



VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

VDI - BILDUNGSWERK

„Wartungsaufwandsanalyse auf Systemebene“

Auszüge aus:

**Qualitative und quantitative Wartbarkeits- und
Zuverlässigkeitsanalysen**

Dipl.-Ing. K.B. Brink und Ing. grad G. Rieck, Friedrichshafen

ca. 1973

Zitat aus:

AIRBUS INDUSTRIE: *Direct Maintenance Costs –Art or Science*. Blagnac, 1989

„ ... Airbus Industrie mainly uses the comparative method [wie hier beschrieben!]. When dealing with an aircraft type on which it does not have DMC information, a comparison is done with a known aircraft, ATA chapter per ATA chapter. Then a coefficient is determined reflecting the advantages and disadvantages between the known DMC and those being studied. This method allows Airbus Industrie to determine DMC of future aircraft from their early phase of development.”

sehr frühen Entwurfsstadium den zu erwartenden Wartungsaufwand mit Hilfe systematischer Methoden abschätzen zu können. Damit lassen sich folgende Ziele erreichen:

- Vermeidung von operationell nicht einsatzfähigen Entwicklungen,
- Frühzeitiges Erkennen von besonderen Problemgebieten,
- Rechtzeitiges Einleiten von Maßnahmen zur Lösung solcher Probleme,
- Beeinflussung des Projekts für wirtschaftliche und wirksame Wartung.

3.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Das im folgenden beschriebene Verfahren stellt eine Parallele zu den in der Gewichtsermittlung und -prognostik angewendeten Verfahren dar, wo statistische Schätzverfahren schon seit langem generell akzeptiert werden. Nach Möglichkeit sollen die statistischen Daten aus Einsatzanalysen nach der normalen Einführungszeit von 2 Jahren stammen und das Projektflugzeug nach dieser Einführungszeit beurteilt werden.

Die statistischen Daten, pro System erfaßt bzw. ausgewertet, müssen folgende Grunddaten der Vergleichsflugzeuge enthalten, um das Verfahren anwendbar zu machen:

- Mannstunden am Flugzeug,
- Mannstunden in der Werkstatt,
- Materialkosten.

Weiterhin sind folgende Angaben je System wünschenswert:

- Anzahl Komponenten,
- Anzahl verschiedenartiger Komponenten,
- Mittlere Einsatzdauer des Flugzeuges,
- Lauf- und Inspektionszeiten,
- Ausbauraten.

Allgemeine Kenntnisse sollten über folgende Punkte vorliegen:

- Allgemeine Umgebungsbedingungen,
- Betriebszeit der Systeme,
- Erreichbarkeit der Komponenten,
- Zugänglichkeit zu den Komponenten,
- Funktions- und Zustandskontrollen,
- Größenordnung und Handlichkeit der Komponenten,
- Überholzeit in der Werkstatt,
- Neukosten von Komponenten,
- Verbrauchsmaterialkosten.

3.2.2 Beurteilungsgesichtspunkte

Das Verfahren erfordert die Ermittlung von Verhältnisfaktoren zwischen dem Vergleichsflugzeug (Index v) und dem Projektflugzeug (Index x) nach den Hauptgesichtspunkten:

- Entwurf,

3.2 Wartungsaufwandsanalyse auf Systemebene

Im folgenden wird gezeigt, daß es möglich ist, schon in einem frühen Projektstadium Aussagen über den später zu erwartenden Wartungsaufwand zu machen. Das Verfahren kann überall dort angewendet werden, wo es sich um relativ komplexe Systeme handelt und wo eine Vergleichbarkeit zu ähnlichen, früher entwickelten Systemen gegeben ist.

Das Beispiel, an dem das Verfahren demonstriert werden soll, ist dem Flugzeugbau entnommen, kann jedoch durch entsprechende Modifikation auch auf andere Gebiete erweitert werden.

Das Verfahren benutzt als Basis Analysewerte aus der Praxis z.B. eines im Einsatz befindlichen Flugzeuges und vergleicht jedes System des Projektflugzeuges mit dem entsprechenden System des Vergleichsflugzeuges und bewertet mit Vergleichsfaktoren Komplexität, Entwicklungsreife, Erreichbarkeit usw. Diese Vergleichsfaktoren, auf die im folgenden noch näher eingegangen wird, ergeben als Produkt Beurteilungsfaktoren für das Projekt im Verhältnis zum Vergleichsflugzeug (Entwurf, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit, Überholbarkeit, Materialaufwand). Die Analysewerte des Vergleichsflugzeuges ergeben auf Systemebene mit den entsprechenden Beurteilungsfaktoren als Produkt die Wartungskostenwerte des Projektflugzeuges auf Systemebene. Die Summen aus den Systemwerten ergeben für das Projektflugzeug erste entwurfsabhängige Anhaltswerte des zu erwartenden Wartungsaufwandes.

Das Verfahren wurde entwickelt, um bei der heute zum Teil erreichten hohen Systemkomplexität und den hohen Anforderungen zur Erreichung guter Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit schon in einem

- Zuverlässigkeit,
- Wartbarkeit,
- Überholbarkeit,
- Materialaufwand.

Die Hauptgesichtspunkte sind ihrerseits wieder das Produkt aus verschiedenen Einzelfaktoren, die nachstehend im einzelnen definiert werden.

3.2.3 Entwurfsmethoden

$$D = D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot D_4 \cdot D_5$$

Komplexität D_1

Der Komplexitätsfaktor wird durch das Verhältnis der abgeschätzten Anzahl wartungsintensiver Komponenten N_x des Projektflugzeuges und der tatsächlichen Anzahl wartungsintensiver Komponenten des Vergleichsflugzeuges N_v beschrieben:

$$D_1 = \frac{N_x}{N_v}$$

Die Komplexität des Vergleichsflugzeuges ist durch folgende beiden Zahlenangaben gekennzeichnet:

- Anzahl Komponenten/System,
- Anzahl verschiedenartiger Komponenten/System.

Beide Zahlenwerte können der Komponentenliste oder der Beanstandungstabellierung des Vergleichsflugzeuges entnommen werden. Hier soll die Anzahl Komponenten/System der Beanstandungstabellierung benutzt werden, da sich z.B. auch alle Zuverlässigkeitsdaten auf diese Anzahl/System beziehen.

Entwicklungsreife D_2

Der Entwicklungsreifefaktor wird durch das Verhältnis Entwicklungsreife des Projektflugzeuges zur Entwicklungsreife des Vergleichsflugzeuges ausgedrückt

$$D_2 = \frac{E(x)}{E(v)}$$

Der Faktor D_2 beurteilt z.B. einen verbesserten Entwurf gleicher oder ähnlicher Untersysteme und Komponenten innerhalb eines Systems, kann jedoch auch zu einer Verschlechterung durch Benutzung wenig oder gar nicht erprobter Neuerungen führen, die hohen Wartungsaufwand und voraussichtlich Änderungen zur Folge haben werden.

Im einzelnen gilt zur Ermittlung der Entwicklungsreife folgende Formel:

$$D_2 = \frac{E(x)}{E(v)} = \frac{BF(x)}{LF(v) \cdot GF(v)}$$

Dabei ist $BF(x)$ der Faktor für die Bauweise des Projektes, wobei dieser Faktor für das Vergleichsflugzeug 1 gesetzt wird. Bei verbesserter Bauweise des Projektvorschlags gegenüber dem Vergleichsflugzeug sollte der Faktor $BF(x) = 0,95$, bei stark verbesserter Bauweise 0,9 und bei einem Durchbruch in der Bauweise 0,8 gesetzt werden.

Der Faktor $LF(v)$ stellt den Lernfaktor dar, das heißt für die Beurteilung des Vergleichsflugzeuges ist das Einsatzjahr der Analyse entscheidend; z.B. wird für das Projektflugzeug das 3. Einsatzjahr mit $LF(x) = 1$ angesetzt. Der Faktor $LF(v)$ kann folgender Lernkurve entnommen werden.

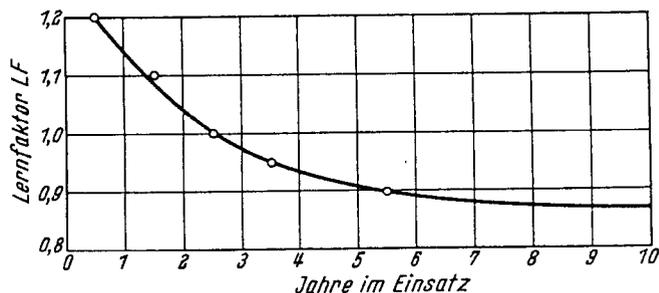


Bild 2. Lernfaktor in Abhängigkeit von der Einsatzzeit

Der Generationsfaktor $GF(v)$ bewertet, ob es sich bei dem Vergleichsflugzeug um ein Flugzeug der 1., 2. oder gar 3. Generation handelt. ($BF(v) = 1,0$; 0,9 oder 0,8). Für das Projektflugzeug wird $GF(x) = 1$ gesetzt.

Der Entwicklungsreifefaktor D_2 liegt nach den oben genannten Angaben im allgemeinen zwischen 0,8 und 1,3.

Umgebungsbedingungen D_3

Der Umgebungsbedingungs faktor D_3 ist das Verhältnis der Einflüsse aus den Umgebungsbedingungen des Projektflugzeugsystems und seiner Komponenten zu den Umgebungsbedingungen des Vergleichsflugzeugsystems und seiner Komponenten.

$$D_3 = \frac{V(x)}{V(v)}$$

Eine exakte formelmäßige Berechnung des Faktors D_3 kann nicht vorgeschlagen werden, da auch die Umgebungsbedingungen des Vergleichsflugzeuges abgeschätzt werden müssen. Die Hauptgesichtspunkte, die zur Abschätzung der Umgebungsbedingungen führen, sind z.B.

- Machzahl (Unter-, Überschall),
- Thermische Belastung (heiß, kalt),
- Feuchtigkeitsgehalt (hoch, tief).

Normalerweise wird D_3 gleich 1 sein. Nur wenn die Umgebungsbedingungen und ihr Einfluß begründet vorausgesagt werden können, wird dieser Faktor für die mehr oder weniger beanspruchten Systeme ungleich 1 gesetzt.

Mittlere Einsatzdauer D_4

Für das Vergleichsflugzeug ist die durchschnittliche Flugzeit je Einsatz bekannt und kann der Datenbank entnommen werden. Für das zu bewertende Projekt trifft im allgemeinen eine zum Vergleichsflugzeug unterschiedliche Flugzeit je Einsatz zu. Einige Flugzeugsysteme durchlaufen einen vollständigen Funktionszyklus je Einsatz, unabhängig von der Einsatzdauer, andere dagegen arbeiten kontinuierlich während des gesamten Einsatzes und sind damit rein flugzeitabhängig.

Wird mit a der Zeiteinfluß und mit b der Flugzykluseinfluß bezeichnet und gilt:

$$a + b = 1,$$

so ergibt sich für den Faktor D_4 :

$$D_4 = a + b / \frac{Fh_{(x)}}{Fh_{(v)}}.$$

Die Einflußfaktoren a und b sind empirisch erfaßbar. Einige Beispiele sind z.B. für Flugzeuge der heutigen Mittel- und Langstreckenklasse der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tafel 4. Einflußfaktoren für einige ausgewählte Flugzeugsysteme

Kode	a (Flugzeit)	b (Flugzyklus)
21	0,75	0,25
22	0,85	0,15
23	0,85	0,15
24	0,80	0,20
25	0,30	0,70
26	0,50	0,50
27	0,40	0,60
28	0,95	0,05
29	0,60	0,40
30	0,55	0,45
31	0,90	0,10
32	0,10	0,90
33	0,50	0,50
34	0,80	0,20
35	0,60	0,40
36	0,70	0,30
38	0,55	0,45
49	0,25	0,75
52	0,10	0,90
53	0,40	0,60
54	0,50	0,50
55	0,45	0,55
56	0,35	0,65
57	0,50	0,50
71	1,00	-
72	0,60	0,40
73	1,00	-
74	0,30	0,70
75	1,00	-
76	0,40	0,60
77	0,90	0,10
78	0,40	0,60
79	1,00	-
80	-	1,00

Betriebsart D_5

Die durchschnittliche tatsächliche Betriebszeit eines Systems und seiner Komponenten im Verhältnis zur Einsatzzeit beeinflusst die Abnutzung und damit direkt die Wartungskosten.

Der Betriebszeitfaktor D_5 ist das Verhältnis der Betriebszeiten Top/Flugstunden der verschiedenen Systeme von Projekt- und Vergleichsflugzeug

$$D_5 = \frac{Top/Fh_{(x)}}{Top/Fh_{(v)}}$$

3.2.4 Zuverlässigkeitsfaktoren

Wartungsprogrammfaktor R_1

Der Wartungsprogrammfaktor stellt das Verhältnis der präventiven Wartungsfrequenzen von Projekt- und Vergleichsflugzeug dar. Niedrige, bzw. hohe

Wartungsfrequenzen stellen unter anderem in erster Näherung ein Maß für den erreichten Wartungszuverlässigkeitsstand dar, das heißt, lange Laufzeiten zwischen den Inspektionen oder Überholungen für Einzelkomponenten (TBI oder TBO) und zusammengefaßt für Systeme z.B. repräsentieren eine gute Wartungszuverlässigkeit.

R_1 ist als das geometrische Mittel der präventiven Wartungsfrequenzen von Projekt- und Vergleichsflugzeug anzusetzen

$$R_1 = \sqrt[n]{\frac{f_{A(x)}}{f_{A(v)}} \cdot \frac{f_{B(x)}}{f_{B(v)}} \cdot \dots \cdot \frac{f_{N(x)}}{f_{N(v)}}}$$

n Anzahl der verschiedenen Inspektionen, f Inspektionsrate/1 000 FH, A, B, C ... N Inspektionsart

Für $N_{(x)} \neq N_{(v)}$ wird aus zwei Raten, die sich in der Inspektionsart ähnlich sind, die Summe gebildet und diese dann mit der entsprechenden doppelten Rate des Vergleichsflugzeuges ins Verhältnis gesetzt:

$$\frac{f_{A1(x)} + f_{A2(x)}}{2f_{A(v)}}$$

Ausbaurrate R_2

Die Ausbaurrate stellt den Hauptanteil der am Flugzeug durchzuführenden außerplanmäßigen oder korrektiven Wartung dar. Da die Ausbauraten ein direktes Maß für die Wartungszuverlässigkeit darstellen, werden sie von allen Flugzeughaltern (Luftverkehrsgesellschaften, Luftwaffe) statistisch erfaßt.

Der Faktor R_2 für die Ausbaurrate ist also das Verhältnis der geschätzten Ausbaurate des Projektflugzeuges zu dem statistisch erfaßten Wert des Vergleichsflugzeuges:

$$R_2 = \frac{AR_{(x)}}{AR_{(v)}}$$

3.2.5 Wartbarkeitsfaktoren

Erreichbarkeit M_1

Mit diesem Faktor wird beurteilt, ob das System und seine wesentlichen Komponenten ohne jegliche Hilfsmittel vom Boden aus oder nur unter Benutzung von einfachen bzw. komplizierten Ständen mehr oder weniger bequem erreichbar sind. Die Erreichbarkeit ist abhängig von der Höhe über dem Boden. Die vergleichbaren Faktoren für Projekt- und Vergleichsflugzeug können dem Bild 3 entnommen werden. Der Erreichbarkeitsfaktor ergibt sich zu

$$M_1 = \frac{M_1(x)}{M_1(v)}$$

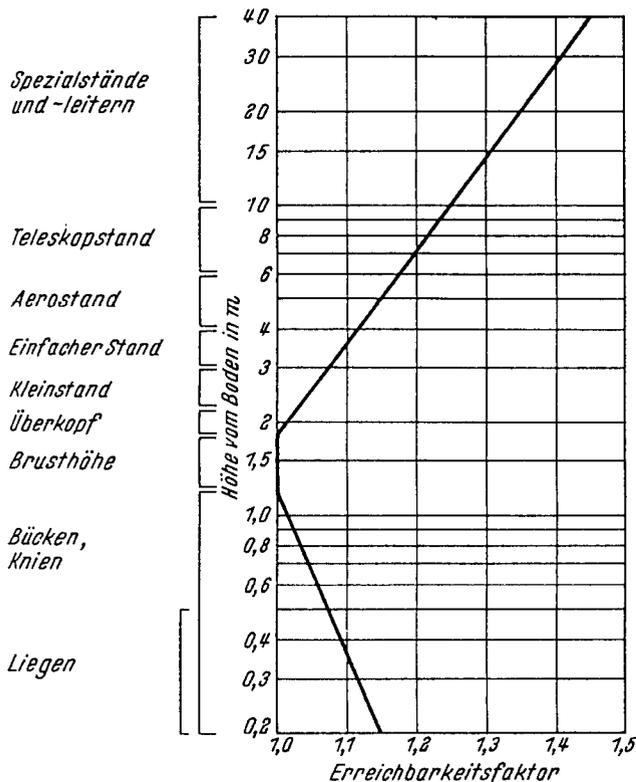


Bild 3. Bestimmung der Erreichbarkeit

Zugänglichkeit M_2

Die Zugänglichkeit ist durch die Zeit definiert, die für den Zugang zum System bzw. seiner Komponenten benötigt wird, das heißt sie berücksichtigt den Zeitverlust durch Öffnen und Schließen von Wartungsklappen-, deckeln, Verkleidungen sowie Aus- und Einbau von behindernden Komponenten. Der Zugangszeitfaktor und damit der Zugänglichkeitsfaktor

$$M_2 = \frac{M_2(x)}{M_2(v)}$$

kann nach dem Vorschlag in der Tafel 5 bestimmt werden.

Tafel 5. Bestimmung der Zugänglichkeit

Zugangsart	Zugangszeitfaktor
Direkt, außerhalb des Flugzeuges	1,0
Direkt, innerhalb des Flugzeuges	1,05
Schnellverschußklappe, außerhalb	1,05
Schnellverschußklappe, innerhalb	1,1
Verkleidung mit Schnellverschuß	1,1
Verkleidung mit Schrauben	1,3
Zugangsdeckel mit Schrauben	1,3
Zugangsdeckel mit Schrauben und Trockendichtung	1,4
Zugangsdeckel, naß abgedichtet	1,6
Zugang nach Entfernung behindernder Komponenten:	
– mechanisch/pneumatisch	1,3
– hydraulisch/Kraftstoff/Schmierstoff	1,5

Die Zugänglichkeit wird an den Projekten noch nicht klar erkennbar sein. Außerdem haben nicht alle Komponenten eines Systems die gleiche Zugänglichkeit. Deshalb sollen hier mehr die Möglichkeiten des Einbaus der Untersysteme und wartungswichtiger Komponenten im Hinblick auf den Zugangszeitfaktor für das Projektflugzeug abgeschätzt und mit Hilfe der oben genannten Tabelle mit dem Vergleichsflugzeug ins Verhältnis gesetzt werden.

Kontrollierbarkeit M_3

Die Zustandsüberwachung und die Möglichkeit der Funktionskontrolle des Systems und seiner Komponenten beeinflusst in starkem Maße die Fehlerdiagnose und die Vorausplanung des zu erwartenden Wartungsaufwandes.

Der Faktor M_3 soll deshalb die Eigenschaften eines Systems berücksichtigen, die der leichten Fehlerauffindung und der Zustandsüberwachung dienen.

Tafel 6. Bestimmung der Kontrollierbarkeit

Kontrollierbarkeitsmerkmale	M_3
– Direkte (unmittelbar ablesbare) Funktions- und/oder Zustandsanzeige des Systems sowie seiner wartungsintensiven und vor allem seiner NO-GO-Komponenten im Flug	0,9
– desgl. am Boden	1,0
– Funktions- und /oder Zustandskontrolle mittels Bodengerät, jedoch direkt auswertbar	1,05
– desgl. für Auswertemöglichkeit nur auf Basis	1,1
– ohne Funktions- oder Zustandskontrollmöglichkeit am Flugzeug, jedoch GO-System oder hauptsächlich GO-Komponenten	1,15
– desgl. jedoch NO-Go-System mit hauptsächlich NO-GO-Komponenten	1,3

Mit Hilfe der Tafel 6 kann dann der Faktor M_3 bestimmt werden

$$M_3 = \frac{M_3(x)}{M_3(v)}$$

Handlichkeit M_4

Der Faktor

$$M_4 = \frac{M_4(x)}{M_4(v)}$$

beurteilt die Größenordnung (Volumen, Sperrigkeit) und das Gewicht der wartungswichtigen Komponenten eines Systems und den erforderlichen Aufwand zur Handhabung während Aus-/Einbau und Transport zum Ersatzteillager und Werkstatt hinsichtlich Personal und Hilfsmittel.

Für ähnlich ausgelegte Systeme von Flugzeugen gleicher Größenordnung wird M_4 normalerweise gleich 1 sein. Deshalb wird M_4 nur für die Systeme genauer bestimmt werden müssen, deren wartungswichtige Komponenten sich in ihrer Größenordnung wesentlich unterscheiden. Tafel 7 gibt als Orientierung einige Beispiele verschiedener Handlichkeitsfaktoren.

Tafel 7. Bestimmung der Handlichkeit

Benötigter Aufwand zum Aus- und Einbau sowie Transport in Ersatzteillager oder Werkstatt				Handlichkeitsfaktor				
Anz. Mech.	Aus- und Einbau		Transport		Mann	Hilfsmittel		Summe
	Anz. Mech.	Benötigte Hilfsmittel	Anz. Mech.	Benötigte Hilfsmittel		Aus-/ Einbau	Transp.	
1	—	—	1	—	1,0	—	—	1,0
1	—	—	1	Handkarren	1,0	—	0,1	1,1
1	Flaschenzug	—	1	—	1,0	0,2	—	1,2
1	Flaschenzug	—	1	Handkarren	1,0	0,2	0,1	1,3
2	—	—	1	—	1,5	—	—	1,5
2	—	—	1	Handkarren	1,5	—	0,1	1,6
2	Flaschenzug	—	1	—	1,5	0,2	—	1,7
2	Flaschenzug	—	1	Handkarren	1,5	0,2	0,1	1,8
2	Gabelstapler	—	1	Gabelstapler	1,5	0,3	—	1,8
2	Flaschenzug	—	1	Spezialwagen, Hand	1,5	0,2	0,2	1,9
2	Flaschenzug	—	1	Transportwagen, mot.	1,5	0,2	0,2	1,9
2	Gabelstapler	—	1	Spezialwagen, Hand	1,5	0,3	0,2	2,0
2	Gabelstapler	—	1	Spezialtransporter, mittel	1,5	0,3	0,5	2,3
3	Gabelstapler	—	1	Gabelstapler	2,0	0,3	—	2,3
2	Kranwagen	—	1	Transportwagen, mot.	1,5	0,6	0,2	2,3
2	Kranwagen	—	1	Transportwagen, mot.	1,5	0,6	0,2	2,3
3	Flaschenzug	—	1	Spezialwagen, Hand	2,0	0,2	0,2	2,4
2	Kranwagen	—	1	Spezialtransporter, mittel	1,5	0,6	0,5	2,6
3	Kranwagen	—	1	Transportwagen, mot.	2,0	0,6	0,2	2,8
3	Gabelstapler	—	1	Spezialtransporter, mittel	2,0	0,3	0,5	2,8
3	Gabelstapler	—	2	Gabelstapler	2,5	0,3	—	2,8
2	Kranwagen	—	2	Transportwagen, mot.	2,0	0,6	0,2	2,8
2	Kranwagen	—	2	Spezialtransporter, mittel	2,0	0,6	0,5	3,1
3	Gabelstapler	—	2	Spezialtransporter, mittel	2,5	0,3	0,5	3,3
3	Kranwagen	—	2	Transportwagen, mot.	2,5	0,6	0,2	3,3
3	Kranwagen	—	2	Spezialtransporter, mittel	2,5	0,6	0,5	3,6
3	Kranwagen	—	1	Spezialtransp., komplex	2,0	0,6	1,0	3,6
3	Flaschenzug	—	2	Spezialtransp., komplex	2,5	0,2	1,0	3,7
3	Kranwagen	—	2	Spezialtransp., komplex	2,5	0,6	1,0	4,1

3.2.6 Überholbarkeitsfaktoren

Überholzeit O_1

Dieser Faktor beurteilt das Verhältnis der Überholzeit zwischen dem Projektflugzeug und dem Vergleichsflugzeug, also

$$O_1 = \frac{O_{1(x)}}{O_{1(v)}}$$

Die Überholzeiten der wartungswichtigen Komponenten des Vergleichsflugzeuges sollten aus statistischen Daten bekannt sein. Die Überholzeiten für die Komponenten des Projektflugzeuges müssen dazu im Verhältnis abgeschätzt werden.

Wenn für das Vergleichsflugzeug keine oder ungenügende statistische Daten für das Projektflugzeug im Unterschied zum Vergleichsflugzeug nicht klar begründet werden können, sollte O_1 stets gleich 1 gesetzt werden.

Überholgeschicklichkeit O_2

Die Überholgeschicklichkeit vergleicht die durchschnittlich benötigten Ausbildungs- und Geschicklichkeitsgrade sowie den notwendigen Aufwand für Werkstattausrüstung zur Überholung wartungswichtiger Komponenten des Systems zwischen Projekt- und Vergleichsflugzeug, also

$$O_2 = \frac{O_{2(x)}}{O_{2(v)}}$$

Dabei soll die Notwendigkeit von Spezialisten und Werkstattausrüstung nur betrachtet werden, wenn diese den normalen heutigen Stand wesentlich über- oder unterschreiten. Als Wertmesser für O_2 sollen die Gesamtarbeitskosten (Lohnzeitkosten + Gemeinkosten) pro Mannstunden sein, um die Mehrkosten für den Spezialisten und den Einrichtungsaufwand zu erfassen.

3.2.7 Materialaufwand

Die Materialkosten umfassen die Kosten für Neuanschaffung (Nachholbedarf) von Reparaturteilen (Geräte, Strukturteile, Ausrüstung) sowie die Kosten für Verbrauchsmaterial (Kleinteile, Dichtungen, Meterware, Fette, Öle, Lacke usw.), das zur Reparatur, Überholung und Konservierung am Flugzeug und in der Werkstatt verbraucht wird. Die Materialkosten sind abhängig von der Materialverwendungshäufigkeit, also der Wartungszuverlässigkeit, sowie den Ersatzteilneukosten und den Verbrauchsmaterialkosten. Das Vergleichsmaß der Wartungszuverlässigkeit ist der unter Punkt "Zuverlässigkeitsfaktoren" ermittelte Faktor R als Produkt von $R_1 \cdot R_2$. Der Materialaufwandsfaktor soll die Neuanschaffungskosten- und die Verbrauchsmaterialkosten-Verhältnisse darstellen. Da für das Projektflugzeug beide Verhältnisse schwer zu bestimmen und nachzuweisen sind, sollen Gewicht und Rohmaterialkosten als Beurteilungsfaktoren verwendet werden.

Ersatzteilmengewichtsfaktor S_1

Das Systemgewicht oder besser das Gewicht der wartungswichtigen Teile des Vergleichsflugzeuges kann den Gewichtslisten der Hersteller entnommen werden.

Das Systemgewicht für das Projektflugzeug muß abgeschätzt werden, das heißt der Gewichtsaufstellung für das Projekt entnommen werden. Der Faktor S_1 ist demnach das Verhältnis zwischen dem Systemgewicht des Projektflugzeuges zu dem Systemgewicht des Vergleichsflugzeuges:

$$S_1 = \frac{S_{1(x)}}{S_{1(v)}}$$

Grundmaterialkostenfaktor S_2

Für die Beurteilung des Materialaufwandes sind die Kosten für das Grundmaterial ebenso wichtig wie das Gewicht. Hierzu sollen Kosten pro Kg der verwendeten Rohmaterialien (Aluminiumlegierungen, Titan, Edelmetalle, Kunststoffmaterialien, Beryllium) für das Projektflugzeug und das Vergleichsflugzeug ermittelt werden, die auch für die Fertigungskosten zu verwenden sind. Der Faktor S_2 ist dann das Verhältnis der System-Grundmaterialkosten/kg des Projektflugzeuges zu den System-Grundmaterialkosten/kg des Vergleichsflugzeuges:

$$S_2 = \frac{S_{2(x)}}{S_{2(v)}}$$

Bei Verwendung von mehreren Grundmaterialien je System wird das arithmetische Mittel der Einzelverhältnisse verschiedener Untersysteme oder Funktionen gebildet. Dabei muß jedoch die Wertigkeit der Untersysteme oder der Funktionen beachtet werden. Es gilt dann:

$$S_2 = g_A \frac{S_{2A(x)}}{S_{2A(v)}} + g_B \frac{S_{2B(x)}}{S_{2B(v)}} + g_N \frac{S_{2N(x)}}{S_{2N(v)}}$$

G prozentualer Gewichtsanteil, A, B, C ... N verwendete Grundmaterialart

3.2.8 Berechnung des Wartungsaufwandes auf Systemebene

Für die zu Beginn des Abschnitts beschriebenen Faktoren ergeben sich zusammengefaßt:

$$D = \prod_1^5 D_1 = \text{Entwurf faktor,}$$

$$R = R_1 \cdot R_2 = \text{Zuverlässigkeitsfaktor,}$$

$$M = \prod_1^4 M_i = \text{Wartbarkeitsfaktor,}$$

$$O = O_1 \cdot O_2 = \text{Überholbarkeitsfaktor,}$$

$$S = S_1 \cdot S_2 = \text{Materialaufwandsfaktor.}$$

Wartungszuverlässigkeitsfaktor R_W

Das Produkt aus Entwurfs- und Zuverlässigkeitsfaktor repräsentiert zusammengefaßt die Wartungszuverlässigkeit, da die Einzelfaktoren (D_i) aus Entwurfs- und Zuverlässigkeitsfaktoren (R_i) die Wartungshäufigkeit direkt beeinflussen:

$$\frac{R_W(x)}{R_W(v)} = D \cdot R$$

Mannstunden am Flugzeug L_F

Die Wartungsmannstunden am Flugzeug werden beeinflusst durch die Wartungszuverlässigkeit als Frequenzfaktor und durch die Wartbarkeit als Zeitdauerfaktor. Es wird angenommen, daß beide die gleiche Wertigkeit haben. Der Faktor L_F ist dann das Produkt aus Entwurf, Zuverlässigkeit und Wartbarkeit.

Das Verhältnis von Mannstunden am Projektflugzeug zu Mannstunden am Vergleichsflugzeug ist das Produkt der Verhältnisfaktoren Entwurf (D), Zuverlässigkeit (R) und Wartbarkeit (M), also

$$\frac{L_F(x)}{L_F(v)} = R_W \cdot M$$

Mannstunden in der Werkstatt L_W

Die Wartungsmannstunden in der Werkstatt sind wieder abhängig von der Wartungszuverlässigkeit R_W . Der Zeitdauerfaktor wird durch die Überholbarkeit bestimmt, die aus den Faktoren Überholzeit und Überholgeschicklichkeit gebildet wird. Außerdem wird angenommen, daß eine Abhängigkeit von der Kontrollierbarkeit (M_3) besteht, da M_3 den Anteil unberechtigter Ausbauten und damit den Komponentenausfall in der Werkstatt stark beeinflusst.

Das Verhältnis von Mannstunden in der Werkstatt für das Projektflugzeug zu Mannstunden in der Werkstatt für das Vergleichsflugzeug ist demnach das Produkt aller Entwurfs- (D) und Zuverlässigkeits- (R) Faktoren, des Überholbarkeitsfaktors (O) und des Kontrollierbarkeitsfaktors (M_3), also

$$\frac{L_W(x)}{L_W(v)} = R_W \cdot M_3 \cdot O$$

Materialkosten C_S

Die Materialkosten im Einsatz sind vornehmlich abhängig von den Kosten neu zu beschaffender Geräte und den Kosten des zu Reparaturen und Auswechseln von Komponenten am Flugzeug sowie für Reparaturen und/oder Überholung der Komponenten in der Werkstatt benötigten Verbrauchsmaterialien, das durch Systemgewicht und Systemmaterialkosten dargestellt wurde. Die Frequenz des Materialbedarfs wird bestimmt durch die Wartungszuverlässigkeit, also Entwurf und Zuverlässigkeit.

Das Verhältnis von Materialkosten für das Projektflugzeug zu Materialkosten für das Vergleichsflugzeug ist das Produkt aller Entwurfs- und Zuverlässigkeitsfaktoren und des Materialaufwandsfaktors, also

$$\frac{C_S(x)}{C_S(v)} = R_W \cdot S$$

3.2.9 Direkte Wartungskosten für den typischen Einsatz

Die ermittelten Verhältniswerte für die Mannstunden am Flugzeug und in der Werkstatt werden mit ihren entsprechenden Mannstundenfaktoren L_F bzw. L_W multipliziert. Damit erhält man die gesamten

Wartungsmannstunden für das Projektflugzeug $L_{(x)}$
in MMH/Fh:

$$L_{(x)} = \frac{L_{F(x)}}{L_{F(v)}} L_{F(v)} + \frac{L_{W(x)}}{L_{W(v)}} L_{W(v)} \quad [\text{MMH/Fh}],$$

$$L_{(x)} = L_{F(x)} + L_{W(x)}$$

Die Wartungsmannstunden des Projektflugzeuges $L_{(x)}$ sind weiterhin mit dem Personalkostenfaktor PKF in DM/MMH zu multiplizieren. Das Produkt stellt die Personalkosten des Projektflugzeuges pro Fh dar, $C_{P(x)}$ in DM/Fh:

$$C_{P(x)} = L_{(x)} \cdot \text{PKF} \quad [\text{DM/Fh}].$$

Die Materialkosten des Projektflugzeuges C_S ergeben sich auf die gleiche Weise in DM/Fh:

$$C_{S(x)} = \frac{C_{S(x)}}{C_{S(v)}} C_{S(v)} \quad [\text{DM/Fh}].$$

Die direkten Wartungskosten des Projektflugzeuges C_W erhält man nach Addition der Personal- und Materialkosten:

$$C_{W(x)} = C_{P(x)} + C_{S(x)} \quad [\text{DM/Fh}].$$

3.2.10 Flugstunden- und Flugzyklusabhängige Wartungskosten

Die direkten Wartungskosten/Fh können nun pro System nach ihrem flugzeitabhängigen oder flugzyklusabhängigen Einfluß prozentual in Wartungskosten/Fh und Wartungskosten/Flugzyklus aufgeteilt werden.

Dazu finden die prozentualen Einflußfaktoren

a für Flugzeit und

b für Flugzyklus

Verwendung.

Die Faktoren a und b werden mit den direkten Wartungskosten $C_{W(x)}$ des entsprechenden Systems multipliziert.

$$\text{Kosten/Fh} = a \cdot C_{W(x)},$$

$$\text{Kosten/Flugzyklus} = b \cdot C_{W(x)} \cdot t_E.$$

t_E Flugzeit/Einsatz