

HOLISTISCHE METRIKEN ZUR BEWERTUNG VON LUFTFAHRZEUGEN

S. Morawietz¹, M. Strohal¹, P. Stütz¹

¹Institut für Flugsysteme, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Deutschland

Zusammenfassung

In dieser Arbeit soll ein Konzept vorgestellt werden, welches durch holistische Metriken die Grundlage für eine ganzheitliche Bewertungssystematik bildet und den Paradigmenwechsel weg von der reinen Bewertung der Flug- und Missionsleistung hin zur missionsbezogenen Systemeffektivität/-effizienz ermöglicht. Zur transparenten und nachvollziehbaren Aufbereitung des Bewertungsprozesses wird die Metriktaxonomie in unterschiedliche Detailstufen gegliedert. Den methodischen Fundus hierzu bietet der Bereich des *Systems Engineering*, in welchem das System wirkungs- (Black Box), system- (White Box) und umgebungsorientiert betrachtet wird. In diesem Sinne werden im vorgestellten Konzept die Systemgrenzen erweitert, so dass neben den Flugleistungen beispielsweise auch Fähigkeiten zur sensorbasierten Situationsanalyse (z.B. Aufklärungsleistungen) berücksichtigt werden können. Zur Entwicklung einer repräsentativen Metrik ist es weiterhin essentiell, neben dem Nutzen des Systems dessen Aufwand (Kosten) in Relation zu betrachten. Daraus ergibt sich eine Unterteilung der Kennzahlensystematik in die Effektivität, welche den Grad der Wirksamkeit betrachtet und die Effizienz, welche den Nutzen in Relation zu dem benötigten Aufwand setzt. Zusätzlich zur Umsetzung des Konzeptes werden erste Ergebnisse aus einem Teilbereich der Metrik vorgestellt, indem verschiedene Kampfflugzeuge hinsichtlich ihrer Flugleistungen bewertet und miteinander verglichen werden.

1. MOTIVATION

In der Vorentwurfsphase eines Luftfahrzeuges lassen sich mehrere Teilbereiche identifizieren, in denen Auswahlentscheidungen getroffen werden müssen. Zur Verdeutlichung dieser Bereiche wird der Lebenszyklus [1] eines technischen Systems (Luftfahrzeug) betrachtet. Dabei wurde das Vorgehensmodell XT [2] als aktueller Entwicklungsstandard mit dem *Systems Engineering – Life Cycle* Prozess [3] eines technischen Systems kombiniert (BILD 1). Der deduktive Ast beschreibt den Design Prozess [4] des Systems von dem Projektvorschlag bis zum endgültigen Design. Der induktive Ast beginnt bei dem *Design Freeze* und erstreckt sich über die sicherheitskritischen Analysen und die Nutzungsphasen bis hin zur Ausmusterung. Für die folgenden Ausführungen soll dieser induktive Zweig nicht weiter betrachtet werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll dabei nicht der Entwurfsprozess als solcher, sondern der darin integrierte Bewertungsprozess sein.



BILD 1. V-Modell des Systems Engineering

Der Entwicklungsprozess beginnt mit einem Vorschlag für ein Projekt (z.B. Fähigkeitslücke), welchem die Identifizierung der Stakeholder folgt. Um die Anforderungen an ein militärisches Luftfahrzeug zu spezifizieren, ist neben Kundengesprächen auch eine Konkurrenz-/Bedrohungsanalyse durchzuführen. In diesem Teilbereich des Entwurfsprozesses findet zum ersten Mal eine Systembewertung zur genaueren Spezifizierung der Anforderungen (*Requirements*) statt. Diese bestehen wiederum aus einem Kriterium mit einer zugehörigen Ausprägung (Zahlenwert), wobei der Wert durch die verantwortlichen Entscheider meist nicht ohne weiteres quantifiziert werden kann. So sind beispielsweise die Ausprägungen für die spezifische Überschussleistung oder die angestrebte Wendegeschwindigkeit nicht genau definierbar, ohne eine Konkurrenzanalyse zur Fähigkeitsermittlung durchzuführen. Nach der Formulierung der Anforderungen folgt die Marktsichtung, um aufgrund der Fähigkeiten bestehender Systeme eine Kaufentscheidung oder eine Neuentwicklung/Anpassung abzuleiten. Für den Fall einer Neuentwicklung (z.B. eigene Entwurfsvarianten) bzw. einer Anpassung erfolgt im Anschluss die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen, welche ebenfalls zu bewerten sind.

In allen drei o.g. Teilphasen (siehe BILD 1, rot) des Entwurfsprozesses wird ein Entscheidungs-/Bewertungsprozess durchlaufen, in dem bestehende Systeme hinsichtlich einer (mehrerer) Nutzenabsicht(en) miteinander verglichen werden. Dazu sind Kriterien anhand der definierten Nutzenabsicht auszuwählen [5], welche maßgeblich die Qualität der Entscheidung bestimmen. Während in der Vergangenheit das Design militärischer Luftfahrzeuge vorwiegend an der Erreichung der optimalen Flug- und Missionsleistungen ausgerichtet wurde, muss in den aktuellen komplexen Einsatzszenarien ein System eine Vielzahl unterschiedlichster Anforderungen zumindest eingeschränkt erfüllen und

dementsprechend konzipiert sein [6]. Durch die Einführung neuer Technologien [7] und die steigende Nutzung von unbemannten Fluggeräten (UAVs) [8] in Verbindung mit komplexen Missionsszenarien ist eine ausschließliche Betrachtung der Flugleistungen unzureichend [9] und kann durch unvollständige Bewertungsergebnisse zu irreversiblen Entscheidungen mit großer Auswirkung beitragen. Weiterhin gehen mit den Forderungen nach verbesserten, ganzheitlichen Leistungswerten durch steigende Aufgabenspektren ebenfalls Forderungen nach geringeren Anschaffungs- und „Life Cycle“-Kosten einher [10].

Aus den steigenden Leistungsanforderungen in Kombination mit begrenzten finanziellen Ressourcen ergibt sich ein konfliktäres Zielsystem, welches durch eine holistische, deskriptive Metriktaxonomie zu erfassen und zu bewerten ist. Für diese ganzheitliche, einsatz-/missionsbezogene Systembewertung innerhalb des Entwurfsprozesses ist es essentiell, die bestehenden Leistungsbegriffe wie Punkt- und Missionsleistungen durch deskriptive Metriken zu vervollständigen, um neben den Flugleistungen weitere Bereiche wie beispielsweise Fähigkeiten zur sensorbasierten Situationsanalyse zu betrachten, wobei der Grad der Automation und der damit erzielte operative Nutzen ebenfalls berücksichtigt werden soll.

2. STAND DER TECHNIK

Für die Bewertung von Luftfahrzeugen auf Missionsebene sind Modellvorstellungen zum Missionsgeschehen und der darin eingebetteten Plattformen notwendig. Auf dieser Betrachtungsebene gibt es eine Vielzahl von Modellen, welche einen bestimmten Bereich des Missionsgeschehens abbilden. In [11] lässt sich neben einem Überblick der Modelle auf Missionsebene ebenfalls eine allgemeine Modellaufstufung aller Betrachtungsebenen finden. Dabei werden teilweise unterschiedliche Submodelle kombiniert, um ein Modell auf Missionsebene zu erhalten. So wird beispielsweise die Waffenwirkung in Verbindung mit der Verwundbarkeit/Überlebensfähigkeit [12] durch andere Modelle als die Flugleistungen repräsentiert.

Diese Missionsmodelle werden von militärischen Entscheidungsträgern zur Beantwortung der Frage genutzt, wie gut oder mit welcher Wahrscheinlichkeit ein militärischer Auftrag von einem Waffensystem erfüllt werden kann. Für diesen Zweck wurde das allgemeine Modell der *System Effectiveness* durch [10] [13] eingeführt, welches zur Entwicklung der Metrikstruktur in dieser Arbeit übernommen wird. Dabei ist es wichtig, die Betrachtungsgrenzen des Systems festzulegen. Diese können beispielsweise bei einem militärischen Entscheidungsvorgang durch das gesamte Gefechtsfeld oder – bei einer anderen Betrachtungsweise – durch ein einzelnes Waffensystemen (z.B. Luftfahrzeug) gegeben sein. Daraus ergeben sich jeweils anzupassende Kriterien, welche die Effektivität eines Systems und damit dessen Fähigkeit zur Aufgabenerfüllung beschreiben.

Die Bewertung anhand dieser Kriterien wird nach [10] allgemein *Measure of Effectiveness* (MOE) genannt, welche in dieser Arbeit zur besseren Strukturierung aus der Kombination weiterer gewichteter Subkriterien – die ebenfalls stark von den betrachteten Systemgrenzen abhängig sind – besteht.

Nach [14] gibt es trotz der Relevanz dieses Systemansatzes für die zivile und militärische Entscheidungs-

unterstützung keine einheitliche Methodik, welche einen solchen Entscheidungsprozess unterstützt.

Speziell für die taktischen Entscheidungen im militärischen Bereich wurden Ansätze und Methoden entwickelt, um die Effektivität im System Gefechtsfeld zu eruieren [15]. Darin wird allerdings keine Bewertung eines einzelnen Luftfahrzeuges durchgeführt, sondern mit Hilfe von Metamodellen – unter starker Vereinfachungen der Submodelle – eine Antwort auf die Frage gesucht, wie viele Einheiten für einen bestimmten Grad der Aufgabenerfüllung benötigt werden. Die Beantwortung dieser Fragestellung ist Gegenstand des *Operations Research* [7] und soll nicht Teil dieser Arbeit sein.

3. KONZEPT

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nun ein Konzept zur ganzheitlichen Systembewertung/-analyse vorgestellt, welches in BILD 2 zu sehen ist. Kerngedanke des hier dargelegten Konzeptes ist die methodische Aufbereitung des Bewertungsprozesses durch ein domänenunabhängiges Makrokonzept und die Entwicklung einer deskriptiven, domänenspezifischen Metrikstruktur für das System Luftfahrzeug innerhalb eines Mikrokonzeptes.

Unter einer Metrik soll im Folgenden die Kombination aus einem Kriterium (deskriptives Merkmal eines Systems) mit dem zugehörigen Abstandsmaß (z.B. Euklidische Distanz) verstanden werden, welches durch das Skalenniveau mitbestimmt wird. Das Skalenniveau beschreibt die Skalierbarkeit des Kriteriums und ist damit direkt abhängig von der Kriterienausprägung (Wert). Ein Kriterium soll dabei als ein für die Bewertung relevantes Merkmal verstanden werden, welches eine Systemeigenschaft beschreibt. Einem Kriterium wird dabei seine Kriterienausprägung (z.B. Wert) beigelegt. Beispielsweise beträgt die Nutzlast (Kriterium) einer Alternative 6000kg (Wert). Die Alternativen beschreiben die unterschiedlichen Varianten innerhalb eines Systems, welche in dem Bewertungsprozess betrachtet werden. In dieser Arbeit wird das System durch Luftfahrzeuge, z.B. unterschiedliche Typen von Kampfflugzeugen oder bemannte/unbemannte Systeme, repräsentiert.



BILD 2. Grafische Darstellung des Gesamtkonzeptes

Das Makrokonzept besteht aus einem Vorgehensmodell, welchem ein interdisziplinäres Systemdenken zugrunde gelegt wird. Dieses wird aus den Konzeptanforderungen (Kap 3.2) abgeleitet und in Kap 3.3.1 genauer beschrieben. Das Mikrokonzept ist in das Makrokonzept integriert, wodurch sich das Mikrokonzept ebenfalls auf das gleiche Systemdenken stützt.

Grundlage für die Durchführung eines Bewertungsprozesses und damit für die Betrachtung der einzelnen Konzeptanteile in Verbindung mit dem Systemdenken ist – wie bereits beschrieben – eine klare Definition der Systemgrenzen.

3.1. Definition der Systemgrenze

Ausgehend von der Vielzahl existierender Bewertungsmodelle wurden in anderen Arbeiten Versuche unternommen [16], diese hinsichtlich bestimmter Kriterien zu aggregieren und damit eine Taxonomie zu entwickeln. Neben der SIMTAX-Methode [17], welche die Modelle unter anderem hinsichtlich des Zweckes, des Zeitbedarfs, bestimmter Eigenschaften und der Ausführung einteilt, existieren weitere Möglichkeiten für eine Taxonomie. Eine davon ist die Einteilung hinsichtlich deren Hierarchie, welche Zeigler [18] in dem Grad der Detaillierung sieht. Aus dieser Einteilung ergeben sich – je nach betrachteter Systemgrenze – unterschiedliche Modellebenen.

Nach dieser Einteilung reichen Modelle für Systemanalysen von detaillierten Modellen spezieller Subsysteme (Radarsysteme, Selbstschutzeinrichtung) über allgemeine Angriffs- und Verteidigungsmodelle (Luftkampf, Umgebungswahrnehmung) hin zu Missions- (komplette Einsatzmission eines Luftfahrzeuges) und ganzheitlichen Kampagnenmodellen (Verbundoperationen), welche eine Zusammenstellung multipler Missionen und militärischer Operationen unter der Beteiligung unterschiedlicher Einheiten repräsentieren [15]. Diese Modellhierarchie lässt sich in Form einer Pyramide darstellen (BILD 3). Auf unterster Ebene befindet sich das *Engineering Model*, welches die detaillierteste Beschreibung eines Subsystems enthält. Dabei kann das Subsystem mit einer Plattform (Luftfahrzeug) verknüpft oder alleinstehend betrachtet werden. Das *Mission Model* fokussiert sich auf die Betrachtung einer oder mehrerer Mission(en) eines Systems (Luftfahrzeug) oder mehrerer Systeme (Luftfahrzeuge). Der Fokus dieser Ebene bezieht sich auf die Bedingungen einer Einzelmision, ohne dabei Szenarien, Strategien oder einheitenübergreifende Fähigkeiten zu berücksichtigen [15]. Ab dem *Campaign Model* wird mit Hilfe ganzheitlicher Gefechtsfeldsimulationen versucht, quantitative Fragestellungen bezüglich der benötigten Truppenstärke für einen probablen Erfolg zu beantworten [19]. Dabei wird das Zusammenwirken verschiedener Einheiten strategisch und taktisch berücksichtigt.

In BILD 3 ist der Bereich hervorgehoben, welcher in dieser Arbeit betrachtet wird. Die betrachtete Modellebene liegt in der Missionsebene (*single*), welche detailliertere Ebenen einschließt (Engineering Model). Daraus ergibt sich als Systemgrenze ein einzelnes Luftfahrzeug mit seinen

Subsystemen einschließlich dessen Interaktionen mit der Umgebung, welches ein *System of Systems* (SoS) [6] [15] [20] darstellt. Aus diesem Ansatz in Kombination mit den o.g. Anforderungen an einen ganzheitlichen Bewertungsprozess ergeben sich abgeleitete Konzeptanforderungen.

3.2. Konzeptanforderungen

Entscheidungen sind durch ihre teilweise weitreichenden Folgen stets mit einem gewissen Risiko verbunden, woraus sich eine Verantwortung des Entscheidungsträgers ergibt. Um diese übernehmen zu können, ist ein Maß an Klarheit über die Systemzusammenhänge, die Entscheidungsabläufe und die mit der Entscheidung verbundenen Risiken erforderlich. Die Ergebnisse sind transparent und nachvollziehbar darzustellen, sowie die Ermittlung der Entscheidung in Form einer quantifizierten Ausprägung zu bestimmen. Das wesentliche Werkzeug zur Unterstützung solcher Entscheidungsprozesse ist nach [21] die Bewertung möglicher Lösungsvarianten/Alternativen durch den Vergleich relevanter Kriterien.

Daraus ergibt sich mit der Forderung einer holistischen Systembewertung die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes, welcher auf Basis des „*System of Systems*“ das Gesamtsystem mit seinen Subsystemen betrachtet. Zur deskriptiven Bewertung des Systems Luftfahrzeug sind zusätzlich die o.g. Kriterien in unterschiedliche Detailstufen zu dekomponieren. Daraus ergibt sich die Anforderung an ein hierarchisches Metrikkonzept, welches durch unterschiedliche Detaillierungsgrade das Bewertungsergebnis transparent ermittelt und nachvollziehbar aufbereitet. Dazu ist ein Systemdenken zu definieren, welches dem Konzept zugrunde gelegt wird.

Nach [15] ist die Basis für eine objektive, valide Bewertung in einem globalen System die Bewertung der technischen Subsysteme innerhalb des Gesamtsystems, welche zur Bestimmung der MOE genau zu ermitteln und deren Zusammenhänge zu identifizieren sind (SoS). Dazu ist die Identifizierung der Subsysteme notwendig, welche zur Ermittlung der Kriterienausprägung genutzt werden.

Insgesamt ergibt sich die Forderung nach einem methodisch aufbereiteten Bewertungsprozess (Makrokonzept), welcher durch deskriptive Metriken (Mikrokonzept) eine valide Bewertung der ganzheitlichen Fähigkeiten eines Luftfahrzeuges ermöglicht.

3.3. Makrokonzept

Für die interdisziplinäre Entwicklung komplexer technischer Systeme wird der Ansatz des *Systems Engineering* genutzt. Dieser fokussiert sich auf die Realisierung der Kundenwünsche und auf die möglichst frühzeitige Festlegung der Funktionalitäten innerhalb des Entwicklungsprozesses [22]. Um im Rahmen der Entscheidungsunterstützung ein komplexes technisches System hinsichtlich dessen Nutzenabsicht hinreichend genau bewerten zu können, wird die Durchführung der Systembetrachtung mit dem gleichen Ansatz der Systementwicklung und Realisierung durchgeführt. Somit wird dem Makrokonzept die Denkweise des *Systems Engineering* zugrunde gelegt, um den Bewertungsprozess methodisch aufzubereiten und weiterführend im Mikrokonzept komplexe Systemkausalitäten berücksichtigen und transparent abbilden zu können. Die Nutzenabsicht beschreibt allgemein die zugrunde gelegte Designaufgabe sowie den Einsatzzweck des Systems. Speziell wird in dieser Arbeit bei der Betrachtung des

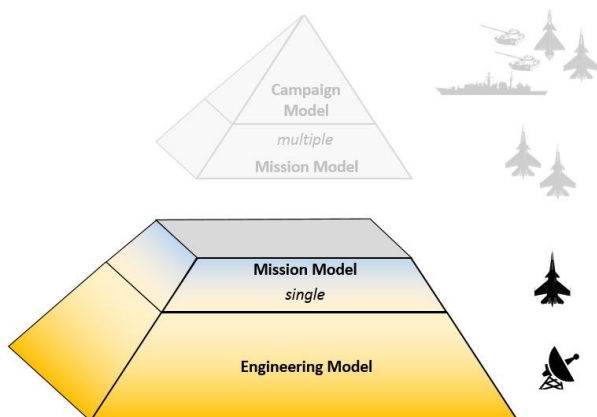


BILD 3. Darstellung der verschiedenen Modellebenen zur Systemanalyse, modifiziert nach [14]

Systems Luftfahrzeug die Nutzenabsicht durch Mission(en) repräsentiert, beispielsweise Transport-, Aufklärungs- oder Abfangmissionen.

Das Makrokonzept besteht aus dem Vorgehensmodell sowie dem zugrundeliegenden Systemdenken (BILD 2), welches die Richtlinien und Denkansätze beschreibt, um ein systemorientiertes Strukturieren und Vorgehen zu realisieren.

3.3.1. Systemdenken

Das Systemdenken [23] befasst sich mit der Gestaltung des Systems auf Grundlage der Anforderungen. Zum systemischen Denken gehören:

- 1) Systemorientiertes Denken: ganzheitliche Betrachtungsweise eines Systems, Denken in Kategorien/Subsystemen (*System of Systems*), um eine umfassende Behandlung beliebiger Sachverhalte zu ermöglichen.
- 2) Systemorientiertes Strukturieren: effektive Zerlegung der Komponenten, Aufschlüsselung der Metriken mit deren Abhängigkeiten. Beispielsweise ist die Umweltwahrnehmung über die Missionssensorik (Nutzlast) mit den Flugleistungen (Ausdauer, Reichweite, Agilität) verknüpft.
- 3) Systemorientiertes Vorgehen: Zusammenwirken der einzelnen Phasen aus dem Vorgehensmodell, interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Teilnehmer (Entscheider, Fachleute, Nutzer)

Diese 3 Richtlinien liegen sowohl dem Makrokonzept zur Durchführung des Prozesses für die Entscheidungsunterstützung als auch dem Mikrokonzept zugrunde, um die Metrikstruktur durch die Grundlagen des Systemdenkens an der SE – Philosophie auszurichten und damit komplexe Systemzusammenhänge abbilden zu können.

3.3.2. Vorgehensmodell

Der Aufbau des universellen, domänenunabhängigen Vorgehensmodells des Bewertungsprozesses in BILD 4 lehnt sich an das V-Modell [2] als Entwicklungsstandard an, wobei anstatt des Systemdesigns die Durchführung des Bewertungsprozesses Gegenstand der Betrachtung wird. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wurde auf die explizite Darstellung der vorhandenen Aufteilung des Vorgehensmodells in einen deduktiven und einen induktiven Ast verzichtet. Die unterschiedlichen Farben innerhalb des Konzeptes beschreiben dabei die methodengestützten Teilbereiche. Dabei wird der blaue (*Stakeholder Expectations Process*) und orangene (*Task Criteria Evaluation Process*) Bereich methodisch nicht ausführlicher betrachtet, da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Entwicklung der Metriken und damit auf dem grünen Bereich mit roter Umrandung (*Concept of Metrics*) liegen soll. Zur Umsetzung des Makrokonzeptes wurde der Problemlösungszyklus nach [24] angewandt, um Methoden innerhalb der Synthese zu ermitteln und diese anschließend in der Analyse hinsichtlich deren Eignung zu bewerten. Dadurch ergibt sich ein Meta-Entscheidungsproblem, dessen Ziel die Ermittlung geeigneter Methoden zur Umsetzung der farbigen Konzeptbereiche ist.

Ausgangspunkt des Bewertungsprozesses ist der Anstoß, welcher innerhalb des System Designs (Marktsichtung, Trade-Off Studie) oder im Rahmen einer Konkurrenz-/Bedrohungsanalyse zu finden ist (vgl. Kap 1). Zu Beginn werden die Stakeholder und deren Interessen identifiziert,

um die Anforderungen an den Bewertungsprozess im *Stakeholder Expectations Process* (blauer Bereich) zu definieren. Dies geschieht innerhalb der *ConOps* (*Concept of Operations*) [25], welche als geeignetste Methode ermittelt wurden und die Anforderungen an den anstehenden Bewertungsprozess formulieren sowie diesen beschreiben. Sie beinhalten unter anderem den Zweck (z.B. Bedrohungsanalyse), die Rahmenbedingungen (z.B. geografische Lage) sowie die Beteiligten des Bewertungsprozesses (z.B. Entscheidungsträger) und können als *Requirements-* Dokument des Bewertungsprozesses verstanden werden. Die *ConOps* schaffen bei allen Beteiligten ein einheitliches Verständnis bezüglich des Bewertungsprozesses und definieren die Aufgabe, welche durch die Nutzenabsicht repräsentiert wird.

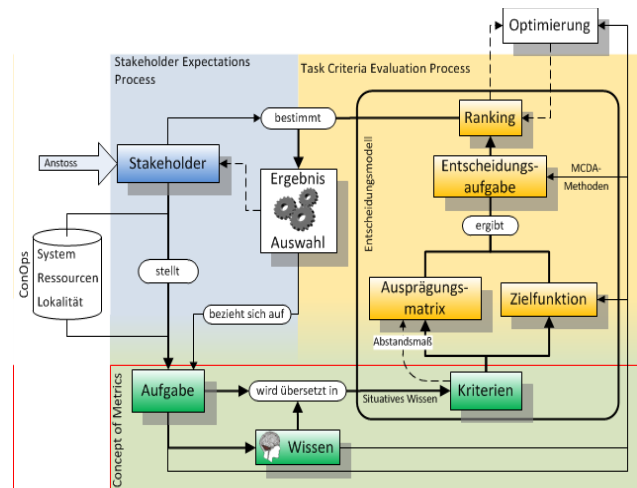


BILD 4. Vorgehensmodell des Makrokonzeptes

Allgemein kann die Aufgabe jede mögliche Nutzenabsicht eines technischen Systems beinhalten. In dieser Arbeit wird die Systemgrenze durch das Luftfahrzeug repräsentiert (vgl. Kap 3.1), wodurch sich die Aufgabe zu einer bestimmten Mission (Aufklärungsmission) oder einer Kombination aus unterschiedlichen Missionen (*Multi Role*) ergibt. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, Luftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Eignung für alle Missionen zu bewerten, wodurch die Aufgabe keine explizite Mission enthält.

Ausgehend von der Aufgabe (z.B. Transportmission) sind die Kriterien (u.a. Nutzlast, Transportleistung, Transportarbeit) abzuleiten, welche die Qualität des Ergebnisses entscheidend bestimmen. Dies geschieht innerhalb des domänenspezifischen Mikrokonzeptes (BILD 4, grüner Bereich) und wird im nächsten Kapitel dediziert betrachtet. Die Überführung der Kriterien in ein Ergebnis (Ranking) wird in dem *Task Criteria Evaluation Process* durchgeführt (oranger Bereich). Um die Kriterien für eine Bewertung nutzen zu können, sind diese zu quantifizieren. Grundlage für die Ermittlung der Kriterienausprägung können Simulationen sein, welche auf Basis relevanter Eingangsdaten der Alternativen die Werte für die Aufstellung der Ausprägungsmatrix liefern. Diese Matrix besteht aus den Kriterien mit zugehöriger Quantifizierung der jeweiligen Alternativen und bildet in Kombination mit der Zielfunktion die Entscheidungsaufgabe, welche mittels Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (MCDAs) gelöst wird.

Eine rationale Entscheidung kann nur getroffen werden, wenn eine Zielvorstellung existiert, mit deren Hilfe die erwogenen Alternativen hinsichtlich ihrer Konsequenzen miteinander verglichen werden [26]. Generell wird in der präskriptiven Entscheidungstheorie unter der Formulierung einer Zielfunktion die formale Darstellung einer Entscheidungsregel verstanden, welche aus einem Präferenzwert und einem Optimierungskriterium besteht. Dieses gibt an, ob ein Kriterium maximiert, minimiert, fixiert oder nur satisfiziert werden muss, um eine optimale Ausprägung des Präferenzwertes zu erhalten. Der Präferenzwert ist dabei über eine Präferenzfunktion Φ zu ermitteln, welche wiederum von der genutzten Methode der MCDA abhängig ist. Dabei können die Kriterien auf unterschiedlichen Skalenniveaus abgebildet werden, welche der Zielgröße Z zugrunde liegen. Beispielsweise lässt sich bei der Betrachtung der Wenderate eines Kampfflugzeuges (metrisches Niveau) feststellen, dass diese innerhalb einer Bewertung stets zu maximieren ist. Daraus ergibt sich folgende Präferenzfunktion:

$$(1) \quad \Phi(A_i) = Z_i \rightarrow \underset{i}{\text{Max!}}$$

Diese besagt, dass der Präferenzwert mit größer werdender Zielgröße ebenfalls steigt. Im Gegensatz dazu ist ein niedriger Kraftstoffverbrauch zu bevorzugen, woraus sich für dieses Kriterium eine Minimierung ergibt. Erschwerend kommt hinzu, dass mit jeder Entscheidung meist die Verfolgung mehrerer Ziele verbunden ist, welche sich untereinander beeinflussen und teilweise gegenseitig ausschließen. Daraus ergibt sich ein konfliktäres Zielsystem, welches nur durch MCDA-Methoden gelöst und daraus eine Handlungsempfehlung abgeleitet werden kann. Zur Lösung der Entscheidungsaufgabe werden multivariate Analysemethoden bereitgestellt, welche den Entscheidungsträger dabei unterstützen, die vorhandenen Alternativen in eine Rangfolge zu bringen. Die bereitgestellten Methoden stammen dabei aus der Anwenderschicht der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung [26] [27]. Diese eignen sich besonders zur Entscheidungsunterstützung bei komplexen Problemstellungen, deren Zusammenhänge und Konsequenzen nicht nur vielfältig, sondern auch schwer zu überblicken sind [28].

Um eine Alternative hinsichtlich einer bestimmten Mission und damit bestimmter Kriterien zu verbessern, wurde eine Optimierung vorgesehen. Damit können Möglichkeiten zur Steigerung der Leistungsfähigkeit oder der Kampfwertsteigerung direkt identifiziert werden, wodurch das Varianten- und Beschaffungsmanagement unterstützt wird. Weiterhin ermöglicht dies eine unmittelbare Darstellung der Verbesserung durch Modifikationen am Luftfahrzeug, wodurch der Entscheidungsträger den Nutzen einer neuen oder verbesserten Technologie in Relation zu dem aufzubringenden Aufwand (Kosten) bewerten und dessen Umsetzung prüfen kann.

Um die deskriptiven Bewertungskriterien anhand der Missionen (Aufgabe) methodisch zu entwickeln, wurde neben dem universell einsetzbaren Makrokonzept zur methodischen Aufbereitung des Bewertungsprozesses ein weiteres, domänenspezifisches Konzept entwickelt, welches sich in das Makrokonzept integriert und im folgenden Kapitel erläutert wird.

3.3.3. Mikrokonzept

Das systembezogene Mikrokonzept ist innerhalb des universellen Makrokonzeptes (BILD 4, grüner Bereich)

angesiedelt und bildet durch die Methodik zur Entwicklung der Metrikstruktur die Grundlage für die Bewertung des Systems Luftfahrzeug. Neben der domänenspezifischen Aufstellung der Kennzahlensystematik beschreibt es die Anpassung und die Gewichtung der Kriterien hinsichtlich der Nutzenabsicht, Aufgabe bzw. Mission.

Zur Ermittlung der Metrikstruktur wurde ebenfalls das angewandte Systemdenken der SE- Philosophie zugrunde gelegt, woraus sich eine hierarchische Aufteilung der Kriterien hinsichtlich deren Kategorie für eine ganzheitliche Betrachtungsweise (Kriteriendenken, kriterienorientiertes Vorgehen) ergibt. Durch dieses effektive Zerlegen der Kriterien entsteht eine Dekomposition in Subebenen, was zu einem höheren Detaillierungsgrad führt und wodurch Zusammenhänge/ Interdependenzen zwischen den einzelnen Kriterien berücksichtigt werden können. Das generelle Vorgehen zur Ermittlung der deskriptiven Kriterien anhand einer (mehrerer) Mission(en) ist in BILD 5 dargestellt.

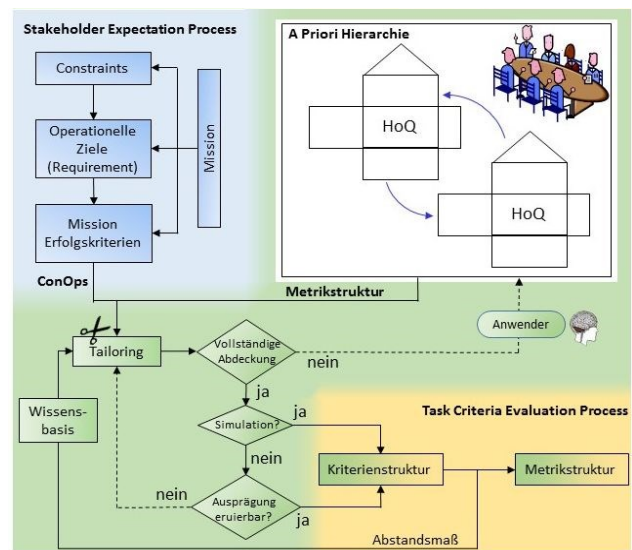


BILD 5. Mikrokonzept (Concept of Metrics)

Zur Unterstützung des Entscheiders wird dem Entscheidungsprozess ein A- Priori- Wissen beigestellt, welches aus einer Wissensbasis in Kombination mit einer holistischen Kriterienstruktur besteht.

Mit der Entwicklung moderner, luftgestützter Missionsensoren geht eine steigende Nutzung von (un)bemannten, sensortragenden Plattformen zur Durchführung von zivilen und militärischen, automatisierten Überwachungs (*Surveillance*)- und Aufklärungsaufgaben (*Reconnaissance*) einher [29]. Weiterhin forscht das Institut für Flugsysteme (ISF) an der Universität der Bundeswehr München an Automatisierungs-/Assistenzkonzepten zur Flugführung sowie sensorbasierten Umweltwahrnehmung für bemannte/unbemannte Luftfahrzeuge, wodurch in diesem Bereich eine sachkundige Expertise vorhanden ist. Daher wird sich für die Umsetzung der entwickelten Bewertungsmethodik für bemannte/unbemannte Luftfahrzeuge auf die o.g. Bereiche Flugleistungen und sensorbasierte Umweltwahrnehmung in Kombination mit Automatisierung beschränkt. Dabei soll die methodische Entwicklung ganzheitlicher Metriken und nicht deren Vollständigkeit im Vordergrund stehen. Diese zu entwickelnde Kriterienstruktur ist in Workshops mit Fachleuten aus unterschiedlichen

Bereichen zu erarbeiten. Erste Workshops zur Definition der obersten Kriterienebene (BILD 6, Top Level) sowie der ersten Fähigkeitsebene (BILD 6, oranger Bereich) wurden bereits durchgeführt. Es ist geplant, die Struktur in weiteren Workshops zu einzelnen dedizierten Subkriterien zu vervollständigen.

Die Wissensbasis enthält u.a. implementiertes Wissen, welches die A- Priori- Kriterienstruktur situativ, automatisiert an die betrachtete(n) Mission(en) anpasst (*Tailoring*). Dabei werden Kriterienzweige, welche nicht zur Repräsentation der zugrunde gelegten Mission(en) beitragen, aus der Struktur entfernt, da eine Betrachtung zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen würde. Beispielsweise ist für die Betrachtung einer zivilen Transportmission nicht relevant, wie hoch der Radarquerschnitt und damit die Detektierbarkeit des Luftfahrzeuges sind, wodurch sich bei der Berücksichtigung dieses nicht deskriptiven Kriteriums eine Verfälschung des Ergebnisses hinsichtlich der betrachteten Mission ergibt.

Zusätzlich ist die kontextabhängige Wichtigkeit der Kriterien von erheblicher Relevanz, da nicht alle Kriterien stets zu gleichen Teilen aggregiert werden. Aus Expertenbefragungen der Workshops werden Empfehlungen für die Wichtigkeiten gewonnen, welche durch die Entscheider noch verändert werden können. Nach dem *Tailoring* erfolgt eine Überprüfung der deskriptiven Kriterien durch den Entscheidungsträger hinsichtlich deren Abdeckung. Weiterhin ist es essentiell, dass die Kriterienausprägung für jede Alternative objektiv mittels Simulationen oder wiederum subjektiv durch Expertenbefragungen eruiert werden kann. Der grundlegende Anspruch ist, die Ausprägungsermittlung zu objektivieren und nur in Einzelfällen bei Bedarf die Ermittlung subjektiv durchzuführen.

Die holistische Metrikstruktur setzt sich aus der Kriterienstruktur und dem zugehörigen Abstandmaß – welches von dem Skalenniveau der Kriterienausprägung abhängig ist – zusammen. Das Wissen bzgl. des Abstandmaßes wird ebenfalls in der Wissensbasis modelliert, so dass auf Basis der angepassten Kriterien die Metrikstruktur erstellt werden kann. Die methodische Ermittlung der Kriterienstruktur wird im Folgenden behandelt.

3.3.3.1. House of Quality

Um die Kriterienstruktur in Verbindung mit der (den) Mission(en) aufzustellen (BILD 5, weißer Kasten), wurde eine geeignete Methode ermittelt, welche ihren Ursprung in der Qualitätssicherung (*Quality Function Deployment*, QFD [30]) hat. Diese dient ursprünglich zur Umsetzung der Kundenwünsche und Qualitätsanforderungen in technische Spezifikationen und ist als *House of Quality* (HoQ) [30] bekannt. Dabei wird die Problemstellung stetig dekomponiert, wodurch sich eine hierarchische Gliederung ergibt und neue Subebenen entstehen. Um die „*Top Down*“- Aufstellung der Kriterienstruktur sowie die Zuordnung zu einzelnen Nutzenabsichten und deren Gewichtung zu realisieren, wurde diese Methode auf die Entwicklung der A- Priori- Kriterienstruktur übertragen.

Innerhalb der *Top Level* Struktur (BILD 6) werden die systembeschreibenden Kriterien – in Analogie zu dem Entwurfsprozess – in Randbedingungen (*Constraints*) und Anforderungen (*Requirements*) unterteilt. Die Aufteilung in BILD 6 zeigt, welche Kriterien der obersten Ebene den jeweiligen Bereichen zugeordnet sind. Zu den Rand-

bedingungen zählen die Ökologie und die sicherheitskritischen Betrachtungen (*Safety*). Diese Randbedingungen beschreiben die Voraussetzung, damit ein System in dem Bewertungsprozess berücksichtigt wird. Sind diese notwendigen Bedingungen für die Bewertung nicht erfüllt, beispielsweise durch Überschreitung der CO₂-Emission (Ökologie) oder der zulässigen Ausfallwahrscheinlichkeit (*Safety*), sind diese als Ausschlusskriterium zu verstehen. Für diese Arbeit wird vorausgesetzt, dass die Randbedingungen durch Einhaltung allgemeingültiger Vorschriften/Regulieren stets erfüllt sind, wodurch diese Kriterien zur Vervollständigung mit aufgeführt, aber für das HoQ nicht relevant sind.

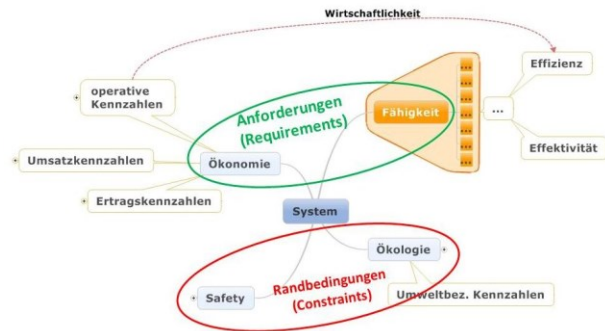


BILD 6. Top Level Metriken als Ausgangspunkt für HoQ

Die Anforderungen an ein Luftfahrzeug bestehen auf der obersten Ebene aus den Zweigen Ökonomie und Fähigkeit, wobei die Ökonomie alle monetären Kennzahlen und die Fähigkeit die Kennzahlen zur Missionserfüllung/-eignung beinhaltet. Die Metrikstruktur zur Bewertung des Luftfahrzeuges befindet sich innerhalb des Fähigkeitszweiges (orange), welcher abhängig von der (den) Mission(en) auch in Kombination mit den monetären Kennzahlen betrachtet wird. Um ausgehend von dem Top Level dieses fortlaufend zu dekomponieren und methodisch eine holistische Kriterienstruktur aufzubauen, werden in den Zeilen die relevanten Missionen eines Luftfahrzeuges zusammengetragen. Diese wurden angelehnt an die 300 Fähigkeitsbausteine der Bundeswehr definiert, wie sie bei der Ermittlung von Fähigkeitslücken und Funktionalen Forderungen (FFF) [31] innerhalb des *Customer Product Managements* (CPM nov.) genutzt werden [32]. Dabei wurde die Auflistung durch zivile Missionen ergänzt. Es besteht die Möglichkeit, einzelne Missionen unterschiedlich zu gewichten, damit komplexe, multiple Missionen hinreichend genau betrachtet werden können.

In BILD 7 ist die schematische Übertragung der Methode des HoQ von der ursprünglichen Anwendung (links) auf die Entwicklung einer Kriterienstruktur für die Bewertung von bemannten/unbemannten Luftfahrzeugen (rechts) dargestellt. In den Spalten des HoQ werden die Missionskriterien eingetragen, welche auf der obersten Ebene innerhalb der Workshops mit Fachleuten festgestellt wurden. Die Kriterien werden mit den Missionen korreliert und bei Eignung zur Bewertung der Missionserfüllung mit einer Gewichtung versehen, andernfalls werden die Gewichtung zu Null gesetzt. Die Korrelationen zwischen den Kriterien werden durch Interdependenzen berücksichtigt. Nach der Zuordnung der „*Top Level*“- Kriterien zu den Missionen wird die oberste

Kriterienebene dekomponiert, wodurch sich erneut ein HoQ ergibt. Die Zuordnung und Gruppierung wird in den Workshops durchgeführt und kann nachträglich überprüft und bei Bedarf angepasst werden. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit und zur Anpassung an die kognitiven Fähigkeiten des Entscheidungsträgers sollte ein Kriterium in nicht mehr als sieben (7 ± 2) Subkriterien dekomponieren [33].

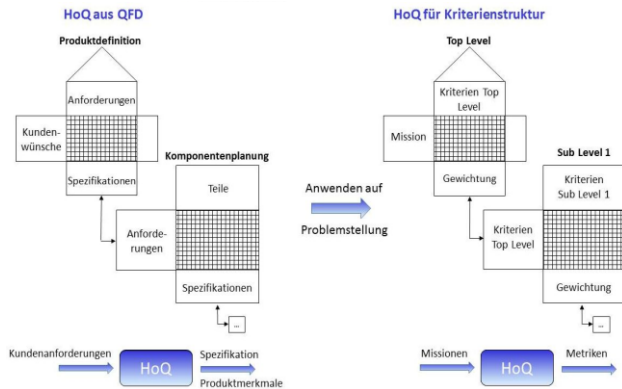


BILD 7. Übertragung der Methode des *House of Quality* auf die Entwicklung einer Metrikstruktur

Mit dem HoQ ist es möglich, die Kriterienstruktur methodisch anhand der Missionen abzuleiten. Dadurch wird dem Entscheidungsträger durch Vorgabe der Mission – welche in den ConOps festgelegt werden – die dafür deskriptive Kriterienstruktur bereitgestellt, welche dieser überprüfen und bei Bedarf nachträglich anpassen kann. Um den Bewertungsprozess ganzheitlich aufzubereiten und damit neben der *System Effectiveness* [10] [13] auch die Kosten zu berücksichtigen, wurde eine weitere Unterteilung in der Kriterienstruktur vorgenommen, welche den Nutzen und diesen in Relation zu dem dafür notwendigen Aufwand betrachtet.

3.3.3.2. Effektivität vs. Effizienz

Innerhalb der Kriterienstruktur wird in die Betrachtung der Effektivität und der Effizienz unterschieden (BILD 6), welche intern zusätzlich gewichtet werden kann. Die Effektivität beschreibt dabei den Grad der Wirksamkeit (Nutzen) und die Effizienz den Nutzen mit dem dafür notwendigen Aufwand (Nutzen/Aufwand). Wird der Aufwand monetär beschrieben und in Relation zum Nutzen gestellt, ergibt sich aus der Effizienz die Wirtschaftlichkeit. Dabei stellt die Effektivität die notwendige Bedingung für die Effizienz dar. Besteht kein Nutzen, kann dieser auch nicht in Relation zum Aufwand betrachtet werden, wodurch die Effizienz als hinreichende Bedingung für die Bewertung verstanden werden kann. Ein Luftfahrzeug ist somit durch geringe Life Cycle Kosten nicht zwingend effizient, wenn es durch eine geringe Fähigkeit zur Aufgabenerfüllung nicht effektiv ist. Wie in BILD 8 dargestellt, ergibt sich die Quantifizierung der *System Effectiveness* (E_N) aus der sicherheitskritischen Betrachtung (S), der Ökologie (Ö) und der Fähigkeit (F) des Luftfahrzeuges (2) [10]. Dabei werden für diese Arbeit die Werte für die Zulassbarkeit (Safety und Ökologie) zu eins gesetzt (vgl. Kap 3.3.3.1), wodurch die Effektivität des Systems (hellrote Schnittmenge in BILD 8) eine direkte Funktion der Fähigkeit (ohne Effizienz) wird.

Dabei ist die beliebige Erweiterbarkeit der Kriterienstruktur mit Hilfe des Mikrokonzeptes hervorzuheben, so dass beispielsweise die Zulassbarkeit ebenfalls als Kriterium berücksichtigt werden kann. Allgemein kann die Kriterienstruktur mit der Methodik des Mikrokonzeptes für beliebige Kriterienzweige erweitert werden. Neben dem Begriff der Effektivität soll in diesem Zusammenhang der Begriff der *System Efficiency* (E_{NK}) eingeführt werden, welcher das Verhältnis der *System Effectiveness* zu den Kosten betrachtet (3) und die rote Schnittmenge beschreibt.

$$(2) E_N = S \cdot \ddot{O} \cdot F_{E_N}$$

$$(3) E_{NK} = \frac{E_N}{K} = S \cdot \ddot{O} \cdot F_{E_{NK}}$$

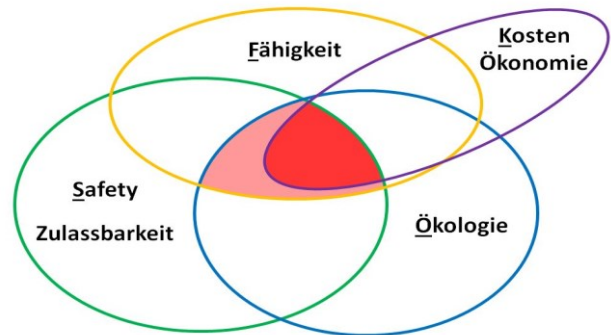


BILD 8. Venn-Diagramm der obersten Kriterienebene

Der in Relation gesetzte Aufwand kann beispielsweise durch monetäre Kosten beschrieben werden. Zur Ermittlung der Life Cycle Kosten können verschiedene Methoden angewandt werden, um bei Investitionsentscheidungen Folgekosten ins Kalkül zu ziehen oder diese bei Neuentwicklungen abzuschätzen. Weitere Arten von Kosten sind beispielsweise die Zeit oder der Kraftstoffverbrauch, welche für einige Methoden der Entscheidungstheorie zu monetarisieren sind. Andere Aufwände lassen sich nur schwer in Geldeinheiten ausdrücken, wie beispielsweise der Verlust von Menschenleben oder die Umweltverschmutzung durch Schadstoffemissionen. Damit hat die Effizienz nicht immer die Einheit 1/€, sondern kann auch einen Wirkungsgrad oder eine Güte darstellen.

Für eine Bewertung kann es wichtig sein, den Grad der Wirksamkeit in den Fokus zu setzen und den Aufwand reduziert zu betrachten oder ganz zu vernachlässigen. So kann beispielsweise im militärischen Bereich der Fokus auf der Auftragserfüllung und weniger auf dem monetären Aufwand liegen. Wird hingegen zusätzlich die benötigte Zeit als Aufwand betrachtet, gilt es diese meist zu minimieren, was bei kommerziellen (Airlines) aber auch bei militärischen Anwendungen (MIP-IB: Area Intercept – Max. Speed HI-HI-HI) durchaus von Bedeutung sein kann, wodurch sich eine Berücksichtigung der *System Efficiency* und weiterführend eine Gewichtung zwischen *System Effectiveness* und *System Efficiency* ergibt. Zur Beschreibung beider Maßzahlen sind auf der untersten Ebene der Struktur Kriterien aufzustellen, welche in allen übergeordneten Ebenen aggregiert werden können. Dazu wurden allgemeingültige Leitbegriffe definiert, welche in den Zweigen der Struktur in deskriptive Kriterien und

weiterführend in quantitative Argumente (Formeln) zu transformieren sind. Ein Ausschnitt der Leitbegriffe wird bei der Umsetzung des Konzeptes im nächsten Kapitel genauer betrachtet.

4. UMSETZUNG DES KONZEPTE

Als Anwendungsbeispiel soll im Rahmen einer Bedrohungsanalyse ein Vergleich von unterschiedlichen Kampfflugzeugen durchgeführt werden. Dabei wird sich vorerst auf den bekannten und etablierten Bereich der Flugleistungen beschränkt, um die Grundlage für spätere Betrachtungen der Flugleistung in Kombination mit weiteren Fähigkeiten (Aufklärungsleistung) zu schaffen. Zur Umsetzung des Konzeptes wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche die Kriterienausprägung durch die Quantifizierung der qualitativen Argumente ermittelt. Für diese Quantifizierung der Effektivität und der Effizienz auf der untersten Ebene der Flugleistungen sind in TAB 1 beispielhaft zwei Leitbegriffe aufgeführt.

	Leitbegriff	Quantifizierung	
Effektivität (Wenderate)	Rate	STR	$\begin{bmatrix} \circ \\ - \\ S \end{bmatrix}$
Effizienz (Steigleistung)	Zeiteffizienz	$C_p = \frac{m_N gh}{t}$	$[W]$

TAB 1. Ausschnitt der Quantifizierung für die Kriterien auf der untersten Ebene

Die Rate beschreibt beispielsweise die Effektivität des Luftfahrzeuges bei der Durchführung eines Kurvenfluges, woraus sich die Entwicklung der Kriterien für die stationäre (STR)- und instationäre Wenderate ableiten lässt. Weiterhin wird zur repräsentativen Kriterienermittlung für die Effizienz eines Steigverfahrens die benötigte Arbeit (Nutzen) in Relation zur aufgebrauchten Zeit (Aufwand) betrachtet, um eine Steigleistung zu definieren. Eine weitere Art des Aufwandes ist beispielsweise der benötigte Kraftstoff, welcher zu einer Steiggüte führen würde. Auf diese Weise werden auf der untersten Kriterienebene qualitative Argumente anhand der Leitbegriffe definiert, welche anschließend quantifiziert werden, um eine Ausprägung der Kriterien zu ermitteln. Diese Kriterien werden dem *Task Criteria Evaluation Process* übergeben, um anschließend unter Nutzung der MCDA- Methoden ein Ergebnis zur Entscheidungsunterstützung zu ermitteln. Als Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung wurde PROMETHEE [34] genutzt. Bei dieser Methode kommt es durch Paarvergleiche zu einer Ermittlung der Dominanz einer Alternative gegenüber den Anderen. Dadurch ergibt sich als maximale Ausprägung der Wert 1 (100%), welcher eine absolute Dominanz einer Alternative ausdrückt. Umgekehrt bekommt eine Alternative den Wert -1 (0%), wenn diese von allen anderen Alternativen dominiert wird. Der Wert 0 beschreibt somit ein Gleichgewicht zwischen den Stärken und Schwächen. Die grundlegende MCDA- Methodenauswahl soll in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

Als Nutzenabsicht wurde in diesem Beispiel eine Kombination von unterschiedlichen Missionen gewählt. Diese sind in TAB 3 im Anhang dargestellt und zeigen nur einen Ausschnitt aus dem HoQ. Die Missionen wurden mit den Top Level Kriterien und anschließend für jede weitere

Subebene korreliert, um die deskriptiven Zweige der Struktur und in Kombination damit die relativen Gewichtungen zu ermitteln. Ausgehend von der Gewichtung wurden Paarvergleiche durchgeführt, welche die Grundlage für die Ermittlung der Präferenzen [34] bilden. Nach [35] besteht beispielsweise erst dann ein Vorteil im Luftkampf, wenn die Differenz der Wenderate mehr als 2 – 3 °/s beträgt. Alle Werte unterhalb sind nicht als Vorteil und damit auch ohne Präferenz zu bewerten, wodurch sich für diesen Bereich eine Indifferenz ergibt.

Zur Visualisierung und transparenten Darstellung der Ergebniszusammensetzung werden Grafiken (vgl. BILD 9) auf jeder Ebene der Metrikstruktur erzeugt. Die Darstellung der Alternativen erfolgt dabei entweder in Relation zu einer Bezugsalternative oder anhand der Ergebnisse aus der MCDA- Methode. Es können auf der obersten Ebene einzelne Kriterien ausgewählt werden, um deren aggregierte Ergebnisse detaillierter darzustellen. Diese Art der Ergebnisaufbereitung ermöglicht eine transparente Gliederung des Bewertungsergebnisses, wodurch Entscheidungen unterstützt und begründet werden.

Das Ergebnis des Vergleiches zwischen vier Kampfflugzeugen für den Bereich der Flugleistungen ist in TAB 2 dargestellt. Es zeigt, dass sich Alternative 3 stark von den Übrigen abhebt. Sie besitzt keine absolute Dominanz gegenüber den Konkurrenten, aber einen deutlichen Vorteil bei der Betrachtung der Missionen aus TAB 3. Je höher die Betrachtungsebene und damit je mehr Subkriterien aggregiert werden, desto stärker nähern sich die Alternativen der Marke von 0 (50%) an, vorausgesetzt es besteht keine absolute Dominanz zwischen den Alternativen. Je weiter die Kriterien dekomponiert werden, desto detaillierter stellt sich das Ergebnis dar. In BILD 9 wurde das Ergebnis für die Kriterien der Subebene „Flugleistungen“ visualisiert. Weiterhin wurde das Kriterium *Wenderate* dekomponiert, um die dedizierten Ergebnisse der Subkriterien festzustellen und die Zusammensetzung des Ergebnisses für die übergeordnete Ebene (Wenderate) transparent zu verdeutlichen. Auf diese Weise lassen sich Stärken und Schwächen auf den jeweiligen Kriterienachsen identifizieren und sofort in Relation zu einem anderen Flugzeug bewerten. Weiterhin lassen sich mit dieser Form der Darstellung die Auswirkungen von Modifikationen (Kampfwertsteigerungen) direkt feststellen und unter Betrachtung der aufzubringenden Kosten auch wirtschaftlich bewerten. Damit ist das Werkzeug zusätzlich für den Verkauf oder die Beschaffung von Luftfahrzeugen geeignet, indem beispielsweise Luftfahrzeuge mit unterschiedlicher Missionssensorik oder verschiedener Automationsgrade für die Missionseignung bewertet (*System Effectiveness*) sowie weiterführend in Relation zu den Kosten (*System Efficiency*) betrachtet und damit für eine Anschaffung berücksichtigt werden können.

	Dominanz	%	Ranking
Alt 1	-0,0366	48,16	3
Alt 2	-0,1378	43,10	4
Alt 3	0,1459	57,29	1
Alt 4	0,0285	51,42	2

TAB 2. Ergebnis des Bewertungsprozesses mit der MCDA- Methode PROMETHEE

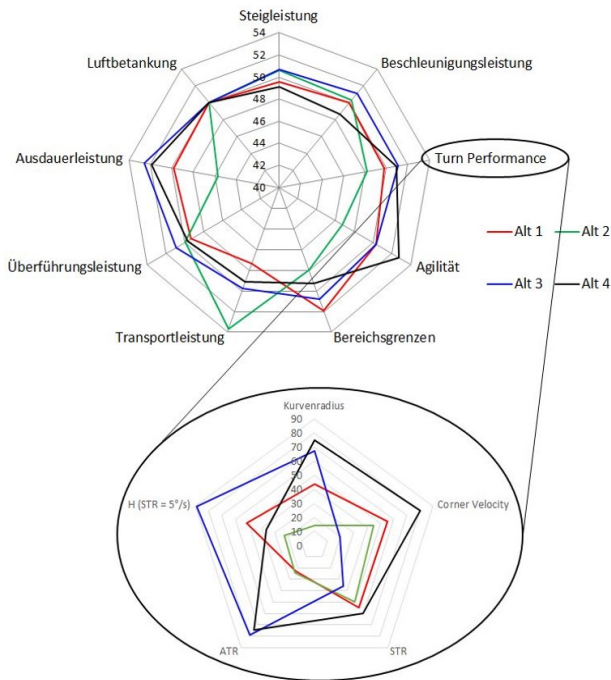


BILD 9. Visualisierung des Ergebnisses für die Subebene Flugleistungen und die Sub-Subebene Wenderate

5. AUSBLICK

Zur weiterführenden Umsetzung des systemspezifischen Mikrokonzeptes (*Concept of Metrics*) ist mit Hilfe von Fachleuten der Kriterienzweig der Umweltwahrnehmung erstmals dediziert zu dekomponieren, um deskriptive Metriken für den Vergleich zu entwickeln und weiterführend Möglichkeiten zur Ermittlung der Kriterienausprägung (Simulationen) zu eruieren. Dabei sollen Verknüpfungen zwischen Flug/Missions- und Aufklärungsleistungen hergestellt werden. Dazu sind Workshops geplant, in denen durch Methoden der Wissensaquirierung Kriterien zur Beschreibung der sensorbasierten Umweltwahrnehmung und deren Interdependenzen mit den Flugleistungen ermittelt werden, welche die bereits entwickelte Metrikstruktur ergänzen. In Verbindung damit ist zur objektiven Ermittlung der Kriterienausprägungen eine Simulationsumgebung zu entwickeln, welche auf die aktuelle Umgebung zur Ermittlung der Flugleistungen aufbaut.

6. REFERENZEN

[1] G. S. Parnell, P. J. Driscoll, and D. L. Henderson, *Decision Making in Systems Engineering and Management*, 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011.
 [2] R. Höhn, *Das V-Modell XT: Anwendungen, Werkzeuge, Standards*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
 [3] S. Jackson, *Systems Engineering for Commercial Aircraft*, 2nd ed. Aldershot, England, Brookfield, Vt, USA: Ashgate, 2015.
 [4] M. H. Sadraey, *Aircraft design: A Systems Engineering Approach*, Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2013.

[5] O. Bandte, *A Probabilistic Multi-Criteria Decision Making Technique for Conceptual and Preliminary Aerospace Systems Design*, Dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia, Sep. 2000.
 [6] D. S. Soban and D. Marvis, "The Need for a Military System Effectiveness Framework: The System of Systems Approach," *AIAA Journal*, no. 2001-5226.
 [7] N. K. Jaiswal, *Military Operations Research: Quantitative Decision Making*, Boston, MA: Springer US, 1997.
 [8] M. R. Kirby, *A Methodology for Technology Identification, Evaluation, and Selection in Conceptual and Preliminary Aircraft Design*, Georgia Institute of Technology, 2001.
 [9] F. W. Ploeger, "Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO," Joint Air Power Competence Centre, Jan. 2010.
 [10] A. R. Habayeb, *Systems Effectiveness*, Burlington: Elsevier Science, 1987.
 [11] S. Nichols, "Air Force Standard Analysis Toolkit and Analysis Approach," Air Force Studies and Analysis Agency Washington DC, Dec. 2005.
 [12] M. R. Driels, "Weaponering: Conventional Weapon System Effectiveness," *AIAA Education Series*, 2013.
 [13] F. A. Tillman, C. L. Hwang, and W. Kuo, "System Effectiveness Models: An Annotated Bibliography," *IEEE Trans. Rel.*, vol. R-29, no. 4, pp. 295-304, 1980.
 [14] D. S. Soban, *A Methodology for the Probabilistic Assessment of System Effectiveness as Applied to Aircraft Survivability and Susceptibility*, Dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2001.
 [15] R. J. Hillestad and Louis Moore, "The Theater-Level Campaign Model: A Research Prototype for a New Generation of Combat Analysis Model," 1996.
 [16] Force Structure, Resource, and Assessment Directorate (J-8), "Catalog of Wargaming and Military Simulation Models," *ADA246431*, Feb. 1992.
 [17] L. B. Anderson, J. H. Cushman, A. L. Gropman, and Roske, Jr, Vincent P, "SIMTAX - A Taxonomy for Warfare Simulation (Workshop Report)," *ADA217671*, Oct. 1989.
 [18] B. P. Zeigler, H. Praehofer, and T. G. Kim, *Theory of modeling and simulation: Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems*, 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2000.
 [19] R. Hillestad, B. Bennett, and L. Moore, "Modeling for Campaign Analysis: Lessons for the next Generation of Models," Executive Summary, United States Air Force, Santa Monica, 1996.
 [20] M. Jamshidi, "System of Systems - Engineering New Challenges for the 21' Century," University of Texas, *IEEE A&E Systems Magazine*, May. 2008.
 [21] A. Breiung and R. Knosala, *Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen*, Berlin, Springer, 1997.
 [22] R. D. Hamelin, D. D. Walden, and M. E. Krueger, "INCOSE Systems Engineering Handbook V3.2: Improving the Process for SE Practitioners," Idaho, 2010.

- [23] G. Patzak, *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1982.
- [24] R. Haberfellner, O. de Weck, E. Fricke, *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendungen*, Freiburg, Orell Füssli Verlag, 2012.
- [25] ANSI/AIAA, "Guide to the Preparation of Operational Concept Documents," AIAA G 043:2012.
- [26] J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, New York: Springer, 2005.
- [27] P. Sen and J. Yang, *Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design*, London: Springer London, 1998.
- [28] J. Oberschmidt, "Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Energietechnologien unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Präferenzen," Wien, *IEWT*, vol. 6, pp. 16-25, 2009
- [29] P. van Blyenburgh, "UAVs- Current Situation and Considerations for the Way Forward," *RTO AVT Course: Deployment and Operation of UAVs for Military and Civil Applications*, no. 9, 1999.
- [30] V. Zimmermann, *Quality Function Deployment im Entwicklungsprozess*, Kaiserslautern, *Produktionstechnische Berichte*, no. 20, 1995
- [31] A. Mosenthin, "Fähigkeitslücke und Funktionale Forderung (FFF)," Pfg II X, Bonn, Az 79-10-50.
- [32] BMVg, "Customer Product Management (nov.)," BMVg AIN I 1, Bonn, Az 79-01-01, Nov. 2012.
- [33] G. A. Miller, "The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for Processing Information," *Psychological Review*, vol. 63, no. 2, pp. 81–97, 1956.
- [34] J. Geldermann, "Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung: Methode PROMETHEE," Georg-August-Universität Göttingen, Jan. 2014.
- [35] W. B. Herbst, "Future Fighter Technologies," *Journal of Aircraft*, vol. 17, no. 8, pp. 561–566, 1980.

7. ANHANG

Mission \ Merkmale										
	Missionsanteile	Steigleistung	Beschleunigungsleistung	Turn Performance	Agilität	Bereichsgrenzen	Transportleistung	Überführungsleistung	Ausdauerleistung	Luftbetankung
Strategic Attack	6	9	9	9	9	9	9	0	5	9
Counter Air (SEAD, Air Super.)	2	9	9	9	9	9	9	0	5	9
Electronic Warfare (Standoff Jamming, Escort Jamming)	2	5	5	5	0	5	9	0	9	9
Counter Land (Close Air Support, Air Interdiction)	0	9	9	9	9	9	9	0	5	9
Ferry, Transport	6	0	0	0	0	0	9	9	0	9
Absolute Gewichtung		82	82	82	72	82	144	54	58	144
Relative Gewichtung		0,102	0,102	0,102	0,09	0,102	0,18	0,067	0,072	0,18

TAB 3. Ausschnitt des *House of Quality* für die Ermittlung der Kriterien und deren Gewichtung auf der Ebene „Flugleistungen“