhandene Informationen im Modellaufbau und in der Systementwicklung zu nutzen. Dafür müssen die Abhängigkeiten zwischen den beiden Domänen sowie die Wechselbeziehungen zwischen den Modellartefakten semantisch abgebildet werden. Die formale Repräsentation dieser Beziehungen ermöglicht eine konsistente Abfrage und Verarbeitung der darin enthaltenen Informationen, was eine systematische und strukturierte Entwicklung der Modelle sicherstellt. Eine weitere Aufgabe des Kopplungsartefakts ist die Wissensrepräsentation, die eine produktionsgerechte Anpassung und Optimierung der Produktarchitektur erlaubt. Dazu müssen Expertenwissen und Regeln definiert und abgebildet werden, um Analysen im Produktionssystemmodell in Architekturänderungen des Produktmodells zu übersetzen. Das Kopplungsartefakt ist ebenfalls mit der digitalen Fabrik verknüpft, was eine Verbindung zwischen den physischen Modellen des Produkts und des Produktionssystems ermöglicht.

3.2 Wechselbeziehungen zwischen Produkt und Produktion

Die enge Interaktion zwischen Produkt und Produktionssystem sowie deren wechselseitige Auswirkungen lassen sich durch die Wechselbeziehungen zwischen den Domänenartefakten verdeutlichen. Die **Tabelle** bietet eine Übersicht dieser Wechselbeziehungen. In diesem Ansatz werden grundsätzlich zwei Typen von Wechselwirkungen unterschieden.

Der erste Wechselwirkungstyp betrifft den Einfluss der Produktartefakte im MBSE-Modell auf die Artefakte des Produktionssystems. Die Systemfunktionen des Produkts führen zu spezifischen Tests und Qualitätssicherungsmaßnahmen, die in kritischen Produktionsphasen erforderlich sind, um die Funktionalität des Produkts zu gewährleisten. Daraus resultieren Anforderungen an die Qualität und Testverfahren des Produktionssystems. Zudem besteht eine enge Verknüpfung zwischen der Produktfügestruktur und den Montage- sowie Logistikfunktionen. Die im Modell dargestellten Schnittstellen zwischen den Bauteilen erfordern Montageaktivitäten, um diese Bauteile zu verbinden, und generieren somit Montageanforderungen an das Produktionssystem.

Die Wahl der Verbindungstechnik hat ebenfalls Auswirkungen auf spezifische Prozesse, deren Ausführung durch entsprechende Produktionsfunktionen beschrieben wird. Der Produktaufbau führt außerdem zu Einschränkungen in der Montagesequenz und zu logistischen Aufgaben, die notwendig sind, um den Materialfluss von Teilen und Baugruppen sicherzustellen. Bei detaillierteren Modellartefakten, die die Eigenschaften von Bauteilen und Komponenten abbilden, lassen sich weitergehende Anforderungen an Fertigungs-, Handhabungs- und Montageprozesse ableiten. Materialien, Geometrien zur Beschreibung der Bauteilformen sowie Toleranzen bestimmen die Fertigungsweise der Bauteile. Die Massen, Materialien und geometrische Gestaltung legen fest, wie Bauteile gehandhabt und montiert werden müssen, und definieren gleichzeitig, welche Ressourcen für diese Aufgaben benötigt werden.

Der zweite Wechselwirkungstyp betrifft Artefakte des Produktionssystems, die eine produktionsgerechte Umgestaltung des Produkts durch spezifische Modellartefakte ermöglichen, die als Stellschrauben für die Architekturoptimierung dienen. Die Kostenanforderungen und deren Auswirkungen auf die Einzelkosten der Komponenten und Prozesse des Produktionssystems erlauben die Identifikation von Produkteigenschaften oder Produktvarianten, die eine hohe Kostenwirkung haben. Weitere strategische Anforderungen, wie etwa an Produktionszeiten und Kapazitäten, können durch die Anpassung der Produktfügestruktur und der gewählten Verbindungstechnik realisiert werden. Darüber hinaus können bestimmte Produktionskonzepte, beispielsweise durch neue Entscheidungen in der Vor- und Endmontage oder durch angepasste Logistikprinzipien, ebenfalls zu Veränderungen in der Fügestruktur und den Produkteigenschaften führen. Auch der erforderliche Einsatz von Automatisierung in der Produktion kann Auswirkungen auf die Produktarchitektur haben. Die Anpassung der Produktfügestruktur und der Bauteilgeometrie für die Handhabung durch automatisierte Ressourcen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle. Wechselbeziehungen zwischen Produkt- und Produktionsartefakten.

Produktartefakt	Produktionsartefakt
Systemfunktion	Qualität- und Testanforderung
Produktfügestruktur (Produktaufbau)	Montageanforderung Logistik- und Lagerungsanforderung
Produktfügestruktur (Schnittstellen)	Montageanforderung
Verbindungstechnik	Montageanforderung
Bauteil-/Komponenteneigenschaften Material Geometrie Toleranzen	Fertigungsanforderung
Bauteil-/Komponenteneigenschaften Masse Geometrie Material	Handhabungsanforderung Montageanforderungen
Produktvarianten Bauteileigenschaften	Kostenanforderung
Produktfügestruktur Verbindungstechnik	Zeiten-, Kapazitätsanforderung
Bauteil-/Komponenteneigenschaften Produktfügestruktur	Produktionskonzept, -Szenarien
Produktfügestruktur Bauteil-/Komponenteneigenschaften Material Geometrie Verbindungstechnik	Automatisierungsgrad
Bauteil-/Komponenteneigenschaften Produktfügestruktur	Ergonomie, Sicherheit

sowie die Auswahl von Verbindungstechniken, die automatisierte Prozesse ermöglichen, sind Stellschrauben für eine automatisierungsgerechte Produktarchitektur.

Zuletzt können auch ergonomische und sicherheitsrelevante Anforderungen für die Werker durch gezielte Produktänderungen erfüllt werden. So kann die Umgestaltung von Bauteileigenschaften und Fügestrukturen manuelle Prozesse vereinfachen, indem kleinere und leichtere Baugruppen eine verbesserte Handhabung ermöglichen. Die Zuordnung der beschriebenen Artefakte zu den Modellabstraktionen und ihre Beziehungen sind in **Bild 3** dargestellt.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, betreffen die Abstraktionen in den jeweiligen Modellen Anforderungen, Funktionen und die logische Architektur. Im Produktmodell wird zwischen system- und produktionsbezogenen Artefakten unterschieden. Die Beziehungen zwischen den Artefakten sind in kausale Beziehungen, Allokationsbeziehungen und Ableitungsbeziehungen unterteilt. Kausale Beziehungen sind Architekturentscheidungen, welche zu einem Artefakt führen. Diese bestehen zwischen Anforderungen und Funktionen sowie zwischen logischen Systemelementen und den daraus abgeleiteten produktionsbezogenen Anforderungen. Bei den Allokationsbeziehungen handelt es sich um Entscheidungen zur Gruppierung oder Zuweisung bestimmter Artefakte zu anderen. Diese Allokationsbeziehungen treten bei der Zuordnung von Funktionen zu logischen Elementen auf, die diese Funktionen implementieren. Ebenso werden diese Beziehungen zwischen den system- und produktionsbezogenen logischen Elementen verwendet, um die funktionale Anordnung in der Produktfügestruktur abzubilden. Die Allokation wird auch zur Gruppierung innerhalb der logischen Architektur genutzt, etwa zur Allokation von Ressourcen auf spezifische Stationen.

Die letzte Beziehung ist die Ableitungsbeziehung, die Abhängigkeiten zwischen dem Produkt- und Produktionsmodell (vergleiche Tabelle) definiert. Diese Beziehung wird von Kopplungsartefakten abgeleitet. Sie dient sowohl der Ableitung der Anforderungen im Produktionsmodell aus den Produktartefakten als auch der Rückführung des Feedbacks aus dem Produktionssystemmodell zu den anzupassenden Produktartefakten.

3.3 Workflow zur Erstellung des Produktionsmodells und Optimierung der Produktarchitektur

In diesem Ansatz werden die Wechselbeziehungen durch einen gänzlich neu definierten Workflow zur Erstellung des Produktionsmodells und produktionsgerechten Optimierung der Produktarchitektur verarbeitet. Dieser beschreibt sowohl die Erstellung der Modelle als auch den kollaborativen Entwicklungsprozess. **Bild 4** veranschaulicht den Workflow grafisch.

Da wesentliche Anforderungen für die Produktionsplanung aus dem Produktmodell abgeleitet werden, erfolgt zunächst die Erstellung von Modellartefakten im Produktmodell, die anschließend an das Kopplungsartefakt übergeben werden. Wie im vor-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

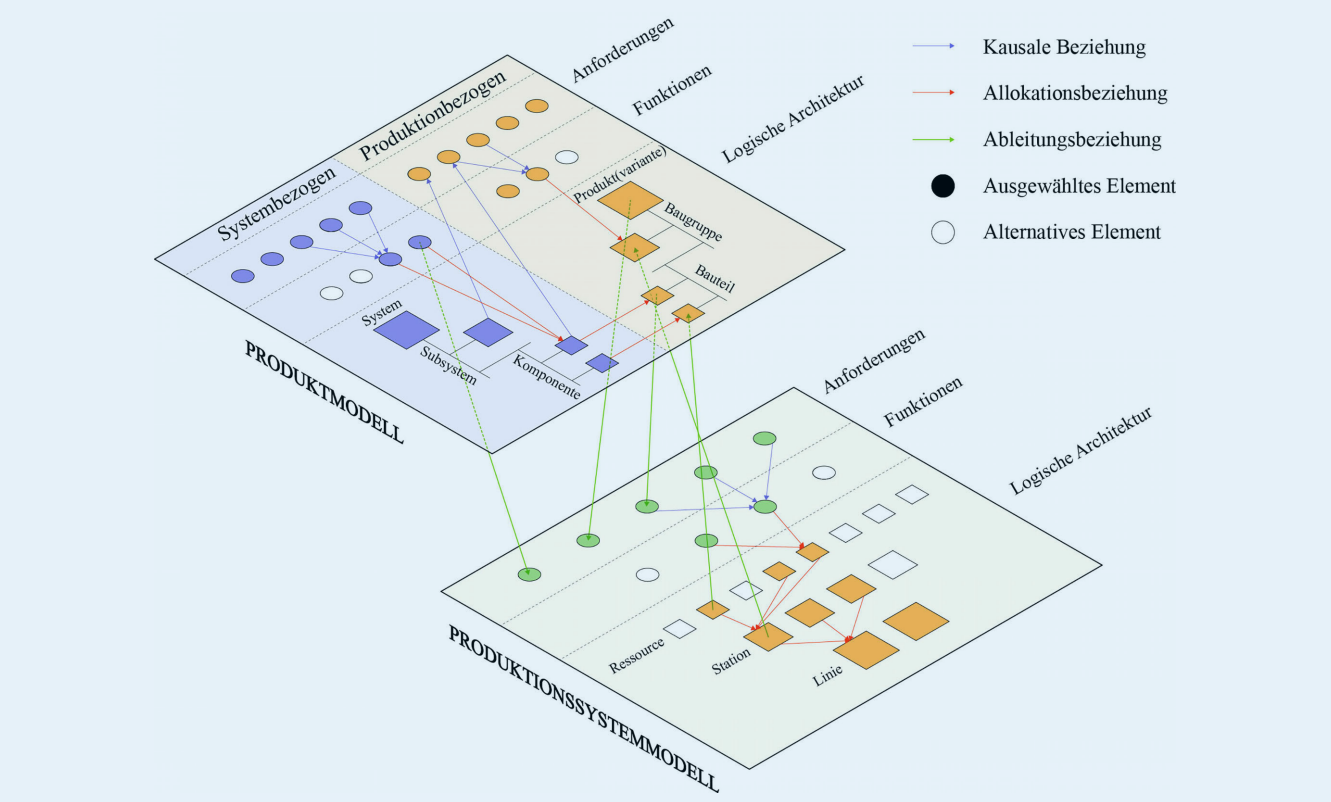

Bild 3. Wechselbeziehungen zwischen Domänenartefakten von RFLP (Anforderungen-Funktional-Logisch-Physisch)-basierten Modellen.
Grafik: eigene Darstellung

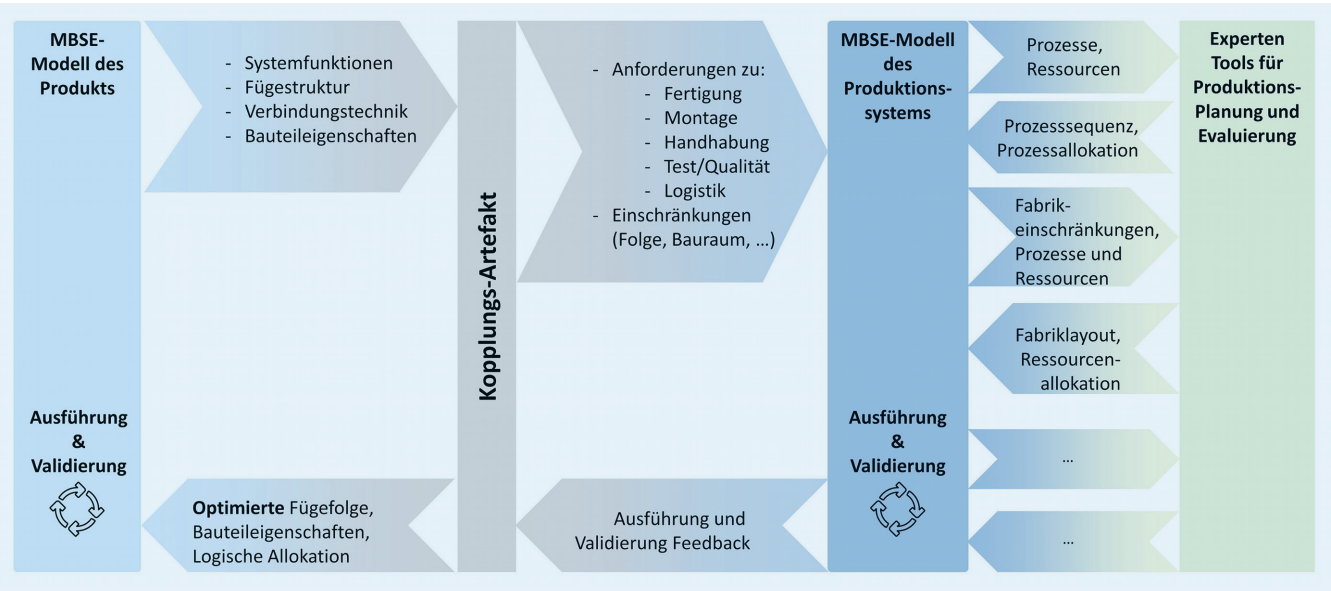

Bild 4. Workflow für die kollaborative Modellentwicklung und produktionsgerechte Produktanpassung. *Grafik: eigene Darstellung*

herigen Kapitel erläutert, umfassen diese Artefakte die Systemfunktionen, die Produktfügestrukturelemente, die ausgewählte Verbindungstechnik sowie Produkteigenschaften wie Material, Geometrie und Masse. Durch im Kopplungsartefakt definierte Domänenabhängigkeiten können auf Grundlage dieser Informationen spezifische Anforderungen generiert werden. Diese betreffen unter anderem die Fertigung, Montage, Handhabung, Logistik sowie Test- und Qualitätsprozesse. Auch werden Einschränkungen, etwa hinsichtlich der Reihenfolge der Produktionsprozesse oder des benötigten Bauraums, abgeleitet. Diese Anforderungen und Einschränkungen fließen in die Produktionsplanung ein und dienen der Definition des Lösungsraums für Funktionen und Ressourcenverhalten.

Im Produktionssystemmodell können zusätzlich nicht-produktbezogene Aspekte (vergleiche Kapitel 3.1) definiert werden. Daraufhin kann die Entwicklung der funktionalen und logi-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

schen Architektur erfolgen. Zur Unterstützung dieser Aktivitäten können Experten-Tools an das MBSE-Modell angebunden werden. Auf Basis der modellierten Prozesse und Ressourcen ist es somit möglich, die Prozessplanung sowie die Aufgabenzuteilung auf die Ressourcen mithilfe algorithmischer Optimierer durchzuführen. Zudem können Werkzeuge für das Fabriklayout und die Fließbandabstimmung eingesetzt werden, um die Dimensionierung der Fabrik sowie die Zuteilung von Ressourcen auf Stationen und Linien zu optimieren. Die Ergebnisse der Planung können in das Modell integriert werden, wodurch weitere Verhaltensweisen des Produktionssystemmodells modelliert und simuliert werden können. Auf diese Weise können die Anforderungen validiert und verifiziert werden. Das Feedback aus der Ausführung liefert wertvolle Informationen darüber, wo Anpassungen und Optimierungen in der Produktarchitektur erforderlich sind. Durch das an das Kopplungsartefakt zurückgeführte Feedback und das dort dokumentierte Domänenwissen können gezielt Stellschrauben (siehe Kapitel 3.3) identifiziert und neu konfiguriert werden. Auch im Produktmodell wird die neue Architektur ausgeführt und validiert, um die funktionale Auslegung des Produkts zu überprüfen. Dieser Workflow kann in mehreren Iterationen durchgeführt werden, mit dem Ziel, sowohl Produkt- als auch Produktionssystemanforderungen zu erfüllen. Auf diese Weise wird das Ziel einer gleichzeitigen Entwicklung des Produktionssystems und einer produktionsgerechten Produktentwicklung erreicht.

4 Diskussion des Modellkopplungsansatzes

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine produktionsgerechte Produktentwicklung und -beeinflussung parallel zur Planung und Absicherung des komplexen Luftfahrtproduktionssystems in frühen Entwicklungsphasen zu gewährleisten. Im Folgenden wird zunächst der entwickelte Ansatz im Hinblick auf das Forschungsziel und die spezifischen Anforderungen der Luftfahrt (siehe Bild 1) diskutiert.

Der Ansatz basiert auf der Entwicklung und Kopplung zweier domänenspezifischer MBSE-Modelle, um die jeweiligen Interessen und Anforderungen ganzheitlich zu berücksichtigen. Die Erweiterung des RFLP-Ansatzes ermöglicht die weitere Nutzung bestehender Modelle und Methoden in der Produktentwicklung. So können produktionsbezogene Anforderungen alternativer Produktarchitekturen unter Berücksichtigung anderer Stakeholder-Interessen validiert werden. Zudem erlauben die identifizierten Abhängigkeiten zwischen den Artefakten des Produkt- und Produktionsmodells eine Formalisierung und somit eine Automatisierung des vorgestellten kollaborativen Entwicklungsworkflows. Der vergleichsweise niedrige Informationsgehalt in den MBSE-Modellen sowie die damit verbundene Automatisierungsfähigkeit ermöglichen die Bewertung eines erweiterten Entwurfsraums für Produkt- und Produktionsarchitekturen in der konzeptuellen Entwicklungsphase. Außerdem wird der Entwicklungsprozess beschleunigt, da Expertentools direkte Schnittstellen zu formalen Produktionssystemmodellen besitzen können. Dies vereinfacht und optimiert den Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Planungsdisziplinen. Die Integration der produktbezogenen und industriellen Anforderungen in das ausführbare Produktionsmodell unterstützt die frühzeitige Analyse des entstehenden Verhaltens und möglicher Synergien im Produktionssystem. Dies schließt auch Fehler und Risiken ein, die durch gezielte Funktionen im Modell abgesichert werden können.

Die Anwendbarkeit des Ansatzes hängt einerseits von der Komplexität des betrachteten Produktionssystems ab. Die Modellierung und Integration dienen einer Beherrschung vielfältiger Wechselwirkungen und industrieller Anforderungen. Andererseits folgt der Ansatz einer Top-Down-Entwicklungsmethodik sowohl für das Produkt als auch für das Produktionssystem. Für die Abbildung von Systemausschnitten und die inkrementelle Bottom-up-Integration in die MBSE-Gesamtmodelle könnte eine Anpassung des Kopplungsansatzes erforderlich sein.

Eine Limitation der modellbasierten Methodik ergibt sich aus den eingesetzten Modellierungswerkzeugen, die einerseits über Datenaustauschschnittstellen für die Interoperabilität mit dem Kopplungsartefakt verfügen und andererseits Simulationsfunktionen für die Modellausführbarkeit bieten müssen. Zudem ist eine enge Abstimmung zwischen MBSE-Entwicklern und den Entwicklern des Kopplungsartefakts erforderlich. In diesem Zusammenhang ist eine klare Definition von MBSE-Rollen, wie sie von *Rusch et al.* in [26] beschrieben wird, von zentraler Bedeutung und eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung des Kopplungsansatzes.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Komplexität in der Luftfahrt zeigt sich sowohl in den Produkten als auch in den Produktionssystemen. Die Komplexitätsbeherrschung lässt sich durch die frühzeitige Berücksichtigung industrieller Anforderungen in der Produktentwicklung und durch die Analyse des Produktionssystems in konzeptionellen Phasen verbessern. Dies ermöglicht eine produktionsgerechte Produktentwicklung und reduziert den Aufwand in der Produktionsplanung in späteren Phasen. Im Rahmen einer Literaturanalyse wurden Ansätze zur produktionsgerechten Produktentwicklung und zur konzeptionellen Produktionssystementwicklung hinsichtlich wichtiger Anforderungen in der Luftfahrtindustrie untersucht. Die Analyse zeigte, dass es an Ansätzen mangelt, die eine produktionsgerechte Anpassung und Optimierung der Produktarchitektur unter Berücksichtigung des komplexen Verhaltens des Produktionssystems und der Absicherung der industriellen Anforderungen ermöglichen.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde eine Methodik entwickelt und beschrieben, die auf einer Kopplung des Produkt- und Produktionssystemmodells basiert. Die beiden Modelle wurden nach dem RFLP-Ansatz entwickelt. Die Methodik erkennt die Wechselbeziehung zwischen den beiden Domänenmodellen und nutzt diese für die kollaborative Entwicklung. Durch die Anwendung eines vorgeschlagenen Workflows kann das Produktionssystem bereits in konzeptionellen Produktentwicklungsphasen geplant und die industriellen Anforderungen abgesichert werden. Ebenso ermöglicht es die Identifikation und Anpassung von Stellschrauben für eine produktionsgerechtere Produktarchitektur.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die modellbasierte Methodik für die kollaborative Entwicklung vorgestellt. Um die MBSE-Modelle zu vervollständigen, müssen noch die domänenspezifischen Sprachen zur Modellierung der erkannten Artefakte und ihrer Beziehungen definiert werden. In zukünftigen Arbeiten soll auch konkret gezeigt werden, wie die Methodik mithilfe der Modellierungssprache in einem luftfahrtspezifischen Anwen-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

dungsfall bewertet werden kann. Ebenso ist dafür die technische Implementierung des Kopplungsartefakts notwendig. Es soll erforscht werden, wie die Domänenabhängigkeit, das Domänenwissen und die entsprechenden Regeln für die produktionsgerechte Produktanpassung aufgestellt und an die Modelle angebunden werden. Somit soll künftig die Erweiterung und Anwendung des Ansatzes eine ganzheitliche Bewertung sowie die Validierung der Luftfahrtanforderungen ermöglichen.

LITERATUR

[1] Roussel, S.; Polacsek, T.; Chan, A.: Assembly Line Preliminary Design Optimization for an Aircraft. 29th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2023). Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs) 280, pp. 32:1–32:19, DOI: doi.org/10.4230/LIPIcs.CP.2023.32

[2] Laukotka, F.; Oltmann, J.; Krause, D.: A digitized approach to reduce assembly conflicts during aircraft cabin conversions. DS 98: Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX 2019) (2019), pp. 251–262, doi.org/10.35199/dfx2019.22

[3] Ghanjaoui, Y.; Satwan, P.; Biedermann, J. et al.: Model-based assembly process planning for flexible aircraft cabin architectures. CEAS Aeronautical Journal 15 (2024) 4, pp. 1145–1156

[4] Arista, R.; Mas, F.; Oliva, M. et al.: Applied Ontologies for Assembly System Design and Management within the Aerospace Industry. JOWO (2019). Internet: ceur-ws.org/Vol-2518/paper-FOMI1.pdf. Zugriff am 25.04.2025

[5] Wildemann, H.; Hojak, F.: Main differences and commonalities between the aircraft and the automotive industry. In: Richter, K., Walther, J. (eds): Supply Chain Integration Challenges in Commercial Aerospace: A Comprehensive Perspective on the Aviation Value Chain. Cham: Springer 2017, pp. 119–138, doi.org/10.1007/978–3–319–46155–7_9

[6] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Berlin: Springer 2006

[7] Boothroyd, G.: Design for manufacture and assembly: The Boothroyd-Dewhurst experience. In: In: Huang, G.Q. (eds): Design for X: Concurrent engineering imperatives. Dordrecht: Springer 1996, pp. 19–40, doi.org/10.1007/978–94–011–3985–4_2

[8] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A.: Product design for manufacture and assembly. Boca Raton, Florida/USA: CRC press 2010

[9] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1: Digital Factory – Fundamentals. Ausgabe 02/2008

[10] Ferrer, B. R.; Ahmad, B.; Lobov, A. et al.: An approach for knowledge-driven product, process and resource mappings for assembly automation. 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Gothenburg, 2015, pp. 1104–1109

[11] Akundi, A.; Lopez, V.: A Review on Application of Model Based Systems Engineering to Manufacturing and Production Engineering Systems. Procedia Computer Science 185 (2021), pp. 101–108

[12] Thiers, G.; Sprock, T.; McGinnis, L. et al.: Automated production system simulations using commercial off-the-shelf simulation tools. 2016 Winter Simulation Conference (WSC), Washington, DC/USA, 2016, pp. 1036–1047

[13] Batarseh, O.; McGinnis, L.; Lorenz, J.: 6.5.2 MBSE Supports Manufacturing System Design. INCOSE International Symposium 22 (2012) 1, pp. 850–860

[14] Baughey, K.: Functional and Logical Structures: A Systems Engineering Approach. SAE 2011 World Congress & Exhibition, 2011, DOI: doi.org/10.4271/2011–01–0517

[15] Sinnwell, C.; Krenkel, N.; Aurich, J. C.: Conceptual manufacturing system design based on early product information. CIRP Annals 68 (2019) 1, pp. 121–124

[16] SAE International: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. Aerospace Recommended Practice ARP4754B. Stand: 2023. Internet: www.sae.org/standards/content/arp4754b/. Zugriff am 25.04.2025

[17] Halfmann, N.; Krause, D.; Umlauft, S.: Assembly Concepts for Aircraft Cabin Installation. ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 733–739

[18] Halfmann, N.: Montagegerechtes Produktstrukturieren im Kontext einer Lebensphasenmodularisierung. Hamburg: TuTech Verlag 2015

[19] Beers, L.; Weigand, M.; Nabizada, H. et al.: MBSE Modeling Workflow for the Development of Automated Aircraft Production Systems. 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sinaia, Romania, 2023, pp. 1–8

[20] Beers, L.; Nabizada, H.; Weigand, M. et al.: Towards an MBSE Approach for Modeling Complex Production Systems Based on Industrial Standards. 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Padova, Italy, 2024, pp. 1–8

[21] Bley, H.; Franke, C.: Integration of Product Design and Assembly Planning in the Digital Factory. CIRP Annals 53 (2004) 1, pp. 25–30

[22] Gregor, M.; Medvecky, S.; Matuszek, J. et al.: Digital Factory. Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems (2009) 3, pp. 123–132

[23] Michalos, G.; Makris, S.; Mourtzis, D.: An intelligent search algorithm-based method to derive assembly line design alternatives. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 25 (2012) 3, pp. 211–229

[24] Ghanjaoui, Y.; Bussemaker, J. H.; Biedermann, J. et al.: An Ontology-based Approach for the Co-Development and Optimization of Aircraft Cabin Design and Assembly Architectures. Stand: 2024. Internet: www.icas.org/icas_archive/icas2024/data/papers/icas2024_1152_paper.pdf. Zugriff am 25.04.2025

[25] Lucko, A.; Brockmeyer, H.; Mantwill, F.: Frühzeitige Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im automobilen Karosseriebau: Das Projekt Pro²Kar. Stand: 2007. Internet: https://www.designsociety.org/download-publication/27672/Fr%C3%BChzeitige+Produktbeeinflussung+und+Produktabsicherung+im+automobilen+Karosseriebau+%E2%80%93+Das+Projekt+Pro2Kar. Zugriff am 25.04.2025

[26] Rusch, F.; Hage, H.; Mantwill, F.: Rollenprofile zur erfolgreichen Umsetzung des MBSE. Model-based Systems Engineering in der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktion. wt werkstatttechnik online 115 (2025) 7/8

Yassine Ghanjaoui, M.Sc.
yassine.ghanjaoui@dlr.de
Tel. +49 40 / 2489-641384

Deutsches Luft- und Raumfahrt Zentrum
Hein-Saß-Weg 22, 21129 Hamburg
www.dlr.de

Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill
frank.mantwill@hsu-hh.de
Tel. +49 40 /6541-2730

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg
www.hsu-hh.de/mrp

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-132 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY