



3.1 Methodische Produktentwicklung

Erfindergeist liegt in der Natur des Menschen. Von der Entdeckung des Feuers, der Erfindung der Dampfmaschine bis hin zur Entwicklung von zunehmend schnelleren, effizienteren und sichereren Flugzeugen wurden komplexe Probleme identifiziert und gelöst. Je komplexer ein Problem ist, umso schwieriger ist dessen Lösung. Um den Prozess der Lösungsfindung einfacher, schneller und effizienter zu gestalten, wurden insbesondere in den letzten 80 Jahren weit über 100 systematische Ansätze entwickelt [251, S. 30]. Ein systematischer Ansatz zur Erarbeitung eines Produkts, der aus der geordneten Anwendung einer spezifischen Sammlung von Methoden, Techniken und Richtlinien besteht, wird als Konstruktionsmethodik definiert [252, S. 131].

3.1.1 Konstruktionsmethodische Ansätze

Die Werke von Adams [253, S. 26–42], Cross [254], Lindemann [255, S. 39–63], Winzer [251] und Wulf [256, S. 8] geben einen Überblick über die systematischen Ansätze, die zu den verschiedenen Zeiten in verschiedenen Teilen der Welt entwickelt wurden. Zu den bekanntesten Ansätzen für das methodische Entwickeln technischer Produkte zählen die Ansätze:

- von Asimov [253, S. 26],
- von Cross [253, S. 28],
- von Pugh [253, S. 30–33],
- von Roth [257], [258], [259],

- von Hubka und Eder [253, S. 30],
- von Koller [257, S. 43],
- von Pahl und Beitz [260, S. 17],
- von Rodenacker [257, S. 43],
- von Adams und Keating [253],
- das Verfahren nach VDI-Richtlinie 2221 [50], [261], [262],
- das V-Modell nach VDI-Richtlinie 2206 [52],
- das Münchener Produktkonkretisierungsmodell [255], [263],
- das Vorgehen nach IEEE 1220–2005 [264] sowie
- das Design for Six Sigma [265, S. 137–146].

Unter den Konstruktionsmethodiken sind zahlreiche Ansätze zu finden, die dem Systems Engineering (SE) zuzuordnen sind. Dieses beschreibt das Denken in Systemen durch Zerlegen komplexer Problemstellungen in Einzelaspekte und Teilsysteme [251, S. 1]. Dadurch entstehen kleinere überschaubare Teilprobleme. So kann beispielsweise die Erarbeitung eines variablen Konzepts für das Flugzeugteilsystem Triebwerkseinlass einen Teilaspekt in der Entwicklung neuartiger kommerzieller Überschallflugzeuge darstellen.

Vorgehensweise

Zu den Ansätzen des Systems Engineerings gehören auch die global verbreiteten, aus Deutschland stammenden Vorgehensweisen nach VDI-Richtlinie 2221 sowie nach Pahl und Beitz [251, S. 29–31]. Die Ansätze verlaufen dabei von der abstrakten Aufgabenstellung zur konkreten konstruktiven Lösung [255, S. 56]. Dafür sind beim Vorgehen nach Pahl und Beitz [260, S. 17] die folgenden Prozessschritte erforderlich:

- „Planen und Klären der Aufgabe“, einschließlich des Erarbeitens einer Anforderungsliste,
- „Entwickeln der prinzipiellen Lösung“, inklusive des Ermitteln von Funktionen, Wirkprinzipien und Lösungsvarianten sowie der Bewertung dieser nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien,
- „Entwickeln der Baustruktur“ durch Grob- und Feingestaltung, samt Festlegung auf einen vorläufigen Entwurf,
- „endgültiges Gestalten der Baustruktur“, unter anderem durch Fehlerüberprüfung und Schwachstellenbeseitigung sowie
- „Entwickeln der Ausführungs- und Nutzungsunterlagen“ durch eine vollständige Produktdokumentation, einschließlich der Freigabe zur Fertigung.

Die VDI-Richtlinie 2221 [50, S. 14–16], [261, S. 31] empfiehlt die Durchführung folgender Aktivitäten und Erstellung zugehöriger Teilergebnisse:

- „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“, woraus die Anforderungen an das Produkt hervorgehen,
- „Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“ mittels Funktionsmodellen,
- „Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“, aus denen prinzipielle Lösungskonzepte resultieren,
- „Bewerten und Auswählen von Lösungskonzepten“,
- „Gliedern in Module“ und Schnittstellendefinition zur Ermittlung einer Systemarchitektur,
- „Gestalten der Module“ zu Vorentwürfen,
- „Integrieren des gesamten Produktes“ zum Gesamtentwurf sowie
- „Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben“.

Anpassungen dieser Schritte sind in Abhängigkeit der Aufgabe jedoch ausdrücklich erlaubt [262, S. 30]. So weicht beispielsweise der Ansatz von Roth [257, S. 34] nur dahingehend von der Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 2221 ab, dass die Identifikation von Lösungsprinzipien in die Teilschritte zur Identifikation von Effekt- und Gestaltlösungsprinzipien unterteilt wird.

Bei den vorgestellten Ansätzen handelt es sich um annähernd lineare Modelle [266, S. 5–6]. Dennoch führt das einmalige, lineare Durchlaufen dieser Vorgehensweisen häufig nicht zu befriedigenden Ergebnissen, weshalb ein iteratives Vorgehen zwischen den Prozessschritten empfohlen wird [260, S. 16]. Aus diesem Grund empfiehlt das V-Modell eine kleinschrittigere Überprüfung der Teilergebnisse. Zudem befürwortet das Münchener Modell eine sehr starke Vernetzung der einzelnen Prozessschritte [260, S. 16–21].

Bei einem Großteil der weit verbreiteten Konstruktionsansätze stimmen die meisten Prozessschritte grundlegend überein [251, S. 77–80], [257, S. 38]. So ordnet Roth [257, S. 38] die jeweiligen Prozessschritte der verschiedenen methodischen Ansätze den folgenden Phasen zu:

- Aufgabenformulierungsphase,
- funktionelle Phase,
- prinzipielle Phase,
- gestaltende Phase und
- Detaillierungsphase.

Winzer [251, S. 77–80] ergänzt dies durch die Erkenntnis, dass die meisten Konstruktionsansätze eine Anpassung durch die problemspezifische Einbindung zusätzlicher Methoden, Verfahren und Hilfsmittel erlauben.

Methoden und Hilfsmittel

Es existiert eine Vielzahl möglicher Methoden, die den einzelnen Prozessschritten bzw. Prozessphasen des gewählten Konstruktionsansatzes zugeordnet werden können. Lindemann [255, S. 241–328] stellt den Zweck, die passende Einsatzsituation, die voraussichtliche Wirkung, die Vorgehensweise und erforderliche Werkzeuge von etwa 80 allgemeinen Konstruktionsmethoden vor. Die VDI-Richtlinie 2221 [50, S. 33–38] und Conrad [267, S. 93/133] geben für die jeweiligen Prozessphasen zahlreiche geeignete Methoden an.

Die allgemeinen Konstruktionsmethoden können durch Methoden der Problemlösung, des Kostenmanagements sowie der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse ergänzt werden. Für den ersten Aspekt existiert die aus Russland stammende Theorie des erfinderischen Problemlösens, kurz TRIZ [268], [269], [270]. Diese Werkzeugsammlung besteht aus etwa 40 Methoden für systematische Innovation [268, S. 2–15], [271, S. 40]. Bezüglich des Kostenmanagements stellen Ehrlenspiel et al. [263, S. 77–78] über 50 Methoden vor. Auf den Aspekt der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse wird im nachfolgenden Kapitel detailliert eingegangen.

3.1.2 Sicheres und zuverlässiges Konstruieren

Die zunehmende Komplexität moderner (mechatronischer) Systeme zieht eine potenziell erhöhte Fehleranfälligkeit bzw. geringere Zuverlässigkeit nach sich. Die Sicherheit und die Zuverlässigkeit eines Produktes spielen in den verschiedenen Industriebereichen aus Gründen der wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit bis hin zur gesellschaftlichen Akzeptanz eine wichtige Rolle. Zu diesen Bereichen zählen die Energie-, Eisenbahn-, Schiffs-, Automobil- und Luftfahrtindustrie [272, S. 27]. Dabei werden in den jeweiligen genannten Industrien zumeist unterschiedliche Ansätze für Zuverlässigkeit und Sicherheit verfolgt. Dennoch zeigen diese Ansätze auf, dass der beste Zeitpunkt zur Verbesserung dieser Eigenschaften in den frühen Entwicklungsphasen eines Produkts liegt. [273, S. 3].

Zuverlässigkeit

Bertsche [273, S. 1] definiert Zuverlässigkeit in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4003 [274] als Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt über einen gewissen

Zeitraum bei üblichen Betriebsbedingungen nicht ausfällt. Allgemeinhin enthalten die meisten Definitionen der Zuverlässigkeit [252, S. 372], [253, S. 77], [275, S. 1], [276, S. 1] die folgenden Teilelemente:

- die Einschränkung der Leistung oder Funktion eines Systems,
- eine Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieses Ereignisses,
- einen Zeitraum und
- spezifische Betriebsbedingungen in der üblichen Systemumgebung.

Die meisten allgemeinen konstruktionsmethodischen Ansätze integrieren Zuverlässigkeitsuntersuchungen, beispielsweise in Form von Schwachstellenanalysen oder Prototypentests [260, S. 17], in späteren Phasen, in denen die Konstruktion bereits sehr detailliert ist [257, S. 34]. Diese Vorgehensweise hat zur Folge, dass das Einbringen von Änderungen mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden sein kann [263, S. 13], [273, S. 4]. Die Ursache möglicher Fehler und Schwachstellen kann jedoch schon in früheren Phasen liegen und bereits dort identifiziert werden [263, S. 13].

Es ist demzufolge möglich, Zuverlässigkeit in ein Produkt hinein zu entwickeln [275, S. 1]. Dies wird organisatorisch durch das Zuverlässigkeitsmanagement nach DIN EN 60300–1 unterstützt [273, S. 411]. Das Zuverlässigkeitsmanagement beinhaltet beispielsweise die Erstellung eines Zuverlässigkeitsprogrammplans und eines Zuverlässigkeitshandbuchs, vgl. hierzu Bertsche [273, S. 411–420] sowie Meyna und Pauli [275, S. 133–141].

Ein erster Bestandteil des Zuverlässigkeitsmanagements bei der Erarbeitung eines technischen Systems ist die Verwendung eines ausgereiften Konstruktionsprozesses und geeigneter analytischer Zuverlässigkeitsmethoden [273, S. 4]. Die Verwendung eines ausgereiften Konstruktionsprozesses trägt zur Vermeidung von Schwachstellen bei, indem

- ein genaues und vollständiges Anforderungsdokument erstellt wird,
- bewährte Konstruktionsrichtlinien eingesetzt werden und
- eine frühzeitige und umfassende Erprobung erfolgt [273, S. 5].

Analytische Zuverlässigkeitsmethoden werden in qualitative und quantitative Methoden unterteilt. Qualitative Methoden können zur Identifikation von Schwachstellen und potenzieller Fehlerereignisse sowie daraus resultierender Folgen verwendet werden [273, S. 4]. Quantitative Zuverlässigkeitsmethoden werden zur Vorhersage von Fehlerwahrscheinlichkeiten eingesetzt und erlauben eine Prognose

der Systemzuverlässigkeit [273, S. 4]. Hierfür sind neben den entsprechenden Zuverlässigkeitsmethoden auch die üblichen Ausfallraten von Komponenten erforderlich.

Ausfallraten von Komponenten können Zuverlässigkeitsdatenbanken, z. B. dem Militärhandbuch MIL-217 des Verteidigungsministeriums der Vereinigten Staaten von Amerika [277] oder dem Zuverlässigkeitsdatenhandbuch RDF 2000 [275, S. 649] entnommen werden. Vereinzelt fasst auch die Fachliteratur [275, S. 114], [278, S. 355] entsprechende Daten zusammen.

Über 80 Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse werden einschließlich ihrer Vor- und Nachteile von Kritzinger [279, S. 214–291] erläutert. Die VDI-Richtlinie 4003 präsentiert 36 analytische und experimentelle Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse und stellt Hinweise zur problemspezifischen Auswahl geeigneter Methoden zur Verfügung [274, S. 40–73]. Bertsche [273, S. 3] zeigt eine mögliche Zuordnung geeigneter Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse zu den einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus allgemeiner technischer Anwendungen auf.

Durch die Ermittlung von Fehlerwahrscheinlichkeiten mit Hilfe des Zuverlässigkeitsmanagements kann zudem die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Systems quantifiziert werden. Die Ausfallwahrscheinlichkeit entspricht der Fehleranzahl innerhalb eines bestimmten Zeitraums bezogen auf die Anzahl der untersuchten Fälle [77, S. 706]. Darüber hinaus sind die Folgen eines Fehlers auf ein System und seine Umwelt zu untersuchen. Diese Folgen können auch sicherheitsrelevante Effekte oder Auswirkungen, wie Verletzungen und Todesfälle, umfassen und sind somit Bestandteil der Sicherheitsanalyse [77, S. 706].

Sicherheit

Unter dem Begriff der Sicherheit ist ein Zustand zu verstehen, bei dem das vorhandene Risiko kleiner als das zulässige Risiko ist [77, S. 706]. Das vorhandene Risiko wird aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen Auswirkungen ermittelt [275, S. 56]. Das zulässige Risiko ist der Grenzwert, der das größte noch vertretbare Risiko eines bestimmten Zustands darstellt.

Das Ausschließen eines Risikos und somit eine vollständige Sicherheit sind nicht möglich. So wird bei Ereignissen mit schweren Auswirkungen nur eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit toleriert, während bei Ereignissen mit geringen Auswirkungen größere Eintrittswahrscheinlichkeiten akzeptabel sind. Die Herausforderungen, Methoden und Ansätze des Sicherheitsmanagements stimmen mit denen des Zuverlässigkeitsmanagements größtenteils überein [275, S. 142]. Einzig die Bewertung der Auswirkungen eines Fehlers auf Mensch und Umwelt muss zusätzlich erfolgen [275, S. 142].

In der europäischen Luftfahrt werden die möglichen Auswirkungen eines Fehlers durch die EASA nach CS-AMC 25.1309 (Acceptable Means of Compliance, akzeptierbare Nachweismittel) wie folgt kategorisiert:

- unbedeutend (Minor),
- bedeutend (Major),
- gefährlich (Hazardous) und
- katastrophal (Catastrophic) [34, AMC 25.1309].

Weiterhin wird eine Einteilung in diese Kategorien anhand der Auswirkungen auf Flugzeug, Passagiere und Cockpitbesatzung vorgegeben und eine akzeptable Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet, vgl. Tabelle 3.1

Tabelle 3.1 Fehlerkategorien nach CS-AMC 25.1309

Kategorie	Effekt auf Flugzeug	Effekt auf Passagiere	Effekt auf Cockpit	Erlaubte Ereignisse pro Flugstunde
Unbedeutend (Minor)	Geringe Verringerung von Funktionsfähigkeit oder Sicherheit	Körperliche Beschwerden	Geringe Zunahme der Arbeitslast	<1E-03
Bedeutend (Major)	Merkliche Verringerung von Funktionsfähigkeit oder Sicherheit	Körperliche Bedrängnis, mögliche Verletzungen	Körperliche Beschwerden oder signifikante Zunahme der Arbeitslast	<1E-05
Gefährlich (Hazardous)	Große Verringerung von Funktionsfähigkeit oder Sicherheit	Schwerwiegende oder tödliche Verletzungen einer kleinen Personenanzahl	Körperliche Bedrängnis oder überfordernde Arbeitslast	<1E-07
Katastrophal (Catastrophic)	Üblicherweise Flugzeugtotalschaden	Mehrere Todesopfer	Todesopfer oder Arbeitsunfähigkeit	<1E-09

Alle Ereignisse, die keinen Einfluss auf die Betriebsfähigkeit, die Sicherheit oder die Flugbesatzung haben und maximal kleine Unannehmlichkeiten für Passagiere verursachen, sind keine Sicherheitseffekte [34, AMC 25.1309].

Sicherheitsprozess in der Luftfahrt

Fehler können in der Luftfahrt schnell zu Unfällen mit einer großen Anzahl an Todesfällen führen. Dennoch wurde im Zeitraum von 1990 bis 2010 in der Luftfahrt eine Rate von ungefähr einem Todesfall pro einer Million Flügen erreicht [79, S. 123]. Ziel bei der Auslegung von Luftfahrzeugen ist es, dass katastrophale Ereignisse mit mehreren Todesfällen maximal alle 10 Millionen Flugstunden eintreten [79, S. 125]. Der Anteil einzelner Flugzeugsysteme daran, darf ein Ereignis pro 1.000 Millionen Flugstunden bzw. 10^{-9} Ereignisse pro Flugstunde nicht überschreiten [79, S. 125]. Zum Vergleich erreicht ein Flugzeug, das über 20 Jahre je 300 Tage à 10 Stunden im Einsatz ist, 60.000 Flugstunden, sodass das Eintreten eines katastrophalen Ereignisses über ein Flugzeugleben hinweg extrem unwahrscheinlich (Extremely Improbable) ist [79, S. 127].

Dieses geringe Sicherheitsrisiko wird durch stetige Verbesserungen in den Bereichen Konstruktionsmethoden, Flugbetrieb, Wartung, Luftverkehrsmanagement und behördliche Regularien sichergestellt [280]. Seit dem Chicagoer Abkommen im Jahr 1944 existieren zivile Behörden für die internationale Luftfahrt [281, S. 9]. Diese veröffentlichen Vorschriften und überprüfen deren Einhaltung, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. In Europa ist hierfür die Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) zuständig. In den Vereinigten Staaten von Amerika die FAA. Die von der EASA und der FAA herausgegebenen Vorschriften stimmen größtenteils miteinander überein [281, S. 42].

Die EASA publiziert unter anderem Zertifizierungsspezifikationen (CS) bzw. Bauvorschriften, deren Erfüllung im Rahmen der Zertifizierung zum Erlangen der Luftfahrtzulassung eines Produkts nachgewiesen werden muss [281, S. 5–7]. Zudem schlägt die EASA in Form der AMCs akzeptable Mittel zum Nachweis der Einhaltung der Vorschriften vor. Diese Nachweismittel reichen von Berechnungen, Analysen und Simulationen bis hin zu Tests [281, S. 72].

Kritzinger [53], Hinsch [281] und de Florio [282] stellen den Ablauf des Zulassungsprozesses in der Luftfahrt vor. Erforderlich für die Konzepterarbeitung bis TRL 3 sind davon lediglich Kenntnisse über einzuhaltende behördliche Vorschriften sowie der zugehörigen AMCs. Die Identifikation dieser Daten erfolgt im Rahmen einer Musterzulassungsanalyse [281, S. 52–54].

Für variable Triebwerkeinlässe sind in Europa die Bauvorschriften für große Flugzeuge entsprechend der CS-25 [34] relevant. Diese beschreiben in Paragraph 25.1309 sowie den zugehörigen AMCs den Sicherheitsbewertungsprozess in der Luftfahrt [34, AMC 25.1309]. Dieser basiert auf empfohlenen Praktiken für die Luftfahrt (Aerospace Recommended Practice, ARP), die von der Society of Automotive Engineers (SAE) erarbeitet wurden. Die SAE ist ein Konsortium bestehend aus diversen Unternehmen und Behörden der Luftfahrt [32, S. 4]. Insbesondere sind

hierbei der sicherheitstechnische Entwicklungsprozess von Flugzeugsystemen nach ARP 4754A [32, S. 24–33] sowie die detaillierten Richtlinien zu dessen empfohlenen Methoden und Techniken nach ARP 4761 [57] von Bedeutung [53, S. 7], [77, S. 709], [79, S. 206], [275, S. 142], [280].

Der empfohlene Entwicklungsansatz für die Luftfahrt gemäß ARP 4754 A basiert auf dem V-Modell des Systems-Engineering [32, S. 24]. Bei diesem Ansatz wird ein Produkt über den Einsatz verschiedener Detaillierungsstufen entwickelt [283]. Für die Luftfahrt bedeutet dies, dass Anforderungen, Funktionen und Architekturen von der Flugzeug- über die System- bis hin zur Elementebene erarbeitet werden [32, S. 24], [57, S. 20], vgl. Abbildung 3.1. Elemente können sämtliche Komponenten, wie beispielsweise Gegenstände, Materialien und Software, sein [80, S. 129].

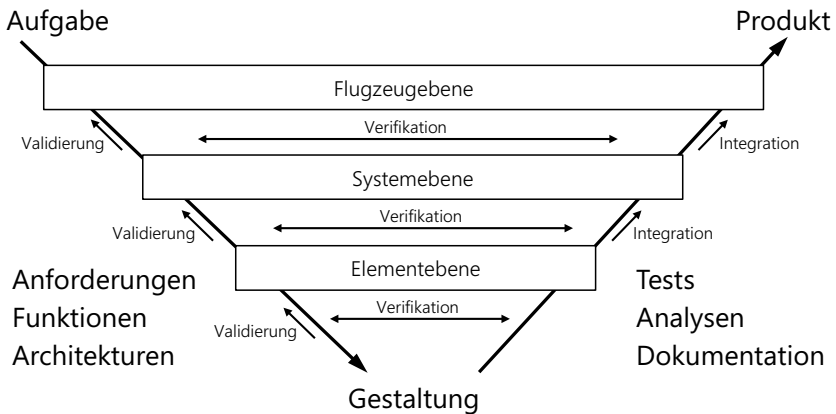


Abbildung 3.1 V-Modell in der Luftfahrt gemäß ARP 4754A [32, S. 24]

Zudem wird über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg ein Fokus auf eine hohe Absicherung der Funktionsweise des entstehenden Produkts gelegt [52]. Zum einen erfolgt dies durch das Validieren der Anforderungen, also das Feststellen ihrer Gültigkeit, auf der nächsthöheren Detaillierungsstufe [32, S. 24]. Zum anderen wird die Absicherung durch die Verifikation erreicht. Diese ist der Nachweis darüber, dass die erarbeitete Lösung die gestellten Anforderungen und geforderten Funktionen erfüllt [32, S. 24]. Dazu werden Tests und Analysen auf allen Detaillierungsstufen eingesetzt [32, S. 24].

Jeder Phase des Entwicklungsprozesses sind Methoden und Techniken der Sicherheitsanalyse und -bewertung zugeordnet. Diese werden von der SAE in ARP

4761 [57] sowie von Kritzinger [279] detailliert an Beispielen beschrieben. Die wichtigsten Methoden dieses Prozesses sind:

- die Gefährdungsanalyse (Functional Hazard Assessment, FHA),
- die vorläufige Systemsicherheitsanalyse (Preliminary System Safety Assessment, PSSA),
- die Systemsicherheitsanalyse (System Safety Assessment, SSA),
- die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis, FTA),
- die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA),
- die Fehlermöglichkeits- und Effektzusammenfassung (Failure Modes and Effects Summary, FMES) und
- die Analyse von Fehlern gemeinsamer Ursachen (Common Cause Analysis, CCA), bestehend aus:
 - o der Zonensicherheitsanalyse (Zonal Safety Analysis, ZSA),
 - o der Analyse besonderer Risiken (Particular Risks Analysis, PRA) sowie
 - o der Analyse redundanzüberbrückender Fehler (Common Mode Analysis, CMA) [34, AMC 25.1309], [77, S. 709]. [275, S. 144].

Zudem empfiehlt die Fachliteratur [66, S. 41], [80, S. 129], [97, S. 24–27], [284, S. 25–36] die Durchführung von zahlreichen Ergebnisüberprüfungen (Reviews). Diese Überprüfungen können nach jedem Arbeitsschritt, zumindest aber zum Abschluss jeder Phase erfolgen.

3.2 Verwendeter Ansatz zur Konzepterarbeitung

Nachfolgend wird der Entwicklungsansatz für sichere Produkte, der dieser Arbeit zugrunde liegt, vorgestellt. Im anschließenden Kapitel 4 wird die Anwendung dieses Ansatzes für die Konzepterarbeitung variabler Pitot-Einlässe für Flugzeugtriebwerke beschrieben.

Ziel des Ansatzes ist es, die Erarbeitung und konstruktionstechnische Gestaltung von Konzeptlösungen innerhalb akademischer Studien zu ermöglichen. Dabei sollen primär spezifische Probleme in der Luftfahrtindustrie betrachtet werden. Durch die Beachtung der industriespezifischen Standards für Sicherheit und Zuverlässigkeit sollen die Konzeptlösungen eine höhere praktische Relevanz als vergleichbare akademische Studien erreichen können. Dabei sollen die Konzepte

innerhalb der akademischen Studien nicht bis zur Marktreife entwickelt werden. Stattdessen sind geeignete Konzeptideen bis zu einem Detaillierungsgrad zu untersuchen, der die Bewertung der Umsetzbarkeit der Technologie erlaubt. Hierfür ist der Technologie-Reifegrad TRL 3 geeignet [55], [56]. Dieser umfasst den Nachweis der gewünschten Funktion durch Analysen, Simulationen und Laborexperimente [56, S. 10–11]. Darüber hinaus sollten akademische Studien einen Ausblick über die nächsten erforderlichen Arbeitsschritte zur Erlangung der Marktreife geben.

In akademischen Studien steht zudem der Erkenntnisgewinn, beispielsweise über die Einsetzbarkeit neuartiger Werkstoffe, im Vordergrund. Bisherige akademische Studien haben häufig innovative Lösungsideen hervorgebracht, ohne allerdings deren Umsetzbarkeit zu beachten. Die Identifikation innovativer und umsetzbarer Lösungsideen wird durch eine gründliche Abdeckung des potenziellen Lösungsraumes und einen ähnlichen Detaillierungsgrad der Lösungsalternativen unterstützt. Gründlichkeit und ähnliche Detaillierung sollten auch in Anbetracht des vergleichsweise geringen Personal- und Sachmittelaufwands Vorrang gegenüber Zeit- und Kosteneffizienz genießen. Diese Randbedingungen schränken den Umfang der Studien und den erreichbaren Detaillierungsgrad der entwickelten Konzepte auf TRL 3 ein.

Dementsprechend ist ein Ansatz zu wählen, mit dessen Hilfe zum Ende einer Studie der Nachweis der gewünschten Funktion erbracht werden kann. Dieser sollte auf einem erprobten Entwicklungsansatz, beispielsweise dem nach VDI-Richtlinie 2221 [50, S. 33–38], beruhen. Zudem sollten Methoden der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse nach ARP 4754A [32, S. 24] und ARP 4761 [57] zur Verifikation und Validierung der Teillösungen integriert sein. Auch sollten potenzielle Schwachstellen und Risiken frühzeitig identifiziert, beispielsweise durch eine Gefährdungsanalyse, und vertieft untersucht werden. Dies erfordert auch eine gewisse Anpassbarkeit des Ansatzes während der Konzepterarbeitung. Weiterhin sollte vermieden werden, dass ein Produkt in den nachfolgenden Phasen der Entwicklung erforderliche Zulassungsnachweise aufgrund systematischer Konstruktionsfehler nicht erfüllen kann. Diese Konstruktionsfehler können die Wiederholung kostenintensiver Tests erforderlich machen. Auch gehen Konstruktionsanpassungen in späteren Entwicklungsphasen mit deutlich mehr Aufwand einher. Deshalb sollten bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses alle zu erfüllenden Bauvorschriften der CS-25 sowie die zugehörigen Nachweismittel identifiziert werden. Dies erfolgt im Rahmen einer Musterzulassungsanalyse.

Die abschließende Festlegung auf ein Konzept sollte möglichst spät erfolgen. Bis zu dieser Festlegung sind als Bestandteil des Risikomanagements mehrere

Alternativlösungen simultan zu untersuchen. Zudem sollte der Ansatz auch den frühzeitigen Bau von Demonstratoren zum Nachweis der Funktionalität und zur Identifikation von Schwachstellen beinhalten. Dies stellt den größten Unterschied im Vergleich zum angesprochenen akademischen Ansatz für sichere Produkte von Grasselt et al. [54], [58], [59] dar.

Der verwendete Konstruktionsansatz für zuverlässige und sichere Konzepte bis TRL 3 wird in Anlehnung an Roth [257, S. 38] in fünf Phasen eingeteilt:

- Anforderungsanalyse,
- Funktionsanalyse,
- Konzeptphase,
- Vorentwurfsphase und
- Detaillierungsphase.

Die iterativen Arbeitsschritte der einzelnen Phasen orientieren sich an der VDI-Richtlinie 2221 [50, S. 14–16], [261, S. 25]. Zudem werden den einzelnen Phasen eng miteinander verknüpfte Teilaufgaben in Form allgemeiner Konstruktionsmethoden sowie ausgewählter Methoden der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse zugeordnet, vgl. Abbildung 3.2. Die Methoden der jeweiligen Phasen werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.2.1 Anforderungsanalyse

Zu Beginn der Anforderungsanalyse wird die Aufgabenstellung geklärt und präzisiert [50, S. 14–16]. Dafür ist die Motivation zum Erarbeiten der Aufgabenstellung darzulegen. Weiterhin ist die Aufgabenstellung in beherrschbare Teilaufgaben zu unterteilen. Zu diesen Teilaufgaben können die Identifikation des Anwendungsbereichs, der Nachweis der Umsetzbarkeit und die Bestimmung des Potenzials des erarbeiteten Konzepts zählen. Zudem sind Anforderungen strukturiert zu identifizieren und daraus Kriterien für die spätere Lösungsbewertung herzuleiten.

Erarbeiten der Anforderungsliste

Im Anschluss an das Klären der Aufgabe müssen sämtliche Anforderungen identifiziert werden, die maßgeblich für die Lösungsfindung und Gestaltung des Konzepts sind [260, S. 319]. Dies erfolgt durch die Erstellung einer Anforderungsliste. Die Anforderungsliste beinhaltet alle Interessen möglicher Kunden und Entwickler sowie relevante Gesetze, Standards und Vorschriften [260, S. 320]. Die Erstellung der Anforderungsliste hat weitreichende Folgen für das zu entwickelnde Konzept.

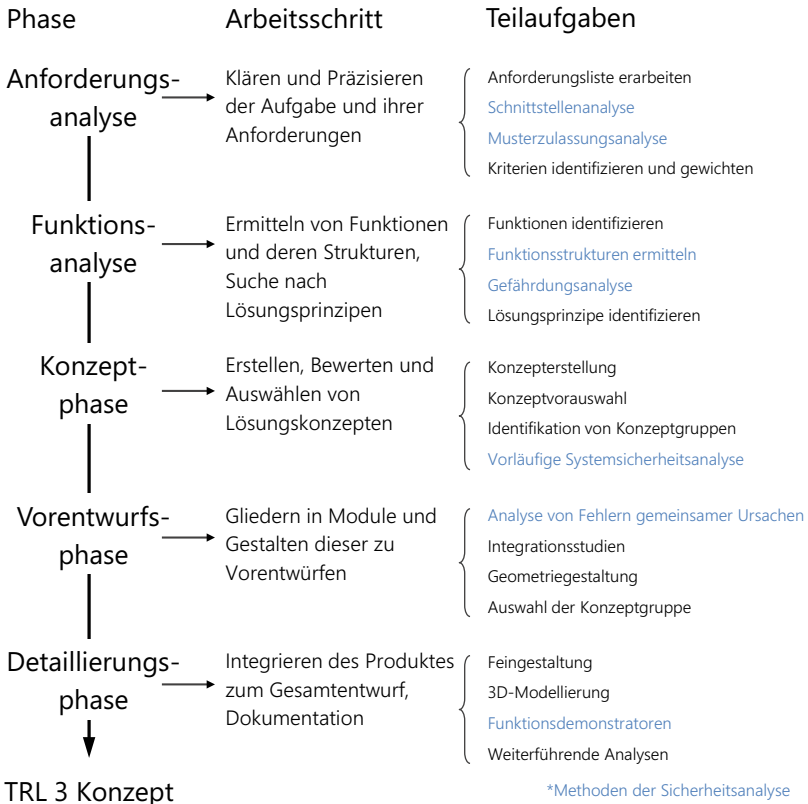


Abbildung 3.2 Verwendeter Konstruktionsansatz

Der erforderliche Aufwand zum Erstellen der Anforderungsliste ist vergleichbar mit dem der Durchführung der Konzept- und Gestaltungsphase [260, S. 320]. Eine Herausforderung besteht darin, dass die Anforderungsliste zu Beginn des Entwicklungsprozesses nicht vollständig sein kann, da viele Erkenntnisse erst während der Entwicklung gewonnen werden und somit zu Ergänzungen oder Änderungen führen.

Grundlegend enthält eine Anforderungsliste, vgl. Tabelle 3.2, die Teilbereiche

- Organisation,
- Identifikation,

Tabelle 3.2 Beispiel einer Anforderungsliste

Anforderungsliste Beispielprodukt			Erstellt durch: Erstellende Person (Initialen) Letzte Änderung: TT.MM.JJJJ		Version: XX
ID	Anforderung	Beschreibung	Art	Datum	Quelle
1	Anforderung 1	Beispielhafter Grenzwert 1	Forderung (F)	TT.MM.JJJJ	[YY]
2	Anforderung 2	Beispielhafter Grenzwert 2	Wunsch (W)	TT.MM.JJJJ	[ZZ]

- Inhalt und
- Rückverfolgung [260, S. 322].

Organisatorische Angaben beziehen sich auf die Bezeichnung des zu entwickelnden Produkts, den Entwickler sowie das Datum der Erstellung [260, S. 322]. Teil der Identifikation sind vor allem Identifikationsnummern (IDs) für die einzelnen Anforderungen [260, S. 322]. Mögliche Inhalte sind die Beschreibung und die Art der Anforderung [260, S. 322]. Als Anforderungsarten können beispielsweise Forderungen und Wünsche unterschieden werden [260, S. 334]. Die Rückverfolgung enthält Informationen über Änderungsdaten, Verantwortlichkeit und Quelle der Anforderung [260, S. 324].

Das Erstellen der Anforderungsliste ist unterteilbar in folgende Teilschritte:

- Ermitteln der Anforderungsquellen,
- Ermitteln der Rahmenbedingungen,
- Ermitteln der Kundenanforderungen,
- methodische Ermittlung und Ergänzung der Anforderungen,
- Abstimmung mit Kunden und
- Festlegen der Anforderungsliste [260, S. 326].

Quellen für Anforderungen können Personen, Produkte und Dokumente sein [260, S. 327–328]. Auch die Fachliteratur [253, S. 52–69], [260, S. 331], [263, S. 57], [267, S. 136–144], [271, S. 231], [273, S. 129], [285], [286] stellt zahlreiche Auflistungen von Anforderungen für die methodische Ermittlung und Ergänzung der Anforderungsliste bereit.

Die Anforderungsliste ist mit der ersten Erstellung nicht abgeschlossen und wird über den weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses aktualisiert und erweitert. Weitere Anforderungen gehen beispielsweise aus der Musterzulassungsanalyse sowie späteren Sicherheitsanalysen hervor.

Schnittstellenanalyse

Im Rahmen einer Schnittstellenanalyse werden die Voraussetzungen für eine Zonen-sicherheitsanalyse geschaffen. Dies erfolgt, indem die physischen und funktionellen Schnittstellen innerhalb der Zone des Einlasses sowie zu seinen benachbarten Bereichen untersucht werden.

Auf die Schnittstellenanalyse aufbauend, können potenzielle Synergien zwischen Teilsystemen des zu erarbeitenden Konzepts erkannt werden. Darüber hinaus können mögliche Wechselwirkungen zwischen vorhandenen und geplanten Subsystemen identifiziert werden. Diese Wechselwirkungen sind bei der anschließenden Musterzulassungsanalyse und der weiteren Erarbeitung des Konzeptes zu berücksichtigen.

Musterzulassungsanalyse

Die Erstellung des Zulassungsprogramms (Certification Programm) stellt den ersten Schritt zum Erreichen einer Musterzulassung für die Luftfahrt dar [281, S. 68]. Das Zulassungsprogramm beinhaltet

- die Identifikation und Interpretation anzuwendender Bauvorschriften,
- die Ableitung der Nachweiserbringung zur Erfüllung dieser,
- die Zusammenfassung zu einem ganzheitlichen Entwurf und
- die Abstimmung des Entwurfs mit der zuständigen Luftfahrtbehörde [281, S. 69].

Die Durchführung der beiden erstgenannten Schritte erfolgt im Rahmen der Musterzulassungsanalyse während der Anforderungsanalyse und gewährleistet eine möglichst vollständige Anforderungsliste.

Die Gültigkeit von Bauvorschriften für eine spezifische Komponente kann Interpretationsspielraum bieten und ist final mit der zuständigen Luftfahrtbehörde abzusprechen [281, S. 69]. Die Bauvorschriften der EASA für große Flugzeuge CS-25 [34] und Flugtriebwerke CS-E (Engines) [287] beinhalten zudem Vorschläge anwendbarer Nachweismethoden zur Sicherstellung der Einhaltung der Vorschriften. Die Nachweismethoden (Means of Compliance, MoC) werden in zehn Kategorien eingeteilt [281, S. 70–72], vgl. Tabelle 3.3

Alle relevanten Paragraphen der CS und deren zugehörige, mögliche Nachweismittel werden zur Nachweisprüfliste (Compliance Check List, CCL) zusammengefasst, vgl. Tabelle 3.4. Diese bildet einen wichtigen Bestandteil des abschließenden Nachweisdokuments (Compliance Document) [281, S. 73–74].

Tabelle 3.3 Übersicht möglicher Nachweismittel

ID	Bezeichnung	Beschreibung
MoC 0	Compliance Statement	Erläuterung bzw. Begründung der Erfüllung einer Vorschrift
MoC 1	Design Review	Überprüfung anhand von Zeichnungen, Schaltplänen, Stücklisten
MoC 2	Calculation/Analysis	Nachweis durch Berechnungen, Analysen, Herleitungen
MoC 3	Safety Assessment	Strukturierte Risikobewertung durch Sicherheitsanalysen
MoC 4	Laboratory Tests	Werkstoff- oder Bauteiltests im Labor
MoC 5	Test on aircraft (On Ground)	Test der Funktion am Flugzeug auf dem Boden
MoC 6	Flight Test	Test der Funktion am Flugzeug während des Fluges
MoC 7	Inspection	Zustandsprüfung ohne Aktivierung der Komponente
MoC 8	Simulation	Tests auf Basis eines digitalen Modells
MoC 9	Equipment Qualification	Gerätequalifikation

Kriterien identifizieren und gewichten

Nach der Erstellung der Anforderungsliste werden Kriterien aus dieser abgeleitet und gewichtet. Dies ist erforderlich, um eine möglichst objektive und effiziente Bewertung und Auswahl der späteren Konzepte durchführen zu können. Die Auswahl erfolgt auf zwei verschiedene Arten. In der Konzeptphase wird anhand von Ausschlusskriterien eine Vorauswahl der Konzepte getroffen. In der Vorentwurfsphase wird die gewichtete Punktbewertung für die abschließende Entscheidung für eine Lösungsalternative eingesetzt.

Eine quantitative Bewertung, wie die gewichtete Punktbewertung, erfordert eine Differenzierung der einzelnen Kriterien, obwohl diese Kriterien oft miteinander verbunden sind und sich gegenseitig beeinflussen [255, S. 189], [288]. Beispielsweise kann eine Gewichtsreduktion durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien erreicht werden, die in der Regel mit erhöhten Materialkosten verbunden sind. Auch können unzureichende aerodynamische Eigenschaften in der Luftfahrt zu Strömungsablösungen und somit zu Sicherheitsproblemen führen. Darüber hinaus sind die Stückkosten von Komponenten mit langer Lebensdauer und hoher Effizienz häufig vergleichsweise hoch.

Tabelle 3.4 Beispiel einer Nachweisprüfliste

Nachweisprüfliste Beispielprodukt Teil 1: Nachweismethoden															
CS	Titel	Nachweismethode (MoC)									Dokument	Version	Status		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8				9	
25.XXX	Beispielparagraf 1	X				X							Nachweis 1	A	Offen
25.XXX	Beispielparagraf 2	X	X						X				Nachweis 2	A	Offen

Die Differenzierung der Kriterien kann durch ein strukturiertes Anforderungsdokument unterstützt werden. Weiterhin kann das Anforderungsdokument bei der Ableitung der wichtigsten Bewertungskriterien unterstützend wirken.

Die Gewichtung der Kriterien erfolgt durch einen paarweisen Vergleich [255, S. 289]. Bei dieser Methode werden alle Kriterien in Paaren anhand ihrer jeweiligen Bedeutung für die zu findende Lösung miteinander verglichen [260, S. 388]. Wenn ein Kriterium wichtiger erscheint als das mit ihm verglichene, wird es mit dem Wert 2 bewertet. Wenn beide Kriterien gleich wichtig sind, werden sie mit dem Wert 1 bewertet. Ist ein Kriterium weniger wichtig als das verglichene, wird ihm der Wert 0 zugeordnet [260, S. 388].

Zudem existieren Varianten dieser Bewertungsmethode mit einem größeren Wertebereich, beispielsweise um unterscheiden zu können, ob die Erfüllung eines Kriteriums viel wichtiger, wichtiger oder nur minimal wichtiger ist als die eines anderen Kriteriums [255, S. 184]. Dies kann in den letzten Phasen des Entwicklungsprozesses, in denen ein hoher Detaillierungsgrad der Lösung vorhanden ist, sinnvoll sein, um eine sehr detaillierte Beurteilung zu ermöglichen [289, S. 115]. In den hier vorliegenden frühen Phasen des Entwicklungsprozesses kann die Umsetzung dieser Variante aufgrund des geringeren Konkretisierungsgrades nicht völlig objektiv erfolgen [289, S. 115].

Nachdem alle Kriterien miteinander verglichen worden sind, hat jedes Kriterium i einen Wert p_i , der die Summe der Werte in der jeweiligen Zeile in Tabelle 3.5 darstellt. Dividiert man diese Zeilensumme p_i durch die Summe aller in dieser Tabelle zugeordneten Zellwerte P , so erhält man den relativen Gewichtungsfaktor w_i eines Kriteriums [289, S. 112–113]:

$$w_i = p_i / P. \quad (3.1)$$

Tabelle 3.5 Gewichtung der Kriterien durch paarweisen Vergleich

Kriterium	K1	K2	K3	Relatives Gewicht w_i
Kriterium 1 (K1)	–	2	1	0,500
Kriterium 2 (K2)	0	–	2	0,333
Kriterium 3 (K3)	1	0	–	0,167

Zellwerte: Reihenkriterium ist im Vergleich zum Spaltenkriterium wichtiger (2), gleich wichtig (1), unwichtiger (0)

3.2.2 Funktionsanalyse

Auf den Erkenntnissen der Anforderungsanalyse basierend, erfolgt die Funktionsanalyse. In dieser werden die erforderlichen Funktionen des Produkts strukturiert ermittelt, Folgen von Funktionsausfällen analysiert und mögliche Lösungsprinzipie zum Erfüllen einer Funktion identifiziert [260, S. 341]. Auf Basis der Funktionsstrukturen und Lösungsprinzipie der Funktionsanalyse können in der Konzeptphase prinzipielle Produktarchitekturen in Form von Konzepten identifiziert werden [260, S. 341].

Funktionen identifizieren

Um eine Anforderung zu erfüllen, muss ein Produkt eine Funktion erfüllen. Eine Funktion ist definiert als eine Operation am Objekt [290, S. 805]. Diese erfolgt durch eine Umwandlung von Eingangsgrößen in die gewünschten Ausgangsgrößen [258, S. 412]. Betreffende Größen können Material, Energie oder Daten sein. Darüber hinaus können Störungen und Verluste die Funktion beeinflussen, vgl. Abbildung 3.3. Funktionen werden üblicherweise durch ein Substantiv gefolgt von einem Verb in der Infinitivform beschrieben [291, S. 2].

Funktionsstrukturen erstellen

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses ist es üblich, eine Funktionsstrukturanalyse durchzuführen. Auf diese Weise werden die notwendigen Haupt- und Teilfunktionen identifiziert und in elementare Funktionen, wie beispielsweise „Form konvertieren“ oder „Druck erhöhen“, zerlegt [292, S. 19].

Je detaillierter die Funktionsstruktur analysiert wird, desto besser können den Funktionen im späteren Verlauf geeignete Lösungsprinzipie zugeordnet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass dabei eine zu frühzeitige Vorfixierung auf eine Lösung erfolgen und die Lösungsvielfalt zu stark eingeschränkt werden kann [50, S. 17]. Daher kann es sinnvoll sein, mit einer einfachen Funktionsstruktur zu beginnen und den Detaillierungsgrad innerhalb des Entwicklungsprozesses iterativ zu erhöhen [257, S. 54]. Die gebräuchlichsten Mittel zur Erstellung funktionaler Strukturen sind

- das FAST-Diagramm (Function Analysis System Technique),
- das Funktionennetz und
- der Funktionenbaum [260, S. 346], [291, S. 3–4].

Die drei genannten Methoden sind einander recht ähnlich und werden beispielsweise in der VDI-Richtlinie 2803 [291] detailliert beschrieben.

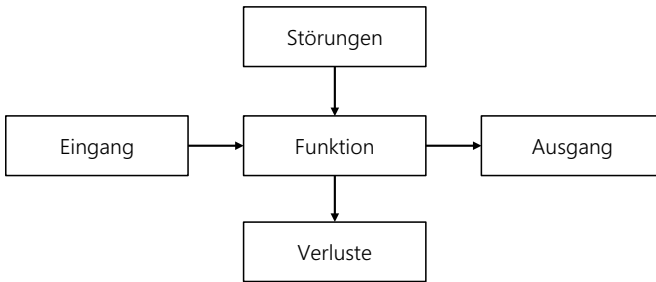


Abbildung 3.3 Begriff der Funktion

Funktionsbäume eignen sich aufgrund ihrer Struktur sehr gut als Basis für die Gefährdungsanalyse (FHA) und werden deshalb nachfolgend verwendet [272, 27 ff.], vgl. Abbildung 3.4. Im Funktionsbaum wird die Hauptaufgabe des Produkts durch seine Gesamtfunktion beschrieben [260, S. 346]. Diese Gesamtfunktion kann in Teilfunktionen verschiedener Detaillierungsebenen unterteilt werden [260, S. 345]. Die Anzahl der Detaillierungsebenen ist in Abhängigkeit der Aufgabe zu wählen [260, S. 345].

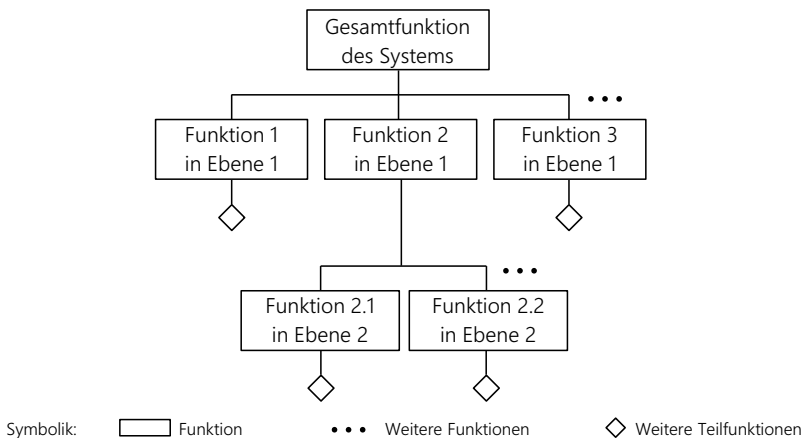


Abbildung 3.4 Aufbau eines Funktionsbaums

Gefährdungsanalyse

Die Gefährdungsanalyse und -bewertung (FHA) ist eine qualitative Sicherheitsmethode, die zu Beginn des Prozesses der Sicherheitsbewertung durchgeführt werden sollte [32, S. 33]. Der Einsatz qualitativer Methoden zu Beginn des Prozesses wird empfohlen, da sie die systematische Untersuchung von Ausfallbedingungen, -ursachen und -folgen unterstützen [273, S. 5]. In späteren Phasen des Entwicklungsprozesses können diese qualitativen Methoden durch quantitative Methoden ergänzt werden, um die Zuverlässigkeit genauer zu untersuchen [32, S. 22].

Das Hauptziel der FHA besteht in der systematischen Bewertung möglicher Funktionsausfälle eines Systems. Dadurch können Fehlerbedingungen sowie deren Auswirkungen identifiziert und klassifiziert werden. Dies ermöglicht das Ableiten von Zuverlässigkeitsanforderungen gemäß CS-25.1309 [53, S. 38], vgl. Tabelle 3.1. Die FHA wird auf Flugzeug-, System- und ggf. Subsystemebene durchgeführt [57, S. 34–35]. Ähnlich wie bei den Funktionenbäumen besteht der Hauptnachteil dieser Methode in der erforderlichen Erfahrung für deren Anwendung [53, S. 56]. So können bei unzureichender Erfahrung überaus umfangreiche, aber weitestgehend bedeutungslose Ergebnistabellen entstehen [53, S. 56]. Weiterhin kann die Klassifizierung von Gefährdungen eher subjektiv ausfallen [53]. Dem gegenüber stehen zahlreiche Vorteile, die von Kritzinger [53, S. 56] beschrieben werden, allen voran die optimale Bereitstellung von Ereignissen höchster Ebene (Top Level Events) für die vorläufige Systemsicherheitsbeurteilung (PSSA). Die PSSA erfolgt im Sicherheitsprozess der Luftfahrt im direkten Anschluss an die FHA.

Die Durchführung der FHA erfordert die folgenden Teilschritte:

- Identifizieren der Funktionen des zu untersuchenden Systems,
- Identifizieren der funktionalen Fehlermöglichkeiten (Fehlermoden),
- Kategorisieren der Schwere möglicher Fehler entsprechend der vorherrschenden Flugphasen und Betriebsbedingungen,
- Festlegen der erlaubten Eintrittswahrscheinlichkeit und
- Nachweisen dieser Wahrscheinlichkeit [53, S. 38–46], [57, S. 32–33].

Die Funktionen werden den Funktionenbäumen entnommen. Funktionale Fehlermöglichkeiten können ein vollständiger oder teilweiser Funktionsverlust, das unaufgeforderte Auftreten der Funktion oder eine unerwünschte Funktion sein [53, S. 38–46]. Bertsche [273, S. 131] listet zahlreiche weitere Fehlermöglichkeiten auf. Die Schwere möglicher Fehlerfolgen wird nach CS-25.1309 bewertet [53, S. 38], vgl. Tabelle 3.1. Aus dieser Tabelle können auch die zulässigen Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden. Das Nachweisen dieser Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgt in Abhängigkeit der Schwere des Fehlers gemäß des Absicherungsgrads

(Development Assurance Level, DAL) [53, S. 42–44]. Wird ein Fehler als katastrophal klassifiziert, so entspricht dies dem Absicherungsgrad DAL A [53, S. 44]. Dieser erfordert die Integration zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen, wie versagens-sicheren (Fail-Safe) Eigenschaften, beispielsweise in Form von Redundanz [79, S. 212].

Lösungsprinzipie identifizieren

Um aus den Funktionsstrukturen methodisch Konzepte herleiten zu können, werden Lösungs- bzw. Wirkprinzipie genutzt. Diese ordnen den jeweiligen Funktionen einen Effekt zu [257, S. 107]. Entsprechende Effekte für die Umsetzung einer jeweiligen Funktion können einer Vielzahl von Konstruktionskatalogen [258, S. 447–462], [293, S. 22–43] und der Fachliteratur entnommen werden. Auch können vergleichbare existierende Produkte und Patente ausgewertet werden [260, S. 350–351]. Weiterhin können Prinzipie der Biologie für die Lösung technischer Problemstellungen adaptiert werden [260, S. 351]. Dieses Vorgehen ist unter dem Begriff der Bionik geläufig.

3.2.3 Konzeptphase

An die Funktionsanalyse schließt die Konzeptphase an. Im Rahmen der Konzeptphase werden, basierend auf der analysierten Aufgabenstellung und den erforderlichen Funktionen, Konzepte erdacht. Die Konzepte werden nach einer Vorauswahl zu Konzeptgruppen ähnlicher Eigenschaften zusammengefasst. Im Anschluss daran erfolgt die vorläufige Systemsicherheitsanalyse (PSSA) der identifizierten Konzeptgruppen. Mit Hilfe der PSSA können Schwachstellen identifiziert und durch Anpassungen vermieden werden.

Konzepterstellung

Die Erstellung erster Lösungskonzepte erfolgt zunächst auf intuitivem und anschließend auf methodischem Weg. Die intuitive Erstellung von Konzepten kann durch Methoden des Brainstormings unterstützt werden. Diese erlauben das möglichst ergebnisoffene Generieren einer Vielzahl von Lösungsideen und somit eine breite Abdeckung des Lösungsraums [294, S. 11]. Zudem wird dabei eine Vorfixierung auf eine Lösung durch zu starke Einschränkungen vermieden. Diese können beispielsweise aus sehr detaillierten Anforderungslisten und Funktionsstrukturen resultieren [260, S. 342].

Verbreitete Methoden des Brainstormings sind beispielsweise die Methode 635, die Galeriemethode, die Delphi-Methode oder die Synektik [260, S. 357–359]. In

der Praxis findet zumeist eine kombinierte Anwendung dieser Methoden statt [260, S. 360]. So wird einer kleinen Gruppe von Beteiligten die zuvor definierte Aufgabenstellung dargelegt. Nachfolgend skizzieren die Beteiligten ihre jeweiligen Ideen und tauschen diese im Anschluss miteinander aus. Im Rahmen dieses Austauschs werden die vorhandenen Ideen weiterentwickelt und abschließend dokumentiert.

Um den Lösungsraum möglichst vollständig abzudecken, werden anschließend weitere Konzepte systematisch mit der Methode des morphologischen Kastens nach Zwicky identifiziert [294, S. 19–20]. Diese Methode der Konzeptentwicklung nutzt die erarbeitete Funktionsstruktur und ordnet den jeweiligen Funktionen verschiedene Teillösungsmöglichkeiten zu, vgl. Tabelle 3.6. Durch die beliebige Kombination von Teillösungen für jede Funktion können ganzheitliche Konzeptideen erstellt werden. Dennoch sollten bei der Kombination bereits mögliche Synergien zwischen Teillösungen in Betracht gezogen werden. Andererseits sollten Kombinationen von Teillösungen, die potenziell Wechselwirkungen miteinander hervorrufen können, in dieser Phase noch nicht ausgeschlossen werden. Eine Untersuchung bezüglich der Auswirkungen etwaiger Wechselwirkungen erfolgt in der nachfolgenden Vorentwurfsphase, beispielsweise im Rahmen der Zonensicherheitsanalyse.

Tabelle 3.6 Morphologischer Kasten

Funktion	Lösungsansatz 1	Lösungsansatz 2	Lösungsansatz 3
Funktion 1	Teillösungsalternative 1.1	Teillösungsalternative 1.2	Teillösungsalternative 1.3
Funktion 2	Teillösungsalternative 2.1	Teillösungsalternative 2.2	Teillösungsalternative 2.3
Funktion 3	Teillösungsalternative 3.1	Teillösungsalternative 3.2	Teillösungsalternative 3.3

Konzeptvorauswahl

Anhand der Ausschlusskriterien aus der Anforderungsanalyse erfolgt eine grundlegende Bewertung der erstellten Konzepte [255, S. 180]. Dabei wird unterschieden, ob Konzepte die Anforderungen der Ausschlusskriterien

- bereits erfüllen,
- perspektivisch ohne größere Einschränkungen erfüllen können oder
- nur mit größeren Einschränkungen bzw. gar nicht erfüllen können.

Diese Bewertung wird für eine Vorauswahl geeigneter Lösungsprinzipie genutzt. Darüber hinaus empfiehlt Ullman [278, S. 87] bereits zu diesem Zeitpunkt eine Patentierung voraussichtlich geeigneter Ideen.

Zusammenfassung zu Konzeptgruppen

Die nach der Vorauswahl als grundlegend geeignet angesehenen Konzepte werden zu einer kleineren Anzahl an Konzeptgruppen mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst. Dieses Vorgehen ermöglicht in der Folge detailliertere Teiluntersuchungen der kleinen Anzahl der Konzeptgruppen im Vergleich zu einer großen Anzahl an Konzepten. Durch den höheren Detailgrad der Teiluntersuchungen wird die erreichbare Objektivität bei der abschließenden Bewertung der einzelnen Konzeptgruppen erhöht.

Vorläufige Systemsicherheitsanalyse

Die vorläufige Systemsicherheitsanalyse (PSSA) nach ARP 4761 [57] ist eine der besagten Teiluntersuchungen. Die PSSA folgt im Prozess der Sicherheitsbewertung nach ARP 4754A [32] direkt auf die FHA. Den in der FHA identifizierten funktionalen Gefährdungen werden mit Hilfe der PSSA Fehler und Ereignisse eines oder mehrerer Systeme, Subsysteme oder Komponenten zugeordnet [57, S. 40]. Auf diese Weise können sicherheitsrelevante Anforderungen an die Konstruktion ermittelt und Konzeptentwürfe bewertet werden.

Die PSSA erfolgt durch die iterative Anwendung von Top-Down-Methoden [57, S. 22]. Bei Top-Down-Methoden wird die Lösung vom allgemeinen, übergeordneten System schrittweise hin zu den detaillierten, untergeordneten Teilsystemen erarbeitet [273, S. 167]. Mögliche Methoden der PSSA sind

- die Fehlerbaumanalyse (FTA),
- das Abhängigkeitsdiagramm (DD) und
- die Markov-Analyse (MA) [57, S. 15–17].

Von den genannten Methoden ist die FTA am weitesten verbreitet und wird im weiteren Verlauf eingesetzt. Bei der FTA werden Beziehungen zwischen Fehlerereignissen durch logische Operationen darstellt. Das DD nutzt zur Darstellung dieser Beziehungen Pfade und die MA zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsfunktionen [57, S. 108]. Die Vorteile von FTA, DD und MA werden von Kritzinger [53] und in ARP 4761 [57] diskutiert. Der gemeinsame Nachteil dieser Methoden besteht in der fehlenden Systematik zur Gewährleistung der Vollständigkeit ihrer Ergebnisse [272, S. 27–29].

Deshalb ist in späteren Entwicklungsphasen die Ergänzung des Top-Down-Ansatzes der PSSA durch die CCA und durch Bottom-Up-Methoden empfehlenswert. Bei Bottom-Up-Methoden wird die Lösung von detaillierten, untergeordneten Teilsystemen schrittweise hin zum allgemeinen, übergeordneten System erarbeitet [273, S. 167]. Eine iterative, einfach durchzuführende, aber auch zeitaufwendige Bottom-Up-Methode wird durch die FMEA repräsentiert [53, S. 131]. Der Einsatz von Bottom-Up-Methoden ist im späteren Verlauf der Konzepterarbeitung am effizientesten, da zu diesem Zeitpunkt der erforderliche hohe Grad der Detaillierung erreicht ist [79, S. 214]

Fehlerbaumanalyse

Die FTA kann sowohl qualitativ als auch quantitativ durchgeführt werden [273, S. 7]. In dieser frühen Phase der Konzepterarbeitung eignet sich besonders die qualitative Durchführung zur systematischen Suche nach Ursachen möglicher Fehler und Ereignisse sowie zur Identifikation von Schwachstellen [273, S. 167].

Die Durchführung der FTA erfordert die folgenden Teilschritte:

- Festlegen eines zu untersuchenden unerwünschten Ereignisses,
- Ermittlung aller Ausfälle, die zu diesem Ereignis führen können, und
- logische Verknüpfung der Ausfälle mit dem Ereignis [273, S. 167].

Die zu untersuchenden unerwünschten Ereignisse können aus den Ergebnissen der FHA übernommen werden. Grundlegende logische Verknüpfungen stellen die UND-Verknüpfung, die ODER-Verknüpfung und die Negation dar, vgl. Abbildung 3.5. Die beiden letztgenannten Teilschritte werden gemäß des Top-Down-Prinzips von der System- über die Teilsystem- bis hin zur Bauteilebene wiederholt [273, S. 167]. Als Ergebnis der Analyse der Bauteilebene verbleiben lediglich Elementarausfälle, wie Komponentenausfall durch eigene Schwäche, durch externe Einflüsse oder durch fehlerhafte Ansteuerung [273, S. 167], [295, S. 2].

3.2.4 Vorentwurfsphase

Im Rahmen der Vorentwurfsphase unterliegen die Konzeptgruppen einer weiteren Sicherheitsanalyse in Form der Analyse von Fehlern gemeinsamer Ursachen (CCA) nach ARP 4761. Darüber hinaus erfolgen Integrationsstudien ausgewählter Teilsysteme. Diese sind erforderlich, um die zuvor identifizierten möglichen Sicherheitsrisiken zu mindern. Weiterhin erfolgt die Identifikation des möglichen Funktionsumfangs der jeweiligen Konzeptgruppen. Im Fall von variablen

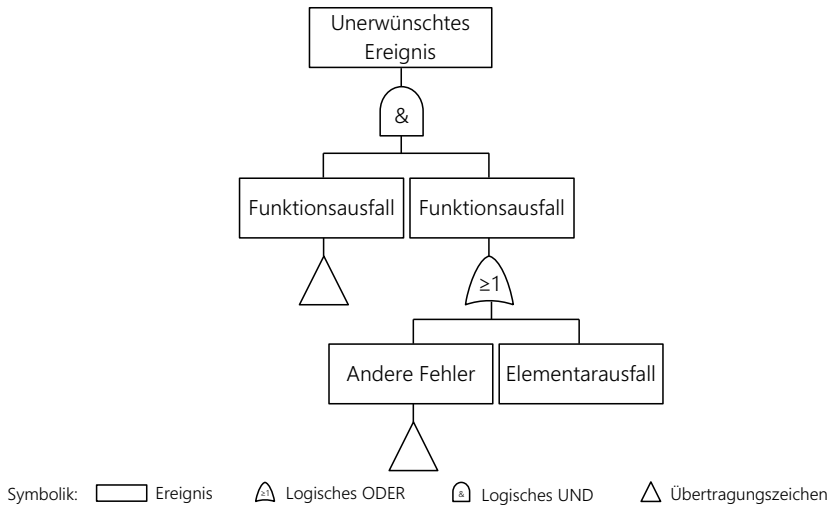


Abbildung 3.5 Aufbau eines Fehlerbaums

Einlässen betrifft dies vorrangig die umsetzbaren Geometrien und somit das aerodynamische Verbesserungspotenzial. Daran anschließend wird basierend auf den Bewertungskriterien aus der Anforderungsanalyse mit Hilfe einer gewichteten Punktbewertung nach VDI-Richtlinie 2225 [296] die am besten geeignete Konzeptgruppe ausgewählt.

Analyse von Fehlern gemeinsamer Ursachen

Der gesamte Erarbeitungsprozess sollte durch die iterativ durchgeführte Analyse von Fehlern gemeinsamer Ursachen (CCA) begleitet werden [57, S. 15–17]. Die CCA soll die Unabhängigkeit von Funktionen und Fehlerereignissen nachweisen oder aufzeigen, dass die vorhandene Abhängigkeit akzeptabel ist [57, S. 26]. Um dies zu erreichen, besteht die CCA aus

- der Analyse besonderer Risiken (PRA),
- der Zonensicherheitsanalyse (ZSA) sowie
- der Analyse redundanzüberbrückender Fehler (CMA) [57, S. 27].

Eine PRA dient der Identifizierung externer Ereignisse und Einflüsse [57, S. 27]. Die ZSA wird zur Ermittlung von Gefährdungen durch Ausfälle benachbarter Systeme sowie durch Installations- und Wartungsfehler eingesetzt [57, S. 27]. Die CMA wird verwendet, um die Unabhängigkeit von Funktionen und möglichen Fehlerereignissen zu überprüfen [57, S. 28].

Analyse besonderer Risiken

In ARP 4761 [57] charakterisiert die SAE besondere Risiken als Ereignisse, die außerhalb der unmittelbaren Systemgrenzen auftreten, jedoch einen Einfluss auf das System haben können. Dieser einzelne Einfluss darf nach CS-25 [34, AMC 25.1309] keine gefährlichen (Hazardous) Zustände zur Folge haben. Besondere Risiken können mehrere Zonen und somit Systeme gleichzeitig betreffen. Typische Beispiele besonderer Risiken sind

- Feuer,
- unkontrolliertes Versagen von Rotoren mit hoher Energie,
- Risse in Hochdruckluftkanälen,
- Leckagen von
 - o Luft hoher Temperatur,
 - o Kraftstoff,
 - o Hydrauliköl,
 - o Wasser,
- aerodynamische Reibung,
- Reibung zwischen beweglichen Teilen,
- Hagel, Eis, Schnee, Wasseraufnahme,
- Vereisung von Betriebsmitteln,
- hohe Umgebungstemperaturen,
- Vogelschlag,
- Blitzschlag,
- elektromagnetische Interferenzen,
- elektromagnetische Felder hoher Intensität und
- Schottwandbrüche [34, AMC 25.1309], [53, S. 158–162], [57, S. 156].

Einige dieser Ereignisse, z. B. Leckagen, sind auch Bestandteil der ZSA.

Das Ziel der PRA ist die Identifikation aller besonderen Risiken, die die untersuchte Konstruktion betreffen können. Nach der Identifikation der Risiken erfolgt für jedes Risiko eine separate, primär qualitative Analyse, um den

Effekt auf die Konstruktion zu bestimmen [53, S. 155–156]. Auf diese Weise kann jeder sicherheitsrelevante Effekt konstruktiv vermieden oder aufgrund seiner Eintrittswahrscheinlichkeit als akzeptabel nachgewiesen werden [53, S. 155–156].

Die PRA sollte bei neuen Luftfahrzeugen und bei größeren Änderungen am Luftfahrzeug den gesamten Entwicklungsprozess begleiten [57, S. 13]. Insbesondere in den Anfangsphasen kann die PRA durch das frühzeitige Erkennen von Schwachstellen die erforderlichen Entwicklungskosten verringern. Mit dem Fortschreiten des Entwicklungsprozesses und somit des Detailgrads der Konstruktion können verbleibende Schwachstellen leichter identifiziert werden [53, S. 173]. Eine Minderung der Schwachstellen ist zum fortgeschrittenen Zeitpunkt jedoch mit kostenintensiveren Konstruktionsanpassungen, komplexen Simulationen oder Tests verbunden [53, S. 173].

Die erforderlichen Schritte zur Durchführung einer PRA lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Identifizieren möglicher Ereignisse, betroffener Zonen, Komponenten und Folgen,
- Identifizieren der Fehlermöglichkeiten und ihrer Schwere für jedes identifizierte Ereignis,
- Zuordnen erforderlicher maximaler Eintrittswahrscheinlichkeiten zu den Fehlermöglichkeiten,
- Empfehlen von Maßnahmen zum Erreichen dieser Wahrscheinlichkeiten, z. B. durch Konstruktionsanpassungen und Analysen, sowie
- Validieren der Wahrscheinlichkeiten durch Konstruktionsanpassungen und Tests [53, S. 156–166], [57, S. 157].

Die Durchführung der PRA erfordert viel Erfahrung, um alle potenziellen Ereignisse und deren Auswirkungen zu identifizieren [53, S. 173]. Zudem ist sie mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand für die Durchführung aller erforderlichen Analysen und Tests verbunden [53, S. 173]. Andererseits ermöglicht diese Methode die gleichzeitige Untersuchung mehrerer Zonen und die Identifizierung von Schwachstellen gegenüber äußeren Einflüssen wird erleichtert [53, S. 173].

Zonensicherheitsanalyse

Das Ziel der ZSA ist es, Richtlinien für die Konstruktion und Installation zu erstellen, Interaktionen zwischen benachbarten Systemen zu identifizieren sowie Wartungs- und Installationsfehler aufzudecken [34, AMC 25.1309]. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass Systemausfälle unabhängig von anderen Systemen sind oder deren Eintrittswahrscheinlichkeit als akzeptabel eingestuft werden kann. Die

ZSA ist eine vorrangig qualitative Methode, die für jede Zone des Flugzeugs durchgeführt werden sollte. Sie sollte alle Phasen des Entwicklungsprozesses begleiten [57, S. 13]. Zu Beginn des Entwicklungsprozesses wird die ZSA zur Erstellung von Konstruktions- und Installationsrichtlinien und zur Untersuchung von Skizzen sowie Modellen verwendet [53, S. 177]. In späteren Konstruktionsphasen werden mit Hilfe der ZSA detailliertere Konstruktionsinformationen überprüft, beispielsweise technische Zeichnungen und Komponenten von Prototypen [53, S. 177].

Der zusammengefasste Prozess der ZSA umfasst

- das Erstellen von Konstruktions- und Installationsrichtlinien,
- die Identifikation von Zonen, der darin enthaltenen Systeme und Komponenten sowie zonenexterner Fehlermöglichkeiten,
- das Untersuchen der Zonen bezüglich der festgelegten Richtlinien,
- das Überprüfen der Zonen auf resultierende Auswirkungen von Fehlern in benachbarten Zonen und umgekehrt sowie
- das Überprüfen und Dokumentieren der Ergebnisse, beispielsweise von Konstruktionsanpassungen [53, S. 177–184], [57, S. 153].

Die Erstellung der Konstruktions- und Installationsrichtlinien sollte die Anforderungen auf Flugzeugebene, die Ergebnisse vorangegangener Sicherheitsanalysen sowie verfügbare Wartungs- und Betriebsdaten vergleichbarer Systeme berücksichtigen. Die Richtlinien können in allgemein, system- oder zonenspezifisch unterteilt werden. Allgemeine Richtlinien umfassen

- Ausrüstungsinstallation, z. B. Rohre, Kanäle, Schläuche, Kabel,
- Entfernung und Austausch von Komponenten,
- Wartung und Instandhaltung sowie
- Entwässerungsrichtlinien [57, S. 285–286].

Die Definition der Zonen des Flugzeugs erfolgt beispielsweise basierend auf Tabellen, die durch den Dachverband amerikanischer Fluggesellschaften (Air Transport Association of America, ATA) bereitgestellt werden [57, S. 295–301]. Für jede Zone des Luftfahrzeugs wird eine Liste von Systemen und Gegenständen erstellt. Der Umfang dieser Liste hängt von der Phase des Entwicklungsprozesses ab. Abweichungen bei der Untersuchung der Konstruktion von den Konstruktions- und Installationsrichtlinien müssen für Konstruktionsanpassungen in Betracht gezogen werden. Fehler mit zonenexternen Auswirkungen sollten im Rahmen weiterer Sicherheitsanalysen untersucht und die Auswirkungen durch Konstruktionsanpassungen gemildert werden [57, S. 285–286].

Nachteile der ZSA bestehen darin, dass sie am effizientesten in späteren Entwicklungsphasen durchgeführt wird, in denen alle Gegenstände und Systeme untersucht werden können [53, S. 190]. Außerdem erfordert die erfolgreiche Durchführung dieser Methode viel Erfahrung mit dem zu untersuchenden System [53, S. 190]. Dennoch ist die ZSA während der Systemintegration sehr hilfreich, um komplexe sicherheitsrelevante Interaktionen zwischen benachbarten Systemen und Zonen zu erkennen. Dazu zählen beispielsweise heiße Rohre in der Nähe elektronischer Geräte, Heißluftleckagen und elektromagnetische Störeinflüsse [53, S. 190].

Analyse redundanzüberbrückender Fehler

Die CMA ist eine qualitative Sicherheitsmethode, die den Nachweis der Unabhängigkeit von Funktionen sowie den damit verbundenen Ereignissen und Fehlermöglichkeiten erlaubt [34, AMC 25.1309]. Die Unabhängigkeit kann durch die Anwendung von Fail-Safe- oder Unabhängigkeitsprinzipien erreicht werden [53, S. 297], [279, S. 95–99]. Dazu zählen Sicherungssysteme, Überwachungssysteme, Redundanz, Isolierung, Begrenzungen von Ausfalleffekten und Versagenspfaden sowie Fehlertoleranzen [53, S. 297], [279, S. 95–99].

Redundanz stellt das vorrangig eingesetzte Unabhängigkeitsprinzip dar. Darunter ist die mechanisch und elektrisch getrennte Duplizierung von Systemen oder Komponenten zu verstehen [279, S. 96]. Es existieren jedoch verschiedene Gefahren für die Unabhängigkeit redundanter Systeme. Im Vergleich zu Fehlermöglichkeiten von Einzelelementen können unbeabsichtigte funktionale Abhängigkeiten zu gleichartigen Fehlern (Common Mode Failures) mit deutlich höheren Ausfallraten und gravierenderen Auswirkungen führen [297, S. 73]. Deshalb müssen insbesondere die Auswirkungen von Entwurfs-, Herstellungs- und Wartungsfehlern sowie Fehler von Systemkomponenten untersucht werden [57, S. 160]. Dies muss erfolgen, da beispielsweise Fehler einer spezifischen Hard- oder Software zu Fehlfunktionen mehrerer gleichartiger Elemente in verschiedenen Systemen führen können [57, S. 160].

Die CMA sollte den gesamten Sicherheitsbewertungsprozess begleiten [57, S. 13]. Dabei kann sie am effizientesten durchgeführt werden, wenn die Ergebnisse der FHA und PSSA zur Identifizierung von Abhängigkeitsproblemen genutzt werden können [57, S. 13].

Für die Durchführung einer CMA sind folgende Teilschritte erforderlich:

- Erstellen von Checklisten für Typen und Ursachen gleichartiger Fehler,
- Identifizieren von Anforderungen zur Vermeidung von Abhängigkeiten,
- Analysieren der Konstruktion bezüglich der Abhängigkeitsanforderungen, um Schwachstellen zu identifizieren,

- Sicherstellung von Eintrittswahrscheinlichkeiten der untersuchten Fehlermöglichkeiten, z. B. durch Konstruktionsanpassungen, sowie
- Nachweis und Dokumentation der Ergebnisse [53, S. 136–145], [57, S. 160–167].

Beispiele für Kategorien gleichartiger Fehler sind

- fehlerhafte Anforderungen,
- konzeptionelle und Gestaltungsfehler,
- Software-Entwicklungsfehler,
- Hardware-Ausfälle,
- Produktions-, Reparatur- und Installationsfehler,
- von der Norm abweichende Betriebsbedingungen,
- Umweltfaktoren, z. B. Temperaturen, Vibrationen, Feuchtigkeit, sowie
- Fehlerketten (Kaskadenfehler) [53, S. 138–142], [57, S. 160].

Die systematische Durchführung einer CMA kann sich als schwierig erweisen, da sie eine umfassende Kenntnis der untersuchten Systeme erfordert und vom Eintreten unwahrscheinlicher Ereignisse ausgegangen werden muss [53, S. 154]. Auch wenn nicht sichergestellt werden kann, dass alle gleichartigen Fehler durch die Anwendung der CMA identifiziert und damit abgemildert werden, stellt sie eine gute Methode zur Erkennung von Fehlerabhängigkeiten dar [53, S. 153]. Dadurch unterstützt sie auch die Auswahl der Systemarchitektur. Weiterhin legt sie konstruktionstechnische Anforderungen für die Trennung und Isolierung von Systemen fest [53, S. 153].

Integrationsstudien

Die Durchführung von Integrationsstudien ist ein wichtiger Bestandteil des Funktionsnachweises im V-Modell [274, S. 27]. Hierbei finden systematische Untersuchungen von Teilsystemen statt. Diese dienen der Ermittlung der am besten geeigneten Teillösungsvarianten für die jeweiligen Konzeptgruppen. Die Teillösungen werden anhand der Kriterien aus der Anforderungsanalyse mit Hilfe einer gewichteten Punktbewertung beurteilt und den Konzeptgruppen zugeordnet. Die Bewertung wird von mehreren Ingenieuren unabhängig voneinander durchgeführt und basiert auf Herstellerangaben [134], den vorangegangenen Sicherheitsanalysen PSSA und CCA [298], [299] und Angaben aus der Fachliteratur [78], [112], [114], [118]. Die gewichtete Punktbewertung wird im Rahmen der Auswahl der besten Konzeptgruppe am Ende dieses Unterkapitels beschrieben.

Geometriegestaltung

Zur Einschätzung des aerodynamischen Verbesserungspotenzials variabler Pitot-Einlässe ist die Identifikation des möglichen Funktionsumfangs der einzelnen Konzeptgruppen erforderlich. Dafür werden zunächst die idealen Geometrien für die jeweiligen Betriebszustände ermittelt. Anschließend wird untersucht, inwieweit diese von den jeweiligen Konzeptgruppen umsetzbar sind. Die Bestimmung der Geometrien erfolgt mit Hilfe numerischer Methoden, deren Ergebnisse durch spätere Windkanaluntersuchungen bestätigt werden sollten [10, S. 983].

Eine alternative Herangehensweise besteht darin, bereits zu Beginn der Konzeptstudie die idealen Einlassgeometrien zu ermitteln und festzulegen. Darauf basierend könnten bei der Erarbeitung des variablen Konzepts ggf. Zeitersparnisse erreicht werden. Jedoch könnte diese frühe Geometriefestlegung auch die Vielfalt der Lösungsansätze einschränken. So könnte ein Konzept, das aus einem solchen Ansatz resultiert, sehr gute aerodynamische Eigenschaften aufweisen. Jedoch könnte es einem Konzept, das aus dem gewählten Ansatz hervorgeht, auf anderen Gebieten, wie beispielsweise der Zuverlässigkeit und Sicherheit, unterlegen sein. Der Hauptgrund hierfür liegt darin, dass beim gewählten Ansatz die Einlassgeometrien in Abhängigkeit der umsetzbaren Faktoren, wie beispielsweise Bauraum oder Komplexität, bestimmt werden. Dies führt dazu, dass das entstehende Konzept einen stärkeren Kompromiss zwischen den aerodynamischen und den restlichen Anforderungen eingeht und somit wahrscheinlich eine größere Chance hat, industriell eingesetzt zu werden. Diese Hypothese könnte im Rahmen einer Parallelstudie untersucht werden.

Auswahl der Konzeptgruppe

Die Auswahl der am besten geeigneten Konzeptgruppe erfolgt mit Hilfe einer technischen Bewertung. Es existieren zahlreiche Methoden für die Bewertung technischer Produkte mit unterschiedlichster Komplexität und für unterschiedliche Entscheidungsaufgaben. Ziel aller Bewertungsmethoden ist es, den Entscheidungsprozess bei der Auswahl aus mehreren möglichen Lösungsvarianten möglichst objektiv und nachvollziehbar zu gestalten [260, S. 381].

Eine möglichst objektive Bewertung kann durch den Einsatz formaler, quantitativer Bewertungsmethoden erreicht werden. Allerdings sollten die numerischen Bewertungsergebnisse nicht die alleinige Grundlage für eine Entscheidung sein. Vielmehr sollten die Methoden zu einer intensiven Auseinandersetzung mit der Evaluation anregen, um ein ganzheitliches Urteil fällen zu können [263, S. 76]. Die Bewertung sollte stets von einer Gruppe von Personen aus verschiedenen technischen Bereichen durchgeführt werden, um ein breites Spektrum an Fachwissen zu erhalten und so die bestmögliche Objektivität zu gewährleisten [255, S. 179],

[263, S. 76]. Die Anwendung von Bewertungsmethoden ist in verschiedenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses möglich [260, S. 382]. In frühen Phasen trägt die Bewertung zur grundlegenden Orientierung bei der Lösungsfindung bei. In späteren Phasen wird eine vorrangig vergleichende Bewertung mehrerer Konzepte durchgeführt, um die am besten geeignete Lösung auszuwählen [260, S. 382].

Die Vorgehensweise der meisten Bewertungsmethoden ist ähnlich und beinhaltet die folgenden Arbeitsschritte:

- Bereitstellen von Lösungsvarianten mit vergleichbarem Detailgrad,
- Herleiten von Bewertungskriterien aus dem Anforderungsdokument,
- Gewichten der Bewertungskriterien,
- Einführen messbarer Werte für die Erfüllung eines Kriteriums,
- Analysieren der Lösungsvarianten und Zuweisen eines Wertes bezüglich der Erfüllung der Kriterien sowie
- Vergleichen der Bewertungsergebnisse und Auswählen einer Lösungsvariante [260, S. 382–383].

Im Anschluss kann die gewählte Lösungsvariante weiter verbessert werden.

Es werden einfache, aufwendige und komplexe Methoden unterschieden, wobei nicht uneingeschränkt empfohlen wird, komplexe und zeitaufwändige Methoden anzuwenden [260, S. 382]. Die Methode sollte entsprechend der Komplexität der Entscheidungsaufgabe und der zur Verfügung stehenden Zeit gewählt werden. Bekannte Methoden sind

- der Vorteil/Nachteil-Vergleich,
- die Auswahlliste,
- die einfache Punktbewertung,
- die gewichtete Punktbewertung nach VDI-Richtlinie 2225,
- die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 und
- die Kosten-Nutzen-Analyse [255, S. 187], [260, S. 386], [263, S. 76].

Im Rahmen der Integrationsstudien und der Konzeptgruppenauswahl wird die gewichtete Punktbewertung nach VDI-Richtlinie 2225 [296] basierend auf den gewichteten Bewertungskriterien aus der Anforderungsanalyse ausgewählt. Für die erfolgreiche Implementierung dieser Methode ist eine möglichst umfassende Kenntnis der Eigenschaften der Lösungsvarianten erforderlich [260, S. 388]. Die Vorteile dieser Methode liegen darin, dass sie universell einsetzbar, einfach zu handhaben und innerhalb kurzer Zeit implementierbar ist [255, S. 193], [260, S. 388].

Bei der gewichteten Punktbewertung wird jeder Lösungsvariante j ein numerischer Wert $m_{i,j}$ zugewiesen. Dieser Wert entspricht dem Grad der Erfüllung eines Kriteriums i durch diese Lösungsvariante. Der Skalenbereich dieser Bewertung kann frei gewählt werden [260, S. 384]. Beliebte Varianten sind Skalen von 0 bis 4 oder von 0 bis 10 [260, S. 384], [296, S. 4]. Kleinere Skalenbereiche sind im Allgemeinen anfälliger für Fehleinschätzungen [260, S. 384]. Darüber hinaus kann die schlechte Erfüllung eines Kriteriums bei diesen einen stärkeren Einfluss auf das Gesamtbewertungsergebnis einer Variante haben [255, S. 183–187]. Größere Skalenbereiche ermöglichen eine fein abgestufte Abschätzung, die für spätere Entwicklungsphasen nützlich sein kann [289, S. 115]. Sie erfordern jedoch auch einen hohen Detaillierungsgrad und suggerieren einen Grad an Genauigkeit, der nicht unbedingt gegeben ist [289, S. 115]. Für sehr detaillierte Analysen ist es auch möglich, Wertfunktionen zu definieren [260, S. 384].

Aufgrund des niedrigen Technologiereifegrads der Konzeptgruppen und der frühen Entwicklungsphase wird ein enger Skalenbereich von 0 bis 4 gewählt. Die Konzeptgruppen werden von mehreren Ingenieuren unabhängig voneinander bewertet. Auf diese Weise wird ein hohes Maß an Objektivität gewährleistet [260, S. 381–382], [263, S. 76]. Darüber hinaus fließen die gesammelten Erkenntnisse aus durchgeführten Sicherheitsanalysen [298], [299], Integrationsstudien [300] und aerodynamischen Untersuchungen [301] in die Bewertung der jeweiligen Konzeptgruppen ein. Mögliche Fehleinschätzungen können durch Plausibilitätsprüfungen, Sensitivitätsanalysen und Schwachstellenanalysen vermieden werden [260, S. 401–403].

Für eine anschauliche und intuitive Darstellung der Bewertung kann ein Plus-Minus-System eingesetzt werden, vgl. Tabelle 3.7. Dabei wird die Bewertung der Erfüllung eines Kriteriums i durch eine Lösungsvariante j wie folgt durchgeführt [296, S. 4]:

- sehr gute Erfüllung: $m_{i,j} = 4$ Punkte = ++,
- gute Erfüllung: $m_{i,j} = 3$ Punkte = +,
- ausreichende Erfüllung: $m_{i,j} = 2$ Punkte = o,
- noch tragbare Erfüllung: $m_{i,j} = 1$ Punkt = –, und
- unbefriedigende Erfüllung: $m_{i,j} = 0$ Punkte = --.

Tabelle 3.7 Bewertung der Kriterienerfüllung

Kriterium	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5
Kriterium 1 ($w_1 = 0, 500$)	++	--	o	+	-
Kriterium 2 ($w_2 = 0, 333$)	-	-	o	++	+
Kriterium 3 ($w_3 = 0, 167$)	o	o	--	+	++

Zellwerte: Erfüllung des Kriteriums ist sehr gut ++, gut +, durchschnittlich o, schlecht - oder sehr schlecht --

Der relative Gewichtungsfaktor w_i eines Kriteriums i fließt in die relative Bewertung r_j einer Lösungsvariante j mit ein. Basierend auf der relativen Bewertung kann eine objektive Entscheidung über die Auswahl einer Lösungsvariante getroffen werden. Die relative Bewertung r_j einer Variante j errechnet sich aus der Summe aller Produkte der numerischen Werte einer Variante $m_{i,j}$, multipliziert mit dem Gewichtungsfaktor des jeweiligen Kriteriums w_i , dividiert durch die Skalengröße [260, S. 385]:

$$r_j = \sum_{i=1; j=1}^{k; n} w_i \cdot m_{i,j} / 4. \quad (3.2)$$

Dabei ist k die Anzahl der Kriterien und n die Anzahl der Lösungsvarianten. Basierend auf den relativen Bewertungen der Lösungsvarianten kann eine objektive Auswahl einer Lösungsvariante, in diesem Fall einer Konzeptgruppe, getroffen werden.

3.2.5 Detaillierungsphase

Die Detaillierungsphase ist die abschließende Phase zum Erreichen des Reifegrads TRL 3. Dafür wird mit den zuvor gesammelten Erkenntnissen aus der ausgewählten Konzeptgruppe die Feingestaltung des umzusetzenden Konzepts durchgeführt. Die Feingestaltung beinhaltet

- die detaillierte Konzeptbeschreibung und seine Herleitung,
- die strukturelle Dimensionierung sowie
- die rechnergestützte 3D-Modellierung und Gestaltung.

Anschließend erfolgt der Bau eines Demonstrators, wodurch der Nachweis der Funktionalität und damit TRL 3 erreicht werden. Darüber hinaus können Studien anschließen, um den Detailgrad des Konzepts zu erhöhen und die Entwicklung in Richtung TRL 4, dem Test im Laborumfeld [56, S. 10–11], zu unterstützen.

Konzeptbeschreibung und Herleitung

Die Funktionsweise des umzusetzenden Konzepts sollte anhand seiner Komponenten detailliert beschrieben werden. Dies sollte durch Konzeptskizzen und eine Bauteilliste [273, S. 148] erfolgen, vgl. Tabelle 3.8. Zudem sind die getroffenen Konstruktionsentscheidungen während der Feingestaltung nachvollziehbar herzuleiten. Darüber hinaus ist auf die zuvor identifizierten Risiken gesondert einzugehen.

Tabelle 3.8 Beispiel einer Bauteilliste

ID	Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl
K1	Komponente 1	Aufbau und Funktion von Komponente 1	1
K2	Komponente 2	Aufbau und Funktion von Komponente 2	6
K3	Komponente 3	Aufbau und Funktion von Komponente 3	4

Strukturelle Dimensionierung

An die Konzeptherleitung schließt die erste strukturelle Dimensionierung oder Auslegung der wichtigsten Komponenten des Konzepts an. Diese basiert auf den wirkenden Belastungen, die aus der Anforderungsanalyse hervorgehen. Aufgrund der Einschränkungen akademischer Studien bezüglich Personal- und Sachmitteln sowie Erfahrungswerten können die Ergebnisse dieser ersten strukturellen Dimensionierung nur als Richtwert dienen. Zudem werden die Ergebnisse auf akademischem Weg konservativ ermittelt. Im Vergleich dazu beziehen industrielle Auslegungen häufig empirische Erfahrungswerte mit ein, wodurch Produkte kleiner, leichter und kostengünstiger ausgelegt werden können.

Mit Hilfe der akademischen Auslegung kann dennoch eine erste Aussage über die Umsetzbarkeit des entwickelten Systems getroffen werden. Für weiterführende Versuche und höhere Reifegrade sind zusätzliche Auslegungsrechnungen auf einem höheren Detaillierungsgrad erforderlich.

Die Grundlage der Dimensionierung von Bauteilabmessungen bildet der Festigkeitsnachweis. Der Festigkeitsnachweis basiert auf

- der vorliegenden Belastungsart,

- der Belastungsdauer,
- dem verwendeten Werkstoff,
- der Bauteilform und
- der erforderlichen Sicherheit [302, S. 43].

Die Fachliteratur stellt zahlreiche allgemeingültige Herangehensweisen für den Festigkeitsnachweis von Bauteilen jeglicher Art bereit. Weiterhin existieren für die meisten Maschinenelemente, wie beispielsweise Stifte, Bolzen und Schrauben, spezielle Auslegungsregeln. Diese erfordern meist detailliertere Berechnungen, können dabei allerdings Materialersparnisse oder höhere Sicherheiten ermöglichen. Weiterführende Informationen können der Richtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM) [303], Literatur zur Auslegung von Maschinenelementen [302], [304], [305] oder Übersichtswerken zum Maschinenbau [290], [306], [307], [308] entnommen werden.

Die meisten Herangehensweisen für den Festigkeitsnachweis verfügen über die gleichen grundlegenden Teilschritte

- Festlegen des kritischen Bauteilquerschnitts,
- Ermitteln der vorhandenen Spannung aus der Bauteilbeanspruchung,
- Ermitteln der zulässigen Spannung aus Werkstoff- und Konstruktionskennwerten,
- Ermitteln der vorhandenen Sicherheit aus diesen Spannungen und
- Vergleichen von ermittelter und erforderlicher Sicherheit [302, S. 43].

Die Reihenfolge der Teilschritte kann entsprechend den Zielen der Auslegung variiert werden. Beispiele für diese Ziele sind

- der Nachweis der Bauteilfestigkeit mit einer gewissen Sicherheit,
- eine erste Dimensionierung von Bauteilen,
- die Verringerung der Bauteilabmessungen oder
- die Reduzierung der Materialkosten.

Die Bestimmung der kritischen Bauteilquerschnitte der wichtigsten Komponenten des ausgewählten Konzeptes bei den wirkenden Belastungen ist in dieser Phase der Konzepterarbeitung von primärer Bedeutung. Diese Querschnitte werden genutzt, um eine erste Dimensionierung der Komponenten durchzuführen.

In Abhängigkeit der vorrangigen Beanspruchung einer Komponente werden hierfür das Versagen durch Gewaltbruch, unzulässig große Verformungen oder Knicken

untersucht. Untersuchungen bezüglich Versagens durch Rissfortschreiten, mechanische Abnutzung oder Korrosion sollten zudem in einer späteren Entwicklungsphase durchgeführt werden.

Rechnerunterstützte 3D-Modellierung und Gestaltung

Mit Hilfe der erforderlichen Bauteilabmessungen, die aus der Kinematik sowie der strukturellen Dimensionierung hervorgehen, kann die detaillierte 3D-Modellierung des Konzepts durchgeführt werden. Hierfür wird ein CAD-System (Computer-Aided Design, Rechnerunterstützte Konstruktion) verwendet. Die 3D-Modellierung des Konzepts ermöglicht eine genauere Untersuchung der Funktionalität sowie möglicher Schwachstellen und somit eine verbesserte Konstruktion [260, S. 413]. Zudem werden durch die CAD-Modellierung der Bau erster Prototypen und die Erstellung von technischen Bauteilzeichnungen vereinfacht sowie die Durchführung numerischer Strömungssimulationen und Strukturanalysen ermöglicht [260, S. 421–429].

Funktionsdemonstratoren

An die Erstellung eines CAD-Modells des Konzepts und somit eines digitalen Modells schließt der Bau eines physischen Modells an. Das physische Modell kann die Funktionalität des zu entwickelnden Produkts demonstrieren und dadurch den Reifegrad TRL 3 nachweisen. Solch ein Funktionsdemonstrator wird auch als Prototyp bezeichnet [260, S. 334]. Die Vorteile eines physischen Prototyps bestehen darin, dass er anfassbar und erlebbar ist [260, S. 334]. Somit dient der Prototyp der Beurteilung des Konzepts und der Aktualisierung der Anforderungen [260, S. 334]. Zudem werden erste Erfahrungen für die Fertigung und Montage gesammelt. Weiterhin trägt der frühzeitige Bau von Prototypen durch die Erkennung von Schwachstellen und systematischen Konstruktionsfehlern dazu bei, kostenintensive Konstruktionsanpassungen in späteren Entwicklungsphasen zu vermeiden. Diese Anpassungen wurden beispielsweise bei den Einlässen der General Dynamics F-111 A oder der Boeing 727 erforderlich [9].

Die genannten Inhalte sind bereits zu großen Teilen auch mit den modernen Mitteln der virtuellen Realität (Virtual Reality, VR) umsetzbar [260, S. 334]. Allerdings erfordern diese momentan noch einen großen zeitlichen und finanziellen Aufwand, ohne dabei ein physisches Modell bereitstellen zu können [260, S. 334].

Weiterführende Analysen

Der vorgestellte Prozess ist beliebig erweiterbar. Beispielsweise kann er durch anschließende weiterführende Analysen ergänzt werden, um Labortests vorzubereiten, mit denen der Reifegrad TRL 4 nachgewiesen wird [56, S. 10–11].

Darüber hinaus können die Nachweise, die für die Musterzulassung erforderlich sind, vorbereitet werden.

Zu den möglichen Analysen zählen

- Sicherheitsmethoden, wie eine FMEA basierend auf der erstellten Bauteilliste, sowie weitere Iterationen von FTA und CCA,
- numerische Strömungsanalysen in Vorbereitung auf erforderliche Windkanaluntersuchungen [10, S. 983] und
- Simulationen von Vogelschlagereignissen (Bird Strike) als Vorbereitung auf erforderliche Vogelschlagtests [34, 25.631], [309, S. 44–45].

Zudem kann der Detailgrad der Auslegung der Konzeptkomponenten weiter erhöht werden.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

