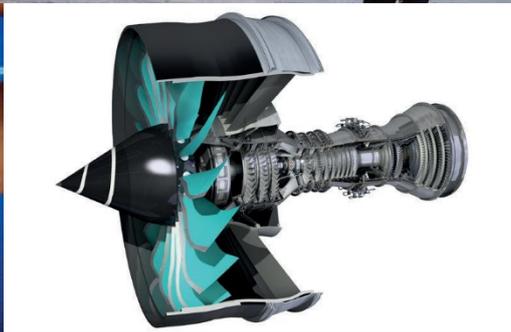


Ein Leitfaden für Praktizierende zur

# Anwendung von AS13004

zur Erreichung der Null-  
Fehler-Zielsetzung



**Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse  
und Kontrollplan**

Beinhaltet die Verwendung von Referenz-PFMEAs

**Dr Ian Riggs**



# INHALT

INHALT	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	5
DIE AERO ENGINE SUPPLIER QUALITY GROUP (AESQ)	6
FOKUS AUF FEHLERVERMEIDUNG	8
KAPITEL 1 EINFÜHRUNG IN DIE FEHLERMÖGLICHKEITS- UND EINFLUSSANALYSE	21
KAPITEL 2 AS13004 IM ÜBERBLICK	25
KAPITEL 3 PROZESSFLUSSDIAGRAMME (PFD)	31
KAPITEL 4 MERKMALSMATRIX	37
KAPITEL 5 PROZESS-FMEA	39
KAPITEL 6 ERSTELLEN VON REFERENZ-PFMEA	67
KAPITEL 7 VERWENDUNG VON REFERENZ-FMEA	75
KAPITEL 8 KONTROLLPLÄNE	91
ANHANG A: LISTE TYPISCHER FEHLERMÖGLICHKEITEN	105
ANHANG B: MUSTER REFERENZ-PFMEA (AUSZÜGE)	109
ANHANG C: BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	115
ANHANG D: AS13004 BEWERTUNGSPRÜFLISTE	121

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wichtige Elemente der Qualitätsvorausplanung	9
Abbildung 2: Rolle der Design-FMEA	10
Abbildung 3: Die Rolle der Prozess-FMEA	12
Abbildung 4: Typische Kontrollstrategien basierend auf dem PFMEA Risikoprofil	13
Abbildung 5: Standardvorlage Kontrollplan	15
Abbildung 6: Quellen für Messfehler	16
Abbildung 7: Simple Die Auswirkungen des GR&R-Resultats auf die Fertigungstoleranz 'Der Unsicherheitsbereich'	17
Abbildung 8: Im Plan liegende Prozesse mit minimaler Abweichung	18
Abbildung 9: Berechnen von Cpk für einen Prozess	19
Abbildung 10: Auswirkungen von Cpk pro Merkmal auf Part Right First Time & Teile pro Million (PPM)	19
Abbildung 11: Beziehung zwischen Cpk, 6 Sigma und Teile pro Million	20
Abbildung 12: PFMEA-Formblatt nach AS13004	23
Abbildung 13: Typische Eingaben in ein PFD	24
Abbildung 14: AS13004 Umfang und Beziehungen	25
Abbildung 15: Typische Eingaben in ein PFD	31
Abbildung 16: Prozessflussdiagramm basierend auf dem Beispiel in AS13004, Bild C3	33
Abbildung 17: Prozessflussdiagramm basierend auf dem Beispiel in AS13004, Bild C4	35
Abbildung 18: Beispiel für eine einfache Merkmalsmatrix (gekürzt)	39
Abbildung 19: Beispiel für eine Prozess-FMEA (gekürzt)	40
Abbildung 20: Effektivität unterschiedlicher Teamgrößen	43
Abbildung 21: Prozessfunktion und Verknüpfung zu Fehlermöglichkeiten in einer PFMEA	47
Abbildung 22: Mögliche Fehlerursachen in einer PFMEA	53
Abbildung 23: RPZ-Bewertungsbeispiel	62
Abbildung 24: RPZ-Verbesserungsmaßnahmen in einer PFMEA	65
Abbildung 25: Veranschaulichung der Entdeckungsbewertung	66
Abbildung 26: Übersicht der Referenz-PFMEA-Elemente	67
Abbildung 27: Referenz-PFMEA für CNC-Lochbohrung: Mögliche Fehlerursachen	71
Abbildung 28: Präventionsmaßnahmen in einer Referenz-PFMEA	72
Abbildung 29: Identifizierung typischer Entdeckungsmaßnahmen in der Referenz-PFMEA	73
Abbildung 30: Beispiel der Datenbankstruktur einer Referenz-PFMEA	76
Abbildung 31: Erstellen einer teilespezifischen „Shell“-PFMEA	77
Abbildung 32: Vervollständigung der Prozessschritt- und Anforderungsspalte	78
Abbildung 33: Beispiel – Lochmuster	79
Abbildung 34: Ermittlung der erforderlichen Referenz-PFMEA	80
Abbildung 35: Zusammenstellen der 'Shell'-Teilenummer-PFMEA mittels der Referenz-PFMEA	81
Abbildung 36: Beispiel einer Referenz-PFMEA	82
Abbildung 37: Vervollständigung der Folgen- und Schweregradbewertung	83

---

Abbildung 38: Vervollständigung der Abschnitte zu potenziellen Ursachen, Präventionsmaßnahmen und Auftretenswahrscheinlichkeit	84
Abbildung 39: Aktualisieren der Entdeckungsmaßnahmen, Entdeckungsbewertung und Berechnen der RPZ	85
Abbildung 40: Dokumentation von Verbesserungsmaßnahmen und Neubewertung der RPZ	86
Abbildung 41: Dokumentation der Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen	91
Abbildung 42: Wie die Prozess-FMEA Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen verwaltet werden	92
Abbildung 43: Typische Einflüsse in einem Produktionslenkungsplan	93
Abbildung 44: Standardvorlage Kontrollplan	94
Abbildung 45: Aufbau des Kontrollplans	99
Abbildung 46: Beispiel eines Produktionslenkungsplans für einen Bohrvorgang	100
Abbildung 47: Kontrollplandaten aus Prozess-FMEA (roter Text)	101

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für relevante Expertise für die Entwicklung der FMEA	27
Tabelle 2: AS13004 Zusätzliche Anwendungshinweise für bereits in der Produktion befindliche Produkte	28
Tabelle 3: Typische Verfahren und Symbole für die Erstellung eines Prozessflussdiagramms	32
Tabelle 4: Beispiele für Fehlermöglichkeiten	49
Tabelle 5: AS13004 Prozess-FMEA Schweregrad-Risikobewertung	52
Tabelle 6: AS13004 Auftretenswahrscheinlichkeit für Prozess-FMEA	59
Tabelle 7: AS13004 Bewertungstabelle für die Entdeckung	61
Tabelle 8: Beispiele für Fehlermöglichkeiten	69
Tabelle 9: Einige Belange bei der Verwendung von Prozess-FMEAs	87
Tabelle 10: Einige Belange bei der Verwendung von Kontrollplänen	102



## Die Aero Engine Supplier Quality Group (AESQ)

Die Ursprünge der AESQ gehen auf das Jahr 2012 zurück. Die Luftfahrtindustrie stand und steht vor vielen Herausforderungen, unter anderem:

- Steigende Nachfrage nach Flugzeugtriebwerken
- Kunden, die mängelfreie Produkte erwarten
- Zunehmend komplexe Inhalte hinsichtlich Triebwerkslieferanten / Partner
- Stärkere globale Ausrichtung
- Markante Änderungen hinsichtlich Qualität, Kosten und Liefererfüllung sind erforderlich

Die Triebwerkshersteller Rolls-Royce, Pratt & Whitney, GE und Snecma (jetzt Safran Aero Engines) haben ein Kooperationsprojekt zur Verbesserung der Lieferkettenleistung ins Leben gerufen.

In Anbetracht der Tatsache, dass sie einen wesentlichen Teil ihrer Lieferkette mit einem oder mehreren anderen Triebwerksherstellern teilten, begann die Gruppe, ihre individuellen Anforderungen in einem einzigen Satz von Standards zu harmonisieren. Ziel war es, die Messlatte für Qualitätsleistung höher zu legen und gleichzeitig die Komplexität von Kundenanforderungen zu verringern.

Diese Zusammenarbeit wurde 2013 im Rahmen des SAE G-22 Technical Committee formalisiert, und zu den Triebwerksherstellern gesellten sich vier große Triebwerkslieferanten: GKN, Honeywell, PCC und Arconic.

### **AESQ Vision**

Festlegung und Aufrechterhaltung eines gemeinsamen Satzes  
von Qualitätsanforderungen, die es der

### **Global Aero Engine Supply Chain**

ermöglichen, durch schlanke, leistungsfähige Prozesse  
und eine Kultur der kontinuierlichen  
Verbesserung  
wirklich wettbewerbsfähig zu sein

Bislang hat die AESQ sechs Standards veröffentlicht:

AS13000 – Problemlösungsanforderungen an Lieferanten (8D)

AS13001 – Schulungsanforderungen hinsichtlich der Überprüfung der Freigabe von delegierten Produkten (Delegated Product Release Verification, DPRV)

AS13002 – Anforderungen an die Entwicklung und Qualifizierung alternativer Prüfhäufigkeitspläne

AS13003 – Anforderungen an Messsystemanalysen für die Lieferkette von Flugtriebwerken

AS13004 Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse und Kontrollpläne

AS13006 Prozesskontrolle

Die AESQ setzt ihre Suche nach weiteren Möglichkeiten fort, die Qualität zu verbessern und Standards zu schaffen, die einen Mehrwert in der gesamten Lieferkette schaffen.

Zulieferfirmen von Triebwerksherstellern können sich über die jährlich stattfindenden regionalen Lieferantenforen oder über die AESQ-Website <http://aesq.saeitc.org/> beteiligen.

## Focus Auf Fehlervermeidung

Prozess-FMEA sind ein wichtiges Mittel zur präventiven Fehlervermeidung und gehören zu den Grundlagen der Produktionsqualitätsvorausplanung (APQP).

APQP besteht aus koordinierten Werkzeugen zur Qualitätssicherung und sorgt dafür, dass die Produkt- und Prozessgestaltung die Anforderungen des Kunden erfüllt. Bei richtiger Implementierung ist APQP eine der effektivsten Methoden zur Gestaltung von Produktionsprozessen nach der Null-Fehler-Strategie.

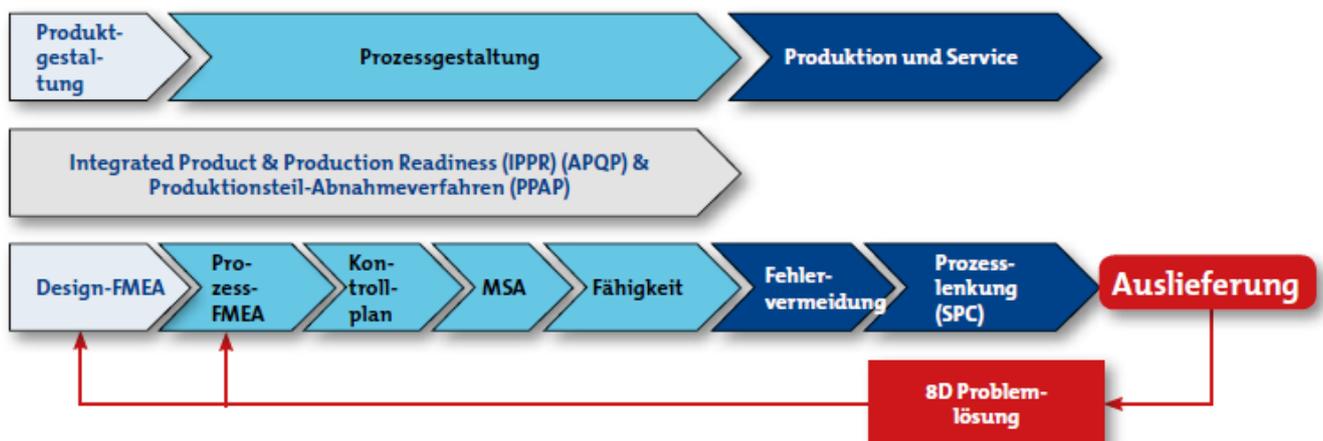
APQP wird in Bezug auf eine bestimmte Teilenummer oder Baugruppe durchgeführt und folgt einer Reihe von Aktivitäten vom Konzeptdesign bis hin zur Fertigungsvalidierung (Produktionsteil- Abnahmeverfahren (Production Part Approval Process - PPAP)).

Zweck dieser Werkzeuge ist es, Fehlerrisiken in der Produkt- und Prozessgestaltung zu einem Zeitpunkt zu identifizieren, an dem Änderungen am Produkt oder am Prozess noch vorgenommen werden können, um so erkannte Probleme zu lösen. Obwohl diese Werkzeuge auch im Nachhinein ihren Wert haben, ist ihre Fähigkeit, das Produkt- oder Prozess-Design zu ändern, um Risiken zu entschärfen, deutlich eingeschränkt.

APQP umfasst eine ganze Reihe von Aktivitäten – die wichtigsten Mittel zur Qualitätssicherung sind in Abbildung 1 dargestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Wirksamkeit dieser Werkzeuge darauf beruht, dass sie als System verwendet werden und nicht als eigenständige Aktivitäten.

Für eine optimale Nutzung dieser Werkzeuge muss eine bereichsübergreifende Teamarbeit gegeben sein, die alle wichtigen Kenntnisse und Erfahrungen über das Produkt und die betreffenden Prozesse umfasst.

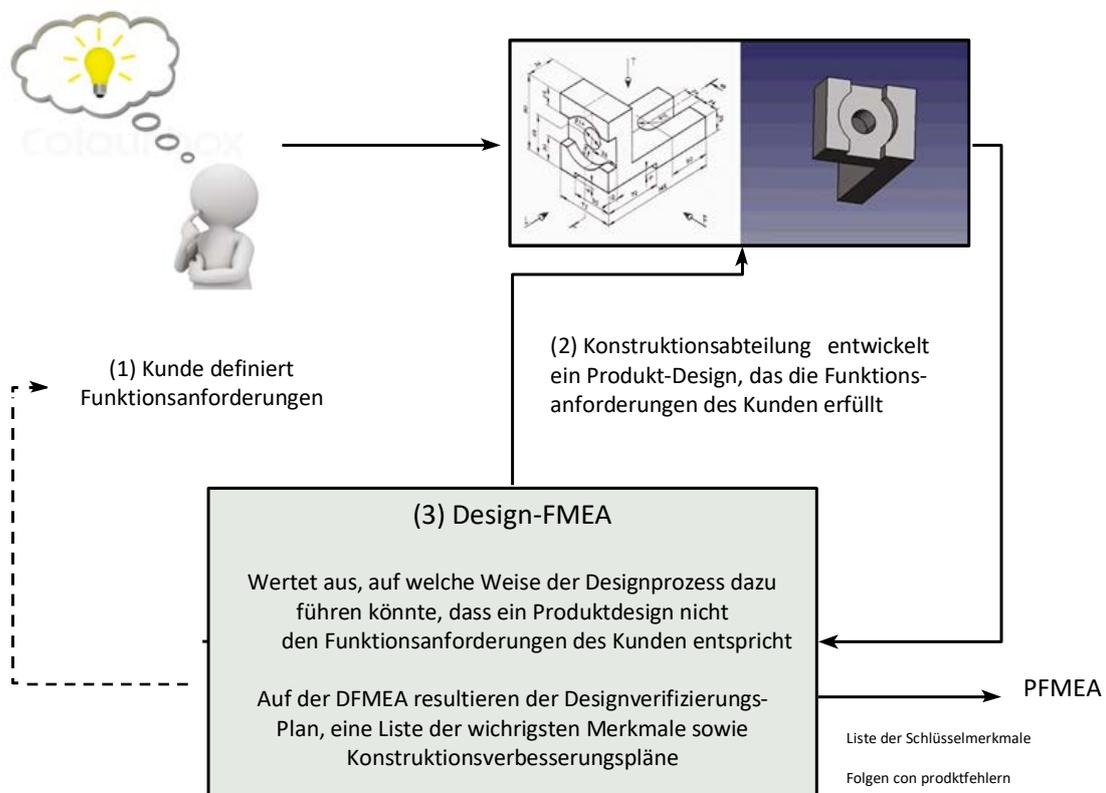
**Abbildung 1: Wichtige Elemente der Qualitätsvorausplanung**



Die folgenden Seiten geben einen Überblick über jedes dieser Qualitätswerkzeuge und wie sie miteinander verknüpft sind.

## Design-FMEA

Abbildung 2: Rolle der Design-FMEA



Die Design-FMEA wertet das vorgeschlagene Design aus, um potenzielle Entwicklungs- und Konstruktionsfehler bezüglich der Funktionsanforderungen des Kunden zu bestimmen und diesen vorzubeugen.

Zum Beispiel kann der Kunde einen Motor mit einem Kraftstoffverbrauch von X spezifizieren. Die Design-FMEA bewertet, aus welchen Gründen das Design diese Anforderung möglicherweise nicht erfüllt. Die Fehlermöglichkeit wäre in diesem Fall „Kraftstoffeffizienz-Spezifikation nicht erfüllt“.

Für eine Rohrleitung könnte die Kundenanforderung z. B. lauten, „Wasser mit 50 Liter pro Sekunde bei einem Druck von 50 bar“ zu leiten. In diesem Beispiel wäre eine Fehlermöglichkeit: „Nicht in der Lage, 50 Liter Wasser pro Sekunde zu leiten“.

In der DFMEA wird dann nach Möglichkeiten gesucht, warum das Design diese Anforderungen nicht erfüllen könnte, d. h. die möglichen Ursachen. Im Beispiel des Rohrs könnte es die Möglichkeit „Spezifizierter Innendurchmesser des Rohrs zu klein“ geben.

Bei der Erstellung einer DFMEA muss das Team davon ausgehen, dass *das Teil ordnungsgemäß hergestellt wird*. Fertigungsfehler, die nicht der Spezifikation entsprechen, dürfen nicht als mögliche Ursachen für Fehlermöglichkeiten aufgeführt werden.

Die DFMEA identifiziert dann Maßnahmen zur Entdeckung und Prävention von Fehlern innerhalb des Entwurfsprozesses, um das Potenzial für einen solchen Designfehler zu minimieren,

z.B. durch Computermodellierung, Prototypenprüfung usw. Diese bilden die Grundlage für das Designverifizierungsprogramm.

Die DFMEA resultiert in einer Liste der bedeutsamsten Risiken (Risikoprioritätszahlen oder RPZ), die das Team während der Designphase nutzt, um das jeweilige Risiko auszuschließen oder zu entschärfen.

Weiterhin identifiziert die Design-FMEA die wichtigsten Designmerkmale, die Auswirkungen auf die Sicherheit bzw. die Leistungsfähigkeit des Produkts für den Kunden haben werden. Informationen aus der DFMEA können auch verwendet werden, um die Prozess-FMEA über die Auswirkungen und Schwere der spezifischen Produktfehlermöglichkeiten zu informieren.

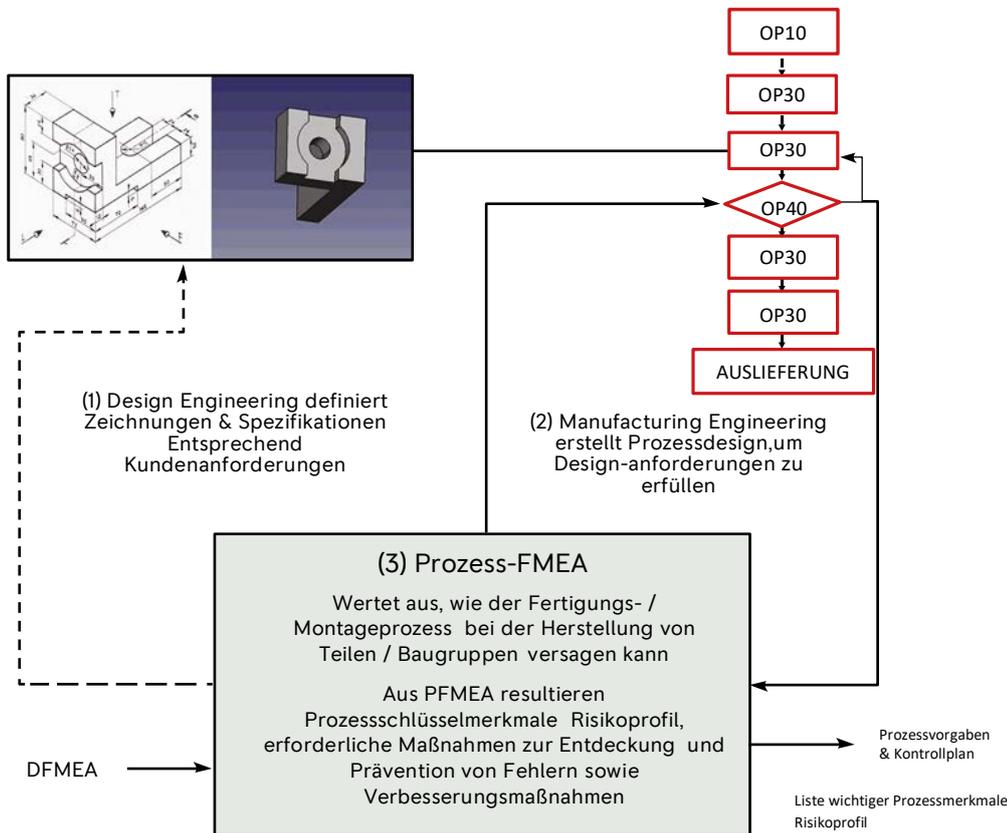
Anzumerken ist jedoch, dass eine einfache Überprüfung der DFMEA beim Erstellen der Prozess-FMEA nicht ausreicht. Zwar hilft die DFMEA dem Konstrukteur, seinen Beitrag zur Erstellung der PFMEA zu leisten, das Team benötigt jedoch auch das technische Wissen des Ingenieurs, um die DFMEA in Bezug auf die PFMEA zu interpretieren.

Wenn keine Design-FMEA zur Verfügung steht, muss das Design Engineering-Team die Prozess-FMEA durch entsprechende technische Fachkenntnisse unterstützen.

## Prozess-FMEA

Nach der Fertigstellung der DFMEA und bevor die technische Spezifikation abgeschlossen ist, gibt es viele Möglichkeiten für die Design- und Manufacturing-Teams zusammenzuarbeiten und durch Prozesse wie „Design for Manufacture und Assembly“ dafür zu sorgen, dass das Design machbar ist und dass aus früheren Lektionen gelernt wurde.

**Abbildung 3: Die Rolle der Prozess-FMEA**



Bei der Planung des vorgeschlagenen Herstellungsprozesses für das Teil bzw. die Baugruppe erstellt das Manufacturing Engineering-Team ein Prozessflussdiagramm und definiert wie und wo die Designmerkmale gefertigt und geprüft werden. Diese Informationen werden in zwei wichtigen Dokumenten erfasst: (a) das Prozessflussdiagramm und (b) die Merkmalsmatrix (oder Montageanleitungen für Montagevorgänge). Diese Dokumente sind der Schlüssel zur Erstellung der Prozess-FMEA.

Die Schritte zur Entwicklung einer Prozess-FMEA werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Die Prozess-FMEA resultiert in einem Risikoprofil aller potenziellen Ursachen für Fehlermöglichkeiten.

Wenn das Risiko vom Team als unannehmbar angesehen wird, darf nicht fortgefahren werden, bis Verbesserungsmaßnahmen identifiziert und umgesetzt sind.

Die sonstige Verwendung des Risikoprofils besteht darin, geeignete Maßnahmen im Fertigungs- oder Montageverfahren zu identifizieren, um die Konformität zu gewährleisten und eine Nichtkonformität möglichst zu verhindern.

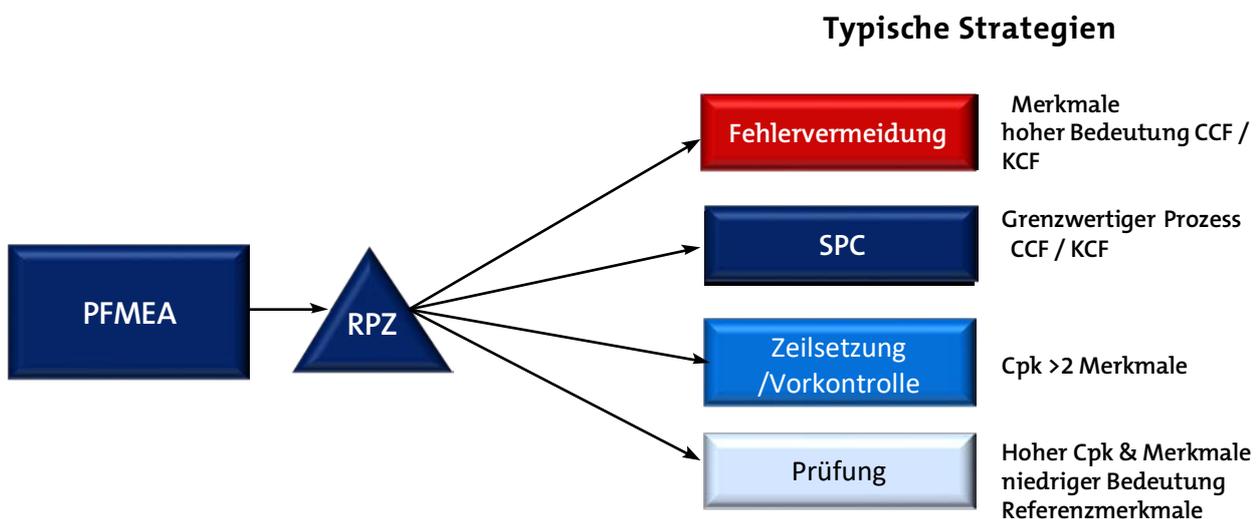
Die im PFMEA identifizierten Präventionsmaßnahmen werden in der Regel als Fehlervermeidungslösungen, Bedienerweisungen, Wartungsanweisungen usw. erfasst. Entdeckungsmaßnahmen aus der PFMEA werden im Kontrollplan erfasst.

Das Risikoprofil ist zudem eine Möglichkeit, laufende Verbesserungsmaßnahmen zu priorisieren.

Die Prozess-FMEA ist ein Wissensmanagementsystem für alles, was wir über den Produktionsprozess für eine bestimmte Teilenummer wissen.

**Abbildung 4: Typische Kontrollstrategien basierend auf dem PFMEA Risikoprofil**

**RPZ und Hierarchie der Prozesskontrolle**



**Kontrollplan**

Für hohe Risiken müssen wir immer versuchen, Fehlervermeidungslösungen zu finden, damit eine Nichtkonformität erst gar nicht entsteht (Idealfall) oder zumindest die Entdeckung der Fehlerart fehlersicher zu machen.

SPC (statistische Prozesskontrolle) sollte für alle wichtigen Merkmale eingesetzt werden, die in der Design-FMEA identifiziert wurden (CCF, KCF, etc.), aber auch für grenzwertige Prozesse. Die Auswertung der SPC in Bezug auf Prozesszielsetzung und Änderungen der Prozess-Stabilität ist erforderlich, um den Prozess zu optimieren und zu verhindern, dass nichtkonforme Teile gefertigt werden.

Für Prozesse, bei denen wir ein hohes Maß an Prozessfähigkeit ( $C_{pk}$  größer als 2) festgestellt haben, sind möglicherweise lediglich Vorkontrollgrenzwerte erforderlich. Vorkontrollgrenzwerte sind leichter zu handhaben als SPC-Regelkarten und basieren nicht auf der Fähigkeit der Prozesse, den Kundenanforderungen gerecht zu werden, sondern sind einfach aus der Engineering-Spezifikation abgeleitet.

In der PFMEA kann es einige Merkmale geben, bei denen das Risiko bzw. der Schweregrad einer Nichtkonformität so gering ist, dass eine periodische Überprüfung ausreicht (z. B. Zugangsöffnungen mit losen Toleranzen). Diese Kontrolle kann durch FAIR- und Produktaudit-Aktivitäten erreicht werden.

Andere Aktivitäten, die sich aus der PFMEA-Analyse ergeben, werden in Arbeits- oder Prozessanweisungen erfasst, z. B. Wartungsbedarf, Sorgfaltspflichten des Bedieners, etc.

## Der Kontrollplan

Der Kontrollplan enthält eine Zusammenfassung aller erforderlichen Produktprüfungen und Prozesskontrollen, die während der Fertigungsphase erforderlich sind, um sicherzustellen, dass das Teil bzw. die Baugruppe mit der Entwurfsabsicht übereinstimmt.

Er soll als wichtige Referenz für den Bediener innerhalb des Prozesses dienen und wird zusammen mit den Arbeits- und Verfahrensanweisungen verwendet.

Der Kontrollplan umfasst:

- Erforderliche Prüfungen (des Produkts oder Prozesses)
- Spezifikation des zu messenden Merkmals
- Ausführung der Prüfung (Gerät/optisch)
- Häufigkeit der Prüfung (jedes Teil/Probenhäufigkeit)
- Erfassung und Analyse der Ergebnisse (Laufzettel/SPC-Diagramm/ etc.)
- Maßnahmen, wenn das Ergebnis nicht innerhalb der festgelegten Grenzwerte liegt (Reaktionsplan)

Jede Produktionsstation sollte neben den Arbeits- und Prozessanweisungen auch den relevanten Teil des Kontrollplans haben.

Kapitel 5 enthält weitere Einzelheiten zur Erstellung und Verwendung eines Produktionslenkungsplans.

### Abbildung 5: Standardvorlage Kontrollplan

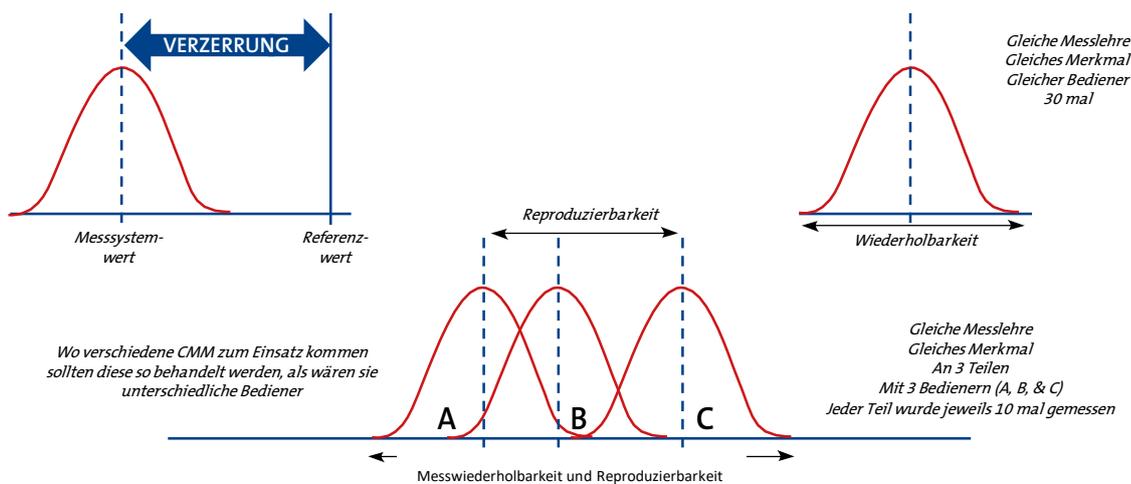
Kontrollplan Nummer			Ansprechpartner / Telefon				Datum (Orig.)		Datum (Rev.)		
Teilnummer / Letzte Änderung Nr.			Kernteam				Technische Freigabe / Datum				
Teilebezeichnung / Beschreibung			Lieferant / Werk / Freigabe / Datum				Qualitätsfreigabe / Datum				
Lieferant / Werk		Lieferantencode	Andere Freigaben / Datum (falls erf.)				Andere Freigaben / Datum (falls erf.)				
Teil / Prozess Nummer	Prozessname / Vorgang Beschreibung	Maschine, Gerät, Vorr., Werkzeug für Herstellung	Merkmale			Produkt/ Prozess Spez./ Toleranz	Methoden			Reaktions- plan	
			Nr.	Produkt	Prozess		Bewertung Mess- methode	Größe	Häufig- keit		Kontroll- methode

## Messsystemanalyse

Sobald wir die Produkt- und Prozessinspektionen über den Kontrollplan festgelegt haben, müssen wir sicherstellen, dass die vorgeschlagene Prüfmethode geeignet ist.

Für variable Messungen verwenden wir (zumindest) Messwiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit (Gauge Repeatability and Reproducibility - GR&R) und für visuelle oder Attributinspektionen verwenden wir Attribute Agreement Analysis (AAA).

### Abbildung 6: Quellen für Messfehler



Diese Fähigkeitsanalysen müssen anhand der eigentlichen Teilenummer (und nicht gegenüber anderen ähnlichen Teilen) validiert werden. Es kann subtile Einflüsse aufgrund der Teilegeometrie geben, die das Ergebnis beeinflussen und die tatsächliche Messfähigkeit bestimmen.

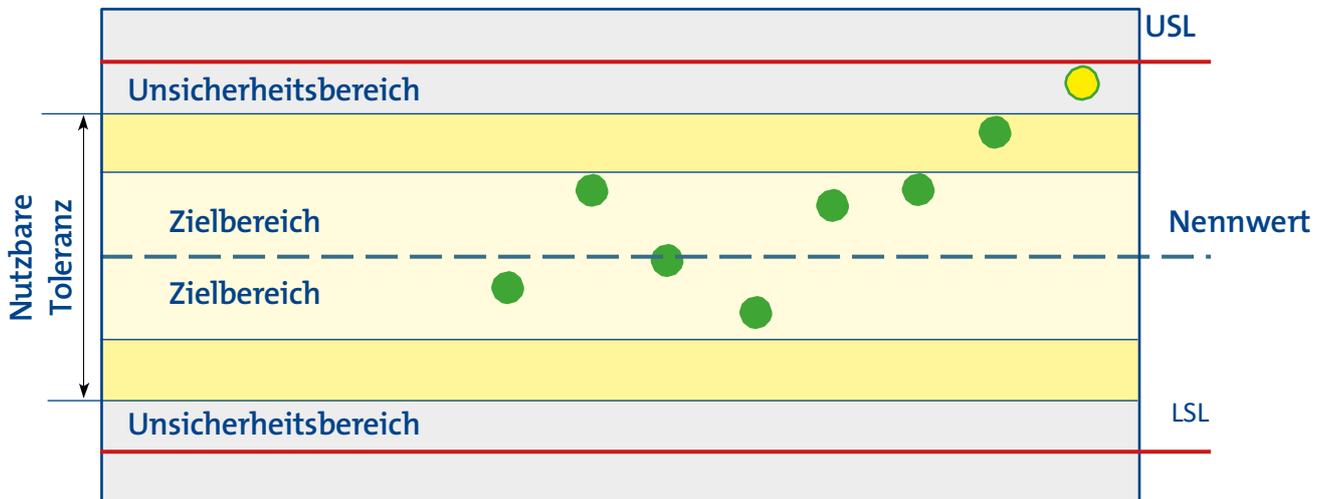
Diese Analysen müssen repräsentativ für reale Produktionsbedingungen sein (Umwelt, Zykluszeit, verschiedene Bediener usw.). Das Ziel ist es, alle Variationen zu erfassen und nicht einfach einen Test zu bestehen.

Ein häufiger Fehler besteht darin, dass die Analyse unter kontrollierten Bedingungen ausgeführt wird, so dass die typischen Fehlerquellen minimiert werden (bester Bediener, kein Zeitdruck usw.). Dadurch wird das Ergebnis der Analyse ungültig.

Die Ergebnisse aus der GR&R-Analyse sollten verwendet werden, um die Fertigungstoleranzen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit zu reduzieren. Wenn z. B. ein GR&R-Wert von 20 % vorliegt, sollte die Fertigungstoleranz für das zu messende Merkmal um 20 % reduziert werden.

Diese Prozessreduktion ist beschrieben in: AIAG Measurement Systems Analysis Manual und in ISO 14253-1:2013 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Einhaltung oder Nichteinhaltung der Spezifikationen.

**Abbildung 7: Die Auswirkungen des GR&R-Resultats auf die Fertigungstoleranz 'Der Unsicherheitsbereich'**



Jeder Messwert innerhalb der Spezifikation und des Unsicherheitsbereichs verweist definitiv auf ein gutes Teil (gelber Bereich).

Jeder Messwert außerhalb der Spezifikation und des Unsicherheitsbereichs verweist definitiv auf ein schlechtes Teil.

Der Unsicherheitsbereich weist darauf hin, dass jeder Messwert, der in dieser Zone liegt, in Wirklichkeit nicht konform sein kann, obwohl das Teil irrtümlich als gutes Teil gemessen wurde. Ein Messwert, der soeben außerhalb der Toleranz, aber im Unsicherheitsbereich liegt, kann gut sein, das Teil wurde aber aufgrund des Messfehlers als schlechtes Teil bewertet.

## Erste Fähigkeits- & Prozesskontrolle

Sobald wir wissen, was zu untersuchen ist und festgestellt haben, dass die Prüfmethode dazu geeignet ist, können wir beginnen, Daten von Serienteilen zu sammeln, um die Prozessfähigkeit des Prozesses zu bestimmen.

Dies kann für variable Messmerkmale mit Cpk und für Attributeigenschaften mit Defekte pro einer Million Möglichkeiten (Defects per Millions Opportunities - DPMO) erfolgen.

Stichprobengrößen für eine sinnvolle statistische Analyse können im Aerospace-Umfeld oft ein Problem sein, es gibt jedoch Möglichkeiten, wie wir Daten unserer Produktionsteile verwenden können.

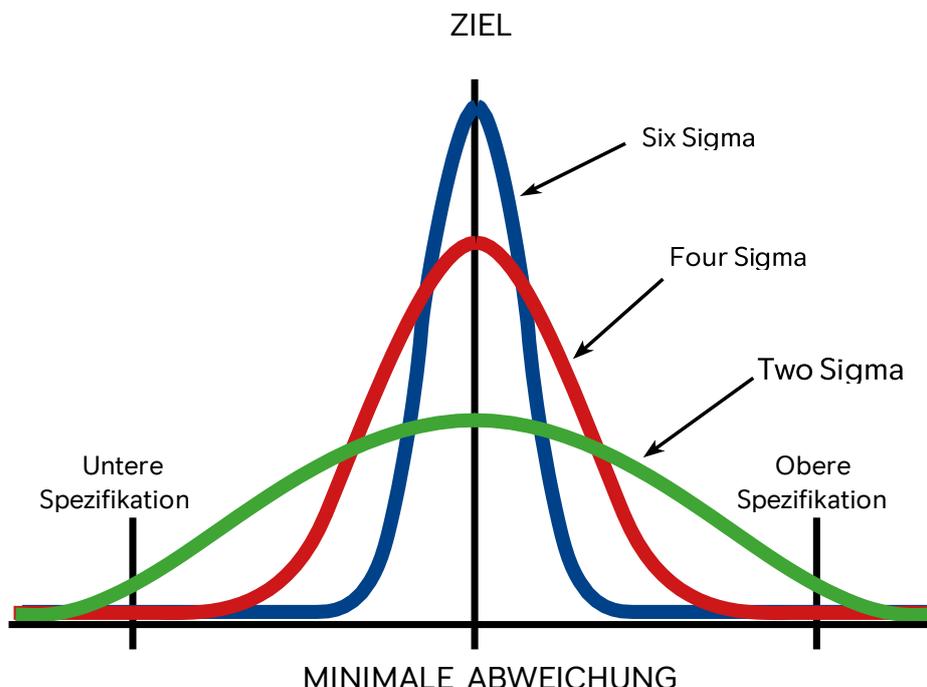
Zum Beispiel können wir SPC-Diagramme aus Kleinserien verwenden, um den durchschnittlichen Fehler für eine Reihe von Merkmalen zu bestimmen und so einen Hinweis auf Cpk zu erhalten.

Zudem erstellen einige Werkzeuge eine Reihe von identischen Merkmalen auf einem Teil, sodass wir Messwerte aus einem größeren Datensatz erhalten.

In der Produktion müssen wir sicherstellen, dass unsere Prozesse ON TARGET sind (im mittleren Drittel der Toleranz) und dass geänderte Prozesseinstellungen und Trends erkannt werden, bevor nichtkonforme Teile resultieren. Dies hat einen großen Einfluss auf die Entwicklung von Prozesskontrollplänen.

In einer Null-Fehler-Umgebung müssen wir bestrebt sein, eine Prozessfähigkeit mit einem Cpk-Wert über 2 (Six Sigma) zu erhalten.

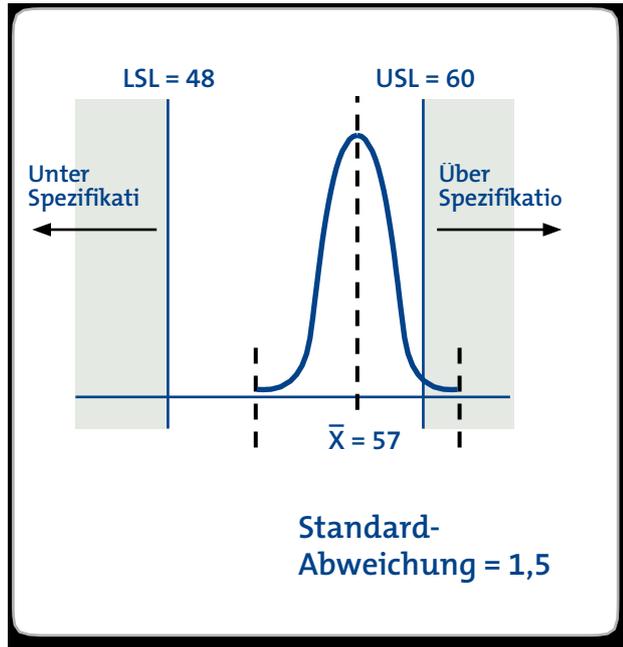
### Abbildung 8: Im Plan liegende Prozesse mit minimaler Abweichung



**Abbildung 9: Berechnen von Cpk für einen Prozess**

Berechnung von Cpk

- Cpk =  $\min\left(\frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}\right)$
- Durch Zentrierung des Prozesses ohne Verringerung der Variabilität könnte Cpk auf ein Maximum von 1,33 (Cp) gesteigert werden
- Weitere Verbesserungen erfordern eine Verringerung der Prozessvariabilität
- Das Ziel ist Cpk  $\geq 2$



Für komplexe Produkte mit vielen Merkmalen ist der Einfluss von Cpk für jedes Merkmal hoch. Abbildung 10 zeigt, wie die Teile pro Million (PPM) oder Right First Time % (RFT%) durch Cpk-Werte von 1,33 1,67 und 2 beeinflusst werden. In der Automobilindustrie liegt der Mindestwert für Cpk jetzt bei 2.

**Abbildung 10: Auswirkungen von Cpk pro Merkmal auf Part Right First Time & Teile pro Million (PPM)**



Abbildung 11 zeigt einen ausführlicheren Vergleich des Zusammenhangs zwischen Cpk-Werten und PPM. Wichtig ist die Spalte ganz rechts. Sie zeigt die Teile pro Million Defekte, wenn der Prozess um plus oder minus 1,5 Standardabweichungen vom Nennwert (mittleres Drittel der Kontrollgrenzen) variieren dürfte. Dies ist eine realistischere Berechnung, da die meisten Prozesse bis zu einem gewissen Grad während der Produktion um den Nennwert variieren.

**Abbildung 11: Beziehung zwischen Cpk, 6 Sigma und Teile pro Million**

Cpk, PPM und "Six Sigma"						
Cpk (Definiert als Differenz zwischen Prozessmittelwert und nächster Spez., geteilt durch 3 Standardabweichungen)	"Wie viele Sigma-Fähigkeiten?" Differenz zwischen Prozessmittelwert und Spezifikationsgrenze in Standardabweichungen"	Innerhalb Spez. (Prozess perfekt zentriert, beide Enden berücksichtigt) Gute Einheiten pro Million	PPM der Glockenkurve Außerhalb Spez. (Prozess perfekt zentriert, beide Enden berücksichtigt)	PPM der Glockenkurve Außerhalb Spez. (Prozess nicht zentriert, nur ein Ende berücksichtigt)	Die Spalte LINKS entspricht 1 Defekt von wie vielen insgesamt?	PPM der Glockenkurve Außerhalb Spez. mit Six-Sigma-Philosophie von 1,5 Standardabweichungs korrektur für zu erwartende ungünstige mittlere Abweichung des Prozesses
0	0	0	1,000,000	500,000	2	
0.17	0.5	382,925	617,075	308,538	3	
0.33	1	682,689	317,311	158,655	6	
0.5	1.5	866,386	133,614	66,807	15	500,000
0.67	2	954,500	45,500	22,750	44	308,538
0.83	2.5	987,581	12,419	6,210	161	158,655
1	3	997,300	2,700	1,350	741	66,807
1.17	3.5	999,535	465	233	4,299	22,750
1.33	4	999,937	63	32	31,574	6,210
1.5	4.5	999,993.2	6.8	3.4	294,319	1,350
1.67	5	999,999.4	0.6	0.3	3,488,556	233
1.83	5.5	999.999.96	0.04	0.02	52,660,508	32
2	6	999,999.998	0.002	0.001	1,013,594,613	3.4
2.17	6.5	999,999.99992	0.00008	0.00004	24,900,418,127	0.3

# Kapitel 1

## Einführung in die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Mode und Effects Analysis – FMEA) zusammen mit dem Kontrollplan sind ein zentrales Mittel zur präventiven Fehlervermeidung. Umso schwieriger kann es sein, solche Maßnahmen effektiv zu implementieren, da nicht nur technisches Wissen und Erfahrung, sondern auch präzise Sprache und die richtige Detailebene gefordert sind.

Zweck dieses Leitfadens ist es, dem Unternehmen zu helfen, die wichtigsten Erfolgsfaktoren und Problempunkte bei der Erstellung effektiver Prozess-FMEA (PFMEA) sowie der zugehörigen Produktionslenkungspläne zu verstehen.

Dieser Praxisleitfaden beschreibt Schritt für Schritt den Prozess zur Entwicklung einer teilespezifischen Prozess-FMEA mittels vordefinierter Referenz-PFMEA-Bausteine.

Der in dieser Anleitung beschriebene Ansatz orientiert sich an den AIAG-Handbüchern „Potential Failure Mode & Effects Analysis (PFMEA), 4th Edition“ und „Advanced Product Quality Planning & Control Plans (APQP), 2nd Edition“.

Darüber hinaus unterstützt es den im August 2017 veröffentlichten und nun von Rolls-Royce, GE, Pratt & Whitney und Safran geforderten Aero Engine Supplier Quality (AESQ) Standard AS13004 Process FMEA & Control Plans.

Damit die Prozess-FMEA und die Kontrollpläne *effektiv* sind, müssen folgende Regeln eingehalten werden:

- Sie müssen teilenummerspezifisch sein.
- Die PFMEA muss *alle* Konstruktionsmerkmale und Besonderheiten der Zeichnung und der zugehörigen Spezifikationen berücksichtigen.
- Die PFMEA muss alle Prozessschritte vom Eingang bis zum Versand enthalten, bei denen das Produkt (beabsichtigt oder unbeabsichtigt) umgewandelt wird.
- Im Rahmen der PFMEA und des Kontrollplans müssen Verbesserungsmaßnahmen für Risiken mit schwerwiegenden Folgen und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit identifiziert und umgesetzt werden.
- Das PFMEA-Formblatt muss dem AS13004-Standard entsprechend definiert sein (siehe Abbildung 1). Unter keinen Umständen darf diese Standardvorlage Abweichungen, z. B. in Form von zusätzlichen Spalten usw. enthalten.

Um sicherzustellen, dass die PFMEA und die Kontrollpläne *effizient* sind, müssen die folgenden Richtlinien eingehalten werden:

- Teilenummer-PFMEA sollten mittels standardmäßiger Referenz-PFMEA entwickelt werden. Nur so können Best-Practice-Lösungen bei allen neuen PFMEA geteilt werden. Dies ist der effizienteste Weg, um unnötige Doppelarbeit zu vermeiden.

- Referenz-PFMEA und Teilenummer-PFMEA sollten in einem speziellen FMEA-Software-Tool erstellt werden, das die Komplexität und das Datenvolumen aller Teilenummern verwalten kann. Es gibt viele Standard-FMEA-Softwarelösungen, darunter einige die auch den Produktionslenkungsplan erstellen.
- Die Referenz-PFMEA müssen von einer hierzu ernannten Stelle betreut werden, um Einheitlichkeit und Versionskontrolle zu gewährleisten.
- Wenn keine definierten Referenz-PFMEA vorhanden sind, dann muss das Team diese zuerst entwickeln und dann den anderen Teilen des Unternehmens über die Standard-FMEA-Software zur Verfügung stellen.
- Es muss darauf geachtet werden, dass bei der Entwicklung von Referenz-PFMEA im gesamten Unternehmen keine Duplizierung stattfindet.
- Es sollte ein Programm zur kontinuierlichen Aktualisierung der PFMEAs und zur Reduzierung der Gesamtprozessrisiken geben.

Das Unternehmen muss eine Gruppe von Ingenieuren bilden, die in FMEA und den jeweiligen FMEA- Softwareprogrammen geschult sind, um den Prozess zu unterstützen. HINWEIS: Referenz-FMEA können auch als „Einheiten-FMEA“ oder „Standard-FMEA“ bezeichnet werden.

Dieser Leitfaden beschreibt auch die Erstellung des Produktionslenkungsplans aus den teilespezifischen Informationen zu Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen, die in der Prozess- FMEA enthalten sind (nicht teilespezifische Maßnahmen können in anderen Dokumenten wie Wartungsplänen oder Asset Care Anforderungen enthalten sein).

Der Kontrollplan ist ein teilespezifisches Schlüsseldokument, das die Methoden zur Verwaltung des Prozesses definiert, um sicherzustellen, dass das Produkt konform ist.

Es ist vom Bediener

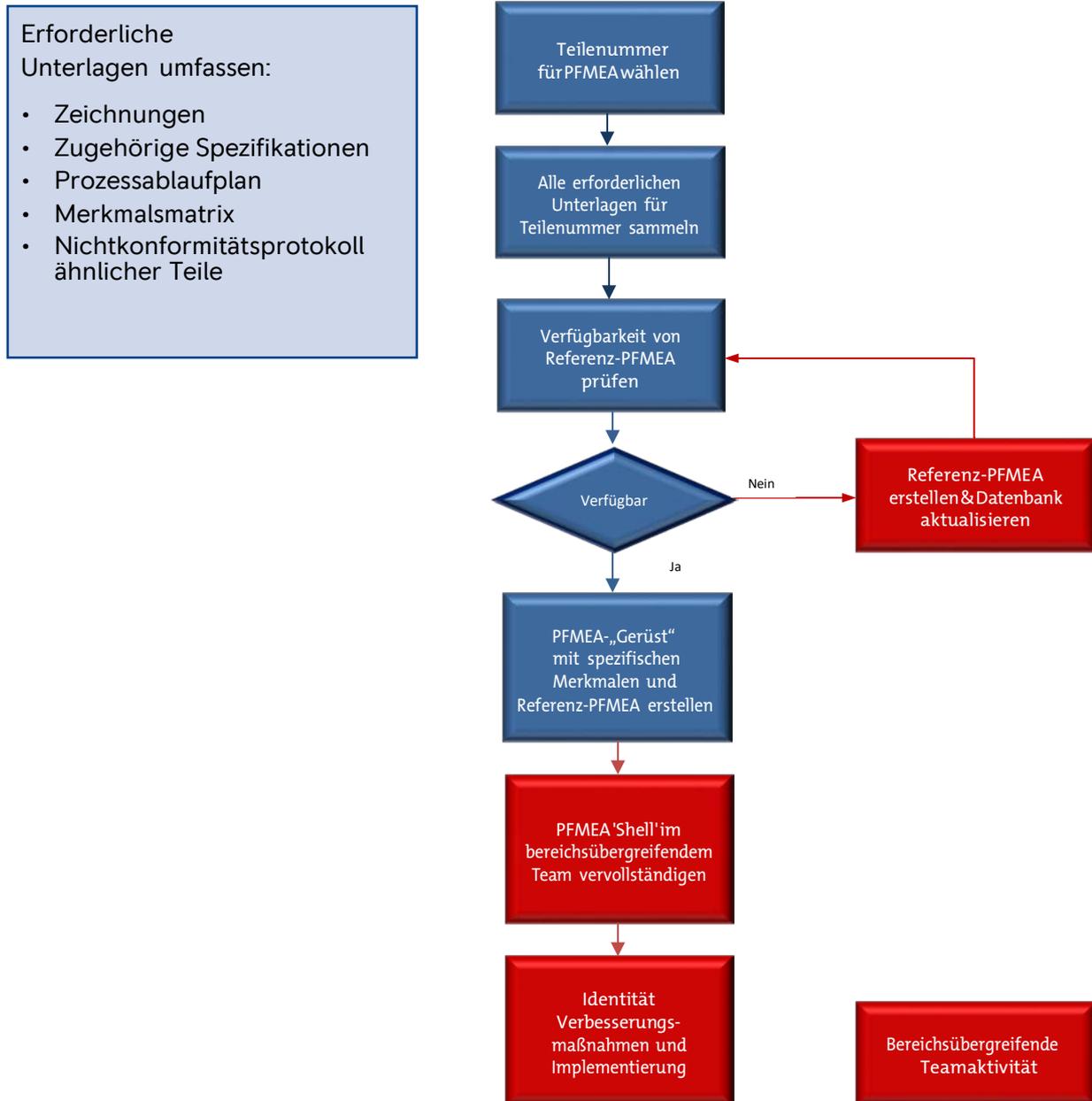
zusammen mit den Arbeitsanweisungen zu verwenden und sollte bei der Herstellung oder Montage herangezogen werden, um sicherzustellen, dass die richtigen Maßnahmen durchgeführt wurden.

Der Produktionslenkungsplan ist ein Live-Dokument und wird regelmäßig überprüft und aktualisiert.



Eine Übersicht über den Prozess zur Entwicklung teilespezifischer PFMEA ist in Abbildung 13 dargestellt und wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

**Abbildung 13: Entwicklung teilespezifischer PFMEA mittels Referenz-PFMEA**



# Kapitel 2

## AS13004 – Übersicht

AS13004 wurde 2017 veröffentlicht und sofort von den Herstellern von Flugtriebwerken übernommen.

Von allen bisher von der AESQ entwickelten Standards war dies derjenige, der von jedem Mitgliedsunternehmen die größten Änderungen verlangte. Keines der AESQ-Mitglieder brachte den Standard jedoch genau so zur Anwendung, wie in AS13004 beschrieben. Es wurde aber anerkannt, dass ein anderer Ansatz erforderlich war, um die von der Industrie geforderten markanten Änderungen hinsichtlich Qualitätsleistung zu schaffen.

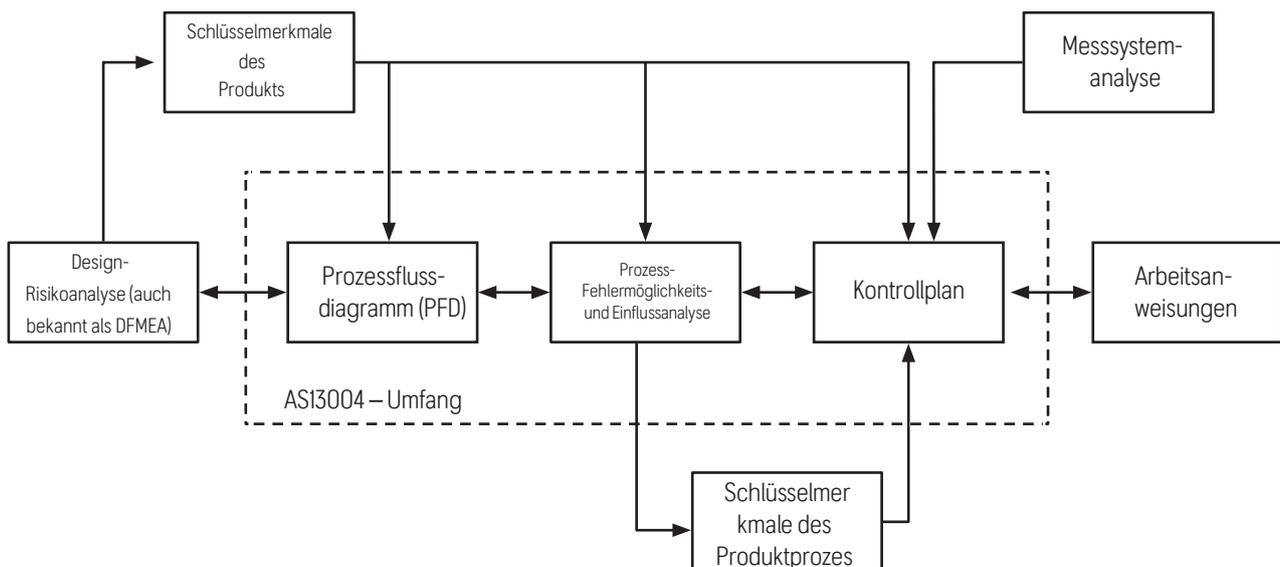
AS13004 ist verstärkt an den Ansatz zur Anwendung solcher Standards in der Automobilindustrie angelehnt, wobei der Schwerpunkt vorrangig auf der Vermeidung von Produktabweichungen liegt.

Infolge dieser neuen Ausrichtung und um einen Konsens zu erzielen, beinhaltet der Standard einige Bereiche, die einer zusätzlichen Interpretation und Anleitung bedürfen. Das ist der Zweck dieses Buches.

Der Standard erlaubt es, zahlreiche Anforderungen durch „sofern nicht vom Kunden genehmigt“ oder „falls vom Kunden spezifiziert“ zu umgehen. Ich werde versuchen, einen Fall für den effektivsten und effizientesten Ansatz zur Umsetzung dieses Standards vorzustellen.

Der Standard beinhaltet derzeit drei wichtige, miteinander verknüpfte Instrumente für die Produktionsqualitätsvorausplanung (APQP): Prozessflussdiagramme (PFD), die Prozess-FMEA und Kontrollpläne (Produktionslenkungspläne). Abbildung 14 veranschaulicht den Umfang und die Beziehungen dieses Standards zu anderen APQP-Elementen.

**Abbildung 14: AS13004 Umfang und Beziehungen**



Es wurde vielfach darauf hingewiesen, dass es noch besser gewesen wäre, wenn die Design-FMEA in AS13004 integriert worden wäre. Das ist richtig.

Leider stehen zu diesem Zeitpunkt Designthemen für AESQ außer Frage.

Nichtsdestoweniger werde ich in dieses Buch ein Kapitel über die DFMEA einfügen, um die Unterschiede und wichtigsten Verbindungen zur PFMEA aufzuzeigen.

### **Funktionsübergreifende Teamarbeit (Abschnitt 4.1.1)**

Der Standard legt einen klaren Schwerpunkt darauf, dass diese Instrumente von einem funktionsübergreifenden Team ergänzt werden müssen und bietet eine Liste der Funktionen, die für die erfolgreiche Anwendung des Prozesses entscheidend sind. Von den Teammitgliedern sind alle Bereiche abzudecken, die von den Ergebnissen der FMEA betroffen sind.

Dazu gehören beispielsweise Fertigungsingenieure, Prozessplaner, Konstrukteure, Qualitätsingenieure, Prozessbetreiber, Inspektoren und Wartungsingenieure. Das Team sollte auch über Erfahrungen in der Moderation (Gruppenarbeit) / Prozessbegleitung und Kenntnisse des FMEA-Prozesses verfügen.

In bestimmten Phasen der Fertigstellung der PFMEA kann dann auch zusätzliches Know-how von Komponentenlieferanten, Ausrüstungslieferanten und Materialfachleuten von Vorteil sein. Tabelle 1 zeigt einige Beispiele für die Darstellungsarten, die in den verschiedenen Phasen der FMEA-Entwicklung nützlich sein können.

Nicht alle Teammitglieder müssen an allen Teambesprechungen teilnehmen, denn dies wäre nicht praktikabel. Stattdessen ist es notwendig, dass einige dieser Vertreter spezifischen Input zu Fragen liefern, die vom Team während der FMEA-Entwicklung aufgeworfen wurden. Sie können auch in die Begutachtung der Ergebnisse der FMEA-Gruppe einbezogen werden, um zu überprüfen, ob etwas ausgelassen wurde.

**Tabelle 1: Beispiele für relevante Expertise für die Entwicklung der FMEA**

FMEA-Phase	Relevante Expertise
Funktionen, Anforderungen und Erwartungen	Kunden, Programmmanagement, Servicebetrieb, Produktsicherheit, Fertigung, Montage, Verpackung, Logistik, Materialien
Fehlermöglichkeit	Kunden, Programmmanagement, Design, Produktsicherheit, Fertigung, Montage, Qualität, Verpackung, Logistik, Materialien, betriebliche Abläufe
Auswirkungen und Folgen eines Fehlers	Kunden, Programmmanagement, Design, Produktsicherheit, Fertigung, Montage, Qualität, Verpackung, Logistik, Materialien, betriebliche Abläufe
Ursachen für Fehlermöglichkeiten	Kunden, Fertigung, Montage, Qualität, Verpackung, Logistik, Materialien, Instandhaltung, Ausrüstungshersteller
Häufigkeit des Auftretens eines möglichen Fehlers	Kunden, Fertigung, Montage, Qualität, Verpackung, Logistik, Materialien, Instandhaltung, Ausrüstungshersteller
Anwendung aktueller Kontrollen – Prävention	Fertigung, Montage, Qualität, Verpackung, Logistik, Materialien, Instandhaltung, Ausrüstungshersteller
Anwendung aktueller Kontrollen – Erkennung	Kunden, Fertigung, Montage, Qualität, Verpackung, Logistik, Materialien, Instandhaltung
Empfohlene Maßnahmen	Kunden, Programmmanagement, Design, Produktsicherheit, Fertigung, Montage, Qualität, Instandhaltung, Ausrüstungshersteller, Verpackung, Logistik, Materialien, betriebliche Abläufe

**Anwendbarkeit von AS13004 (Abschnitt 4.2)**

AS13004 definiert die Anwendbarkeit dieses Standards vorwiegend auf die Einführung neuer Produkte (New Product Introduction). Prozessflussdiagramme (PFDs), Prozess-FMEA und Kontrollpläne sind eine Schlüsselanforderung in der Produktionsqualitätsvorausplanung (APQP) und im Produktionsteilabnahmeverfahren (PPAP) nach AS9145.

Wenn vom Kunden so gefordert, ist dieser Standard unter den folgenden Umständen auf Teilenummern in der laufenden Produktion anzuwenden:

**Tabelle 2: AS13004 Zusätzliche Anwendungshinweise für bereits in der Produktion befindliche Produkte**

Vorgang	Erläuterung
Änderungen aufgrund von Ursachenforschung	Erkennung eines unbekanntes Fehlerzustandes nach einem betrieblichen Problem, mangelhafter Produktqualität, eines größeren Qualitätsproblems oder eines Fertigungsproblems
Prozessänderungen	Eine Änderung des Materials, des Verfahrens und/oder der Messtechnik, die sich möglicherweise auf Form, Passform oder Funktion auswirken kann
Designänderungen	Änderung der Konstruktionsunterlagen, einschließlich der Hinzufügung neuer Hauptmerkmale (KCs)
Normteile / Handelsübliche Massenware (COTS)	Dieser Standard wird nicht auf die Herstellung von Normteilen und/oder handelsüblicher Massenware angewendet, es sei denn, der Kunde hat dies gewünscht.

Nach der Anwendung muss die FMEA über den gesamten Lebenszyklus des Produkts geführt werden (Abschnitt 4.2.3).

Für viele Produkte in der Luftfahrt kann der Lebenszyklus 20 bis 30 Jahre betragen. Daher muss unbedingt gewährleistet sein, dass die im Dokument verwendete Sprache und Beschreibung von denen verstanden wird, die es in 10, 20 oder sogar 30 Jahren lesen werden. Wir sollten jede Form von „technischen Abkürzungen“ vermeiden.

Die Anforderungen von AS13004 sollten von der Organisation an alle Lieferanten, die Produkte und Dienstleistungen herstellen und/oder liefern, weitergegeben werden (Abschnitt 4.2.4).

Um diese Vorgabe zu erfüllen, muss die Organisation über einen dokumentierten Prozess verfügen, um diese Anforderung an ihre Lieferanten weiterzugeben, in einigen Fällen auch darüber hinaus. Im Laufe der Zeit wird erwartet, dass sie über Nachweise dafür verfügen, dass dies geschehen ist.

### Training und Kompetenz (Abschnitt 4.3)

Die betreffenden Personen müssen hinsichtlich des Ansatzes an die PFMEA und den Kontrollplan entsprechend geschult werden. Insbesondere zu den technischen Ressourcen, schließlich ist dies eine ingenieurwissenschaftliche Disziplin. Die Organisation sollte auch in Betracht ziehen, FMEA-Moderatoren schulen zu lassen, die dem Team helfen können, die FMEA-Veranstaltungen durchzuführen.

Effektive FMEA-Sitzungen sind schwer zu erreichen. Sie müssen „kreativ“ sein, zugleich aber auch auf die technischen Inhalte, Teamdynamik, Energieniveaus etc. eingehen und sicherstellen, dass der FMEA-Prozess befolgt wird. Es ist wichtig, dass solche Sitzungen von einem Moderator geleitet werden, während die technischen Ressourcen auf ihren Input ausgerichtet sein sollten.

Wir dürfen nicht vergessen, dass die Leitung der Organisation den Ansatz an das Fehlervermeidungssystem und insbesondere die FMEA verstehen muss. Sie muss die Zuweisung von Ressourcen (Menschen und Zeit) unterstützen, um die Aktivität

erfolgreich zu gestalten. Führungskräfte-Training und Coaching sollten als eine notwendige Maßnahme betrachtet werden, um diesen Standard erfolgreich einzuführen.

Es gibt viele Quellen für Schulungen und Beratung im Bereich FMEA auf dem freien Markt, vor allem als Folge der letzten 30 Jahre, in denen die Automobilindustrie PFMEAs von ihren Lieferanten verlangte.

Bei der Auswahl dieser Anbieter ist jedoch Umsicht geboten. Stellen Sie sicher, dass der Anbieter sein Training so angepasst hat, dass es der Absicht dieses Standards entspricht, und dass nicht nur ein allgemeiner FMEA-Kurs angeboten wird. Es gibt einige hervorzuhebende Eckpunkte in AS13004, die in einem allgemeineren Ansatz nicht unbedingt offensichtlich sind. Eine Liste der anerkannten Schulungsanbieter ist auf der AESQ-Website verfügbar.

Es gilt auch Folgendes zu beachten: Obwohl das AS13004-Autorenteam seinen Ansatz auf die 4. Ausgabe des AIAG FMEA Guidebook ausgerichtet hat, entwickelt die Automobilindustrie ihren Ansatz an die FMEA weiter und könnte in den kommenden Jahren andere Anforderungen haben als die in AS13004 angegebenen. Von Ihnen ist sicherzustellen, dass der von Ihnen gewählte FMEA-Kurs den Anforderungen von AS13004 entspricht.

Der Lehrplan muss die Verwendung von PFD, PFMEA und Kontrollplänen beinhalten, sollte aber auch die Verknüpfungen zur DFMEA enthalten. Einige der verfügbaren Kurse beinhalten auch die Verwendung von Referenz-PFMEAs.

Von der Organisation sind die Mindestanforderungen an die Schulung und Kompetenzen für die Durchführung von PFDs, PFMEAs und Kontrollplänen zu dokumentieren und sie hat sicherzustellen, dass nur diejenigen Teammitglieder an der Durchführung beteiligt sind, die diese Kriterien erfüllen.

#### **Anforderungen an das Qualitätssicherungssystem der Organisation (Abschnitt 4.4)**

AS13004 verlangt von Organisationen, dass sie innerhalb ihres dokumentierten Managementsystems einen definierten Prozess haben, der zeigt, wie das Unternehmen die Anforderungen dieses Standards erfüllen wird.

Wenn ein alternativer Ansatz zu dem in AS13004 beschriebenen verwendet werden soll, muss dieser zunächst von dem/den betroffenen Kunden genehmigt werden.

Es wird erwartet, dass dieser dokumentierte Prozess in den Umfang des 3rd Party Certification (ISO9001 oder AS9100) Audits einbezogen wird, ebenso wie das interne Auditprogramm der Organisation, um eine Gewissheit über den Grad der Konformität und Wirksamkeit zu geben.

Der Standard verpflichtet die Organisation dazu, diesen vollständig umzusetzen und zu gewährleisten, dass er regelmäßig bewertet wird. Eine Bewertungsprüfliste zur Beurteilung der Konformität ist im Standard und auf der AESQ-Website enthalten (siehe Anhang D).

#### **Allgemeine Anforderungen (Abschnitt 4.5)**

Wie bei allen APQP Defect Prevention Tools (Fehlervermeidungsinstrumenten) der Fall, müssen diese auf einer bestimmten Teilenummernebene eingesetzt werden, wenn sie wirklich effektiv sein sollen. Dies könnte für einige Unternehmen, die derzeit einen generischen Ansatz oder Ansätze an Teilefamilien verfolgen, eine große Veränderung bedeuten.

In einer Branche, in der wir mit den Folgen eines unzureichenden Produkt- und

---

Prozessdesigns über 20 bis 30 Jahre oder länger zu kämpfen haben, gibt es jedoch ein klares Geschäftsszenario, diese Prozesse konsequent in der Design- und Entwicklungsphase anzuwenden. Unter bestimmten Umständen kann der Kunde einen dokumentierten Verzicht auf diese Anforderung vorsehen.

PFD, PFMEA und Kontrollpläne müssen auf dem neuesten Stand gehalten werden und sollten in regelmäßigen Abständen anhand der Ergebnisse von Qualitätsuntersuchungen, Qualitätsleistungsdaten, Produkt- und Prozessänderungen, Erfahrungen mit ähnlichen Produkten und Prozessen etc. überarbeitet werden.

Die Instrumente, im Besonderen die PFMEA, sind unsere Drehscheibe für das Wissensmanagement. Sie stellt alles dar, was wir über die Herstellung des Produkts und die erforderlichen Kontrollen zur Vermeidung von Normabweichungen wissen. Nachdem sie erstellt wurde, ist sie das wichtigste Dokument, das wir für das Management von Qualität und Qualitätsrisiken haben.

Wenn in AS13004 von der Design-Risikoanalyse die Rede ist, so bezieht sich das auf die Design-FMEA o. ä. (siehe Kapitel 2). Wie wir sehen werden, gibt es eine eindeutige Verbindung zwischen der DFMEA und PFMEA bei der Bewertung der potenziellen Auswirkungen und des Schweregrads der identifizierten Schadensbilder. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht unbedingt so explizit, wie es einige vielleicht erwarten.

PFD, PFMEA und Kontrollplan sollten eindeutig miteinander verknüpft sein, um deren einfache Lesbarkeit zu gewährleisten. Ein Beispiel dafür ist ein einheitliches Vorgangsnummerierungs-, Sequenzierungsreferenz- und Merkmalsnummerierungssystem, das eine klare Lesbarkeit ermöglicht.

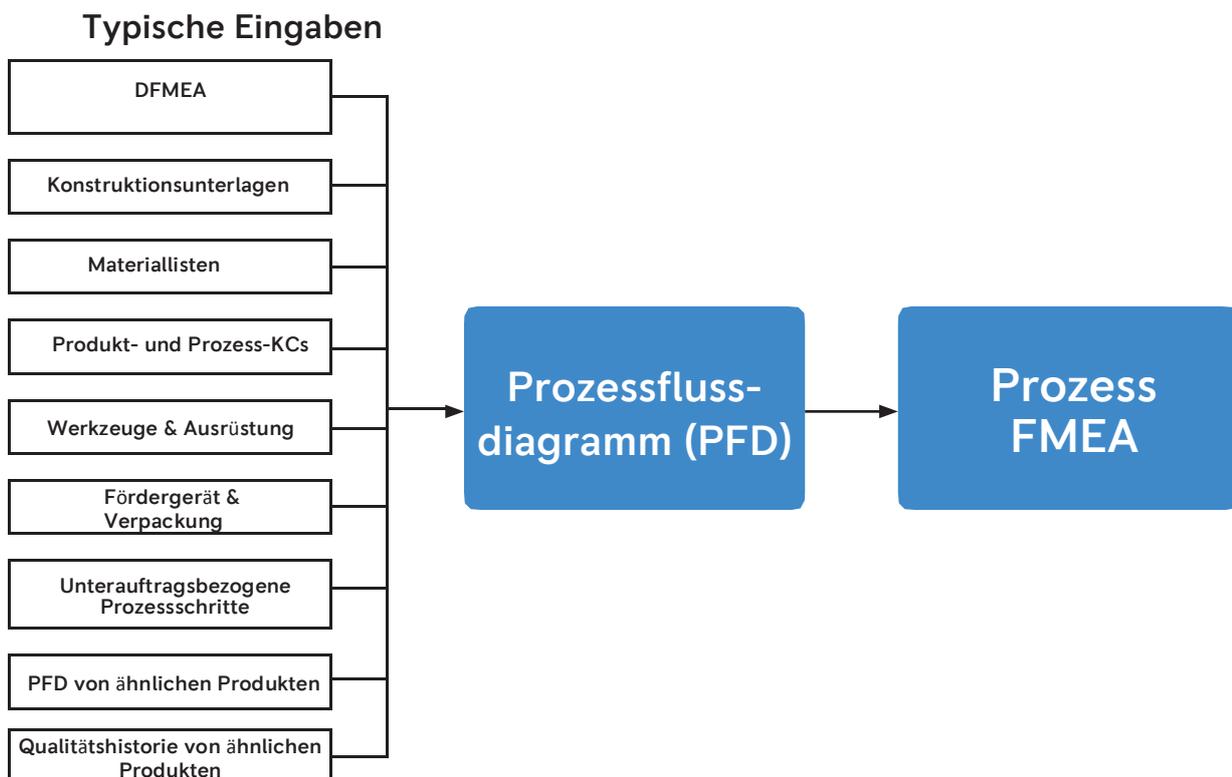
# Kapitel 3

## Prozessflussdiagramme (PFD)

Das Prozessflussdiagramm (PFD) ist die Darstellung der Prozessschritte, die erforderlich sind, um ein Produkt herzustellen oder zu montieren, und zwar in sequentieller Reihenfolge vom Wareneingang bis zum Versand.

Bei der Entwicklung eines PFD gibt es eine Reihe von zweckdienlichen Eingaben, siehe Abbildung 15.

**Abbildung 15: Typische Eingaben in ein PFD**



Das PFD muss ausreichend detailliert sein, um die wichtigsten Aktivitäten zu beschreiben, die für die Herstellung und Montage des Produkts erforderlich sind, einschließlich der Teilebewegung und Lagerung.

Das PFD braucht die Prozesse für zugekaufte Materialien, Komponenten und Baugruppen nicht zu berücksichtigen. Stattdessen wird vom Lieferanten dieser Materialien, Komponenten und Baugruppen erwartet, dass er eigene Prozessflussdiagramme gemäß AS13004 definiert, schließlich muss dieser Standard durch die Lieferkette nach unten fließen.

Typische Betriebsverfahren, die in ein PFD aufzunehmen sind, zeigt Tabelle 7.

**Tabelle 3: Typische Verfahren und Symbole für die Erstellung eines Prozessflussdiagramms**

Typische Symbole	Vorgang Beschreibung
●	Administration
■	Verpackungsinteraktion
↑	Heben (mechanisches / sonstiges)
↓	Laden / Installieren
◆	Fertigung / Verarbeitung
○	Verlagern
△	Lagern
□	Inspektion
◻	Nacharbeit
	Andere (bitte angeben)

Heutzutage gibt es viele Systeme, die es Organisationen ermöglichen, den Prozessfluss zu dokumentieren. AS13004 bietet zwei Beispiele, die veranschaulichen, wie das PFD aussehen könnte. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 16 dargestellt (enthalten in AS13004, Anhang C als Abbildung C3).

**Abbildung 16: Prozessflussdiagramm basierend auf dem Beispiel in AS13004, Bild C3**

Vorgang	Schritt	Administration	Verpackungsinteraktion	Heben	Laden / Installieren	Fertigung / Verarbeitung	Verlagern	Lagern	Inspektion	Nacharbeit	Andere	Vorgang Beschreibung	Einstufung	Produkt-KC	Prozess-KC	Kontrollmethoden
		●	■	↑	↓	◆	○	△	□	□						
100 CNC Bohrer richten	1	●										Korrektes NC-Programm auswählen				Barcode auf Laufkarte scannen
100 CNC Bohrer richten	2				↓							Werkzeuge in der CNC-Maschine aufspannen				Laser-Werkzeugkontrolle an der CNC-Maschine
100 CNC Bohren – Material laden	3				↓							Rohling aufspannen				Barcode-Überprüfung
100 CNC Bohrer - Löcher bohren	4					◆						Löcher bohren	KC	Innendurchm. Treibstoffanschluss		CMM bei OP250
100 CNC Bohrer – Bohrlochkontrolle	5								□			Sichtkontrolle des Lochzustands				Visueller Standard
150 CNC Bohrer-Entgraten	1					◆						Entgraten				Visueller Standard

Der Detaillierungsgrad des Prozessflussdiagramms in Abbildung 16 dient lediglich zur Veranschaulichung. In der Praxis muss das Unternehmen gegebenenfalls weitere Details hinzufügen, wie z. B. Angaben zu den Lochspezifikationen, zu zusätzlichen Arbeiten etc. Der Umfang ist vom Unternehmen auf der Grundlage dessen, welche Kriterien von Wert sind, festzulegen.

Abbildung 17 zeigt das zweite Beispiel einer PFD-Schablone, die in AS13004 für den gleichen Vorgang und die gleichen Schritte wie in Abbildung 16 enthalten ist.

Es handelt sich um ein einfaches textbasiertes Format, enthält aber die gleichen Datentypen wie im Beispiel von Abbildung 16.

Die Anmerkungen zu dieser Vorlage im Standard zeigen, dass die Spalten für Inputs, Outputs und Kontrollen nicht vom Standard vorgeschrieben sind, sondern als Good Practice (bewährte Praktiken) gelten. Mit anderen Worten, um dem Zweck des Standards gerecht zu werden, braucht das PFD nur die Reihenfolge der Vorgänge und eine Beschreibung der Schritte innerhalb dieses Vorgangs enthalten.

Dies ist bis zu einem gewissen Grad sinnvoll, da die Merkmalsmatrix die Reihenfolge der Prüfvorgänge beinhaltet, die auf den Ort der Erstellung des Merkmals abgestimmt sind, und der Kontrollplan Einzelheiten zu den Prüfanforderungen enthält.

**Abbildung 17: Prozessflussdiagramm basierend auf dem Beispiel in AS13004, Bild C4**

PROZESSBESCHREIBUNG	VERFAHREN	SCHRITT	INPUTS	KLASSE	OUTPUTS	KONTROLLEN	FEHLERVERMEIDUNG	ANMERKUNGEN
Einrichten	1	Einrichten	Qualitätskontrollprotokoll (Router) Arbeitsanweisungen		CNC-Bohrer mit Programm aufgespannt	Barcode auf Laufkarte scannen		
			NC-Programmliste CNC-Bohren					
100 – CNC-Bohren – Einrichten	2	Einrichten	CNC-Bohrer mit Programm aufgespannt Voreingestellte Werkzeuge Arbeitsanweisungen Qualitätskontrollprotokoll (Router)		Die Werkzeuge sind in der richtigen Position im Bohrerwerkzeugmagazin aufgespannt	Sichtprüfung		
			CNC-Bohren					
100 – CNC-Bohren – Material laden	3	Material laden	CNC-Bohren Aufspannen des Teils Rohling Arbeitsanweisungen Qualitätskontrollprotokoll (Router)		Rohling korrekt aufgespannt	Sichtprüfung		
100 – CNC-Bohren – Löcher bohren	4	Löcher bohren	Rohling korrekt aufgespannt Qualitätskontrollprotokoll (Router) Bauteilzeichnung Arbeitsanweisungen Standbohrmaschine richtig eingestellt Prüflehren Geschulter Bediener		Durchmesser des Luftanschlusses Positionstoleranz des Luftanschlusses Oberflächenbeschaffenheit Durchmesser des Treibstoffanschlusses Positionstoleranz des Treibstoffanschlusses Qualitätskontrollprotokoll (Router) mit geprüfter Menge abgezeichnet	CMM CMM Sichtprüfung CMM CMM Sichtprüfung		

Das PFD ist ein wichtiger Beitrag bei der Entwicklung einer Prozess-FMEA. Die FMEA folgt der gleichen Reihenfolge wie im PFD definiert.

Die PFMEA muss alle im PFD aufgeführten Vorgänge beinhalten. Einzelheiten zu den Schritten innerhalb jedes Vorgangs sind im PFMEA risikobasiert zu verwenden (Abschnitt 4.7.4). So würden beispielsweise in den in Abbildung 16 aufgeführten Prozessschritten für OP 100 nicht alle diese Details in den Spalten Vorgang, Schritt und Anforderungen an die PFMEA übertragen.

Die PFMEA konzentriert sich auf die Schritte, bei denen das Produkt absichtlich oder unabsichtlich verändert werden kann. Daher würden wir in diesem Beispiel nicht die Details für die folgenden Schritte aufnehmen:

Schritt 1 – Administration – Werkzeugmaschinenprogramm laden

Schritt 2 – Werkzeuge aufspannen

Schritt 3 – Material laden

Schritt 5 – Bohrlochkontrolle

Das heißt nicht, dass diese Schritte an anderer Stelle innerhalb der PFMEA nicht berücksichtigt werden – sie werden es. Sie würden typischerweise als potenzielle Fehlerursachen und nicht als Prozessanforderungen oder Fehlermodi bezeichnet.

Nimmt man zum Beispiel „CNC-Programm laden“ als Schritt, wäre der logische Fehlermodus „falsches CNC-Programm laden“. Wie würde sich das auswirken? Das ist schwer zu sagen. Wäre es nur ein Problem mit der Versionskontrolle, dann gäbe es vielleicht nur einige alternative Funktionen; wäre es jedoch das völlig falsche Programm, so könnte die Maschine abstürzen, wobei die Maschine und das aufgespannte Teil beschädigt werden könnten.

Daher ist „falsches CNC-Programm laden“ wirklich eine potenzielle Ursache für einen Ausfallmodus bei „schweren Schäden“. Ebenso kann „falsche Werkzeuge aufspannen“ als potenzielle Ursache für „Loch über- oder unterdimensioniert“ verknüpft werden, „falsches Material laden“ ist eine mögliche Ursache für „Teil aus falschem Material hergestellt“.

Inspektionsprozesse werden in der Spalte PFMEA Erkennungskontrollen für „Loch bohren“ aufgelistet und brauchen nicht als eigenständiger Prozessschritt betrachtet werden.

Dies gilt für alle Prüfvorgänge. Der einzige Grund, einen Inspektionsvorgang als einen Schritt in die PFMEA aufzunehmen, besteht darin, die Möglichkeit einer unbeabsichtigten Transformation des Teils in Betracht zu ziehen, z. B. Beschädigung, FOD (Beschädigung durch Fremdkörper) etc.

Dieser Punkt ist besonders zu beachten, da es Fälle gegeben hat, in denen Fertigungsingenieure Abschnitt 4.7.4 des Standards, in dem es heißt „Einzelheiten zu den Schritten innerhalb jedes Vorgangs sind [in der PFMEA] auf der Grundlage möglicher Risiken zu berücksichtigen und aufzunehmen“, als eine Möglichkeit ausgelegt haben, nach eigenem Ermessen auszuwählen, was aus der PFMEA ausgelassen werden kann.

Die obige Erklärung zeigt, dass alle Schritte, die das Produkt (absichtlich oder unabsichtlich) verändern, einbezogen werden müssen. Einige davon können, je nach Risiko, auf dieser Basis durchaus weggelassen werden, z. B. Werkzeug aufspannen, Dokumentationskontrollen etc.

Die Bewertung der Effizienz von Prüfprozessen erfolgt durch die AS13003 Messsystemanalyse (Measurement System Analysis, MSA).

### **Weiterführende Literatur:**

„AS13004 Process FMEA and Control Plan for Aerospace“, AESQ, 2017

„Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), 4th Edition, AIAG, 2008

### **PFD – Schlüsselfragen:**

1. Wurden, soweit verfügbar, alle identifizierten Eingaben für das PFD einbezogen?
2. Enthält das PFD Details aller Vorgänge in sequentieller Reihenfolge vom Eingang der Materialien über die Lagerung bis zum Versand des Fertigprodukts?
3. Liefert das PFD eine klare und vollständige Beschreibung des Prozesses, der erforderlich ist, um ein Produkt zu erhalten, herzustellen, zu prüfen, zu testen, zu schützen, zu lagern und zu versenden?
4. Erfüllt der Inhalt des PFD die Anforderungen von AS13004? Falls nicht, wurde dies mit dem Kunden so vereinbart?

# Kapitel 4

## Merkmalsmatrix

AS13004 enthält keine Angaben darüber, was eine Merkmalsmatrix ist, obwohl sie als eine der Eingaben für eine PFMEA angeführt ist. Meiner Meinung nach ist dies einer der wichtigsten Inputs für die Entwicklung einer PFMEA.

Eine Merkmalsmatrix ist ein einfaches, aber wichtiges Dokument. Sie zeigt die Beziehung zwischen den Vorgängen und den Merkmalen (einschließlich der Spezifikationsdetails), die bei diesem Vorgang erstellt wurden. Darüber hinaus wird auch angezeigt, wo dieses Merkmal geprüft wird. Vorgänge, die ein bei einem früheren Vorgang erstelltes Merkmal „beeinflussen“ können, sind ebenfalls aufgelistet. Beispiele für diese Art von Prozessen sind Wärmebehandlung, Beschichtung, Schweißen (gerichtete Wärmequelle) etc.

Anhand dieser Matrix kann der Planungsingenieur sicherstellen, dass alle Merkmale in den Prozess einbezogen werden, und sie bietet ihm die Möglichkeit, das Potenzial zur Minimierung von Prüfvorgängen, Verarbeitungsproblemen etc. zu bewerten.

In AS13004 sollte die PFMEA alle Vorgänge und Merkmale beinhalten. Die Merkmalsmatrix ist das einzige Dokument, das dieses Detail und die Reihenfolge, in der die Merkmale angelegt werden, enthält.

Von den Unternehmen brauchen nicht alle Spezifikationsanforderungen, wie Materialeigenschaften, Schäden, Oberflächeneigenschaften etc., in die Merkmalsmatrix aufgenommen werden. In solchen Fällen muss das Team auch auf die entsprechenden Spezifikationen und Standards Bezug nehmen. Abbildung 18 zeigt ein Muster für eine einfache Merkmalsmatrix.

**Abbildung 18: Beispiel für eine einfache Merkmalsmatrix (gekürzt)**

Merkmale Details ↓			Arbeitsvorgangsfolge →				
Merkmal Nummer	Beschreibung	Spezifikation	OP100 Bohren	OP150 Entgrate	OP200 Andere	OP250 CMM	etc. →
1	Innendurchm. Treibstoffanschluss	+/- 10,50 mm 0,1 mm	X	A		I	
2	Anordnung Treibstoffanschluss	1450 (x), 761 (y), 600 (z)	X				
3	Innendurchm. Ölanschluss	+/- 18,50 mm 0,3 mm	X	A		I	
4	Anordnung Ölanschluss	1150 (x), 200 (y), 45 (z)	X				
etc. ↓							

Schlüssel: X = erstelltes Merkmal, A = betroffenes Merkmal, I = inspiziert



# Kapitel 5

## Prozess-FMEAs

### Die Prozess-FMEA auf einen Blick

Von allen uns zur Verfügung stehenden Werkzeugen zur Fehlervermeidung ist dies bei weitem das effektivste, sofern es richtig angewandt wird.

Auf oberster Ebene geht es bei der Prozess-FMEA um die Frage, was im Prozess falsch gehen könnte und dazu führen würde, dass das Produkt die Entwurfsabsicht (Spezifikation) nicht erfüllt.

Sobald die Risiken identifiziert sind, können Verbesserungsmaßnahmen definiert werden, um die Wahrscheinlichkeit eines Auftretens der möglichen Ursache zu beseitigen oder zu verringern bzw. die Fähigkeit für eine Entdeckung der Nichtkonformität zu verbessern, bevor die Auslieferung an den Kunden erfolgt.

### Bereichsübergreifende Teamarbeit

Eine Prozess-FMEA ist eine sehr detaillierte Bewertung und muss von einem bereichsübergreifenden Team durchgeführt werden, das mindestens Manufacturing Engineering, Operations, Quality, Design, Supplier(s) (falls zutreffend) und Maintenance umfasst.

Für eine erfolgreiche PFMEA muss das Team die richtige Erfahrung und Fachkenntnis über das Produkt und die Prozesse einbringen können.

### Umfang der PFMEA

Damit eine Prozess-FMEA wirksam ist, muss sie **ALLE** Merkmale/Besonderheiten der Konstruktionszeichnung und zugehörigen Spezifikation bewerten sowie **jeden** Prozessschritt berücksichtigen (bei dem das Produkt eine Änderung erfährt bzw. erfahren kann, einschließlich unbeabsichtigter Änderungen wie Schäden durch Lagerung & Handhabung).

Für **jede** einzelne Teilenummer ist eine Prozess-FMEA erforderlich.

Ein häufiger Fehler bei der Erstellung einer PFMEA besteht darin, dass aus Zeitgründen nur jene Merkmale oder Prozessschritte berücksichtigt werden, von denen man glaubt, dass sie für das Design wichtig sind. Es gibt zahlreiche Beispiele, wo durch diese „Vorauswahl“ etwas nicht berücksichtigt wurde, das erhebliche Auswirkungen für den Kunden hat.

Die PFMEA ist ein Werkzeug, das alle Prozessschritte und alle Produktmerkmale auswerten soll, um zu ermitteln, wo sich die Risiken befinden.

Wenn wir also nicht alle Konstruktionsmerkmale und Prozessschritte berücksichtigen, dann ist die Risikobewertung immer unzureichend.

Dies mag als schwierige Aufgabe erscheinen, besonders für jene Unternehmen, die noch nicht mit PFMEA vertraut sind. Allerdings kann die Entwicklungszeit für eine Prozess-FMEA durch den Einsatz von Computer-Software und von „Referenz-FMEA“ stark reduziert werden, ohne deren Wirksamkeit zu beeinträchtigen. Dieser Ansatz wird in Kapitel 3 und 4 beschrieben.

Die folgenden Hinweise sollen als Anleitung dienen, um sicherzustellen, dass die Prozess-FMEA effektiv durchgeführt wurde. Abbildung 19 zeigt eine teilweise erstellte Prozess-FMEA für einen Bearbeitungsvorgang, der erforderlich ist, um vier Löcher an einer vorgegebenen Position und mit einer bestimmten Tiefe zu bohren.

**Abbildung 19: Beispiel für eine Prozess-FMEA (gekürzt)**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (PFMEA)														
Teilnummer : ABC123XYZ				Ansprechpartner / Telefon		A. Day (Man. Engineering) 07771 255 5521			Datum (Orig.)		01.02.17			
Beschreibung : Verteilerblock				Core Team		E. Zee (Engineering), G. Knight (VorgangsOperations), B. Wright (Quality), I. Care (Maintenance)			Kundengenehmigungsdatum					
Vorgang	Schritt	Funktion	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ	
10	1	CNC Bearbeitung Mazak	Vier 10 mm +/- 0.1 mm Löcher bohren an Position 100,30 100,40 100,50 und 100,60 (Lagetoleranz +/-0,2 mm) bis zu einer Tiefe von 20 mm +/-1 mm and 100, 60 (location tolerance +/- 0.2mm)	Loch zu groß	Teil kann während des Betriebs vibrieren, führt zu Halterungsbruch und Systemausfall	9	KCF	Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7		126
								Gelieferter Bohrer hat Übermaß	Nur Konformitätsbescheinigung	3				189
									Werkzeugeinrichtung	2				126
					CNC-Spindelausrichtung außerhalb der Spezifikation	Wöchentliche Kugelstabprüfung	4	252						
						Vierteljährliche Laser-Ausrichtung-überprüfung								
				Loch zu klein	Kann nicht an Halterung montiert werden	4		Werkzeugverschleiß	Werkzeugeinrichtung	4	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7		224
								Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2				112
					Schlechte Passgenauigkeit führt zu Spannung in Schraube	8			Gelieferter Bohrer vom Lieferanten hat Untermaß	Werkzeugeinrichtung				2
				Konformitätsbescheinigung vom Lieferanten						3	168			

Es ist wichtig, dass die in der PFMEA enthaltenen Beschreibungen ausreichend detailliert sind, um von Technikern verstanden zu werden, die nicht direkt an der Erstellung des Dokuments beteiligt waren.

Diese Dokumente werden viele Jahren in Gebrauch sein. Daher ist es wichtig, dass sie auch in Zukunft von Teams überprüft werden können, die den beabsichtigten Sachverhalt verstehen.

Präziser Sprachgebrauch muss in einer PFMEA im Vordergrund stehen.

So erstellen Sie eine Prozess-FMEA mit Hilfe der AS13004 PFMEA-Vorlage:

## **a) Teilenummer & Beschreibung**

Es muss die gesamte Teilenummer und eine kurze Beschreibung des Teils angegeben werden. Die Beschreibung sollte die Modell- / Turbinenbezeichnung (z. B. Trent 1000) und einen kurzen Namen des Teils enthalten (z. B. Turbinenschaufel, HP-Verdichterschaufel, etc.).

Die Prozess-FMEA sollte spezifisch für eine einzelne Teilenummer oder Baugruppe erstellt werden. Es kommt nur selten vor, dass individuelle Prozess-FMEA mehr als eine Teilenummer / Baugruppe abdecken. Von PFMEA für Teile ohne spezifische Nummer wird abgeraten.

Die am häufigsten genannten Gründe für die Verwendung von nicht teilespezifischen PFMEA sind:

### **Generische Prozesse**

Es wird oft angenommen, dass Prozesse wie Wärmebehandlung oder Reinigung nicht dem spezifischen Teilnummernansatz einer PFMEA unterliegen.

In Wirklichkeit gibt es nur wenige Beispiele, wo die Auswirkungen des Prozesses nicht teilespezifisch sind. Daher wird empfohlen, dass solche Prozesse in gleicher Weise wie ein Bearbeitungsprozess und für jede Teilenummer als einzigartig betrachtet werden.

Genau wie bei anderen Prozessen (z. B. maschinelle Bearbeitung) sind die Folgen eines Prozessfehlers höchstwahrscheinlich teilespezifisch.

### **Teilfamilien**

Es wird oft vorgeschlagen, dass viele Teile als „Teilfamilien“ in eine Prozess-FMEA aufgenommen werden können. Dies funktioniert nur, wenn das Teil identisch ist und die gleichen Funktionsanforderungen, dieselben Ausfallfolgen, die gleichen Betriebsbedingungen, die gleichen Merkmale, gleiche Spezifikationstoleranzen usw. aufweist. Andernfalls ist die Ähnlichkeit des Teils für eine einfache Übertragung nicht ausreichend.

Teilfamilien sind normalerweise (in der Automobilindustrie) als Teil definiert, das anderen Teilen, bis auf einige zusätzliche Merkmale, genau gleicht.

Beispiel: Ein Zylinderkopf für einen V8 5V-Motor wird auch auf einem Hochleistungsmotor verwendet. Im Hochleistungsmotor werden die Zylinderlaufflächen mit einer engeren Toleranz gehont, aber alle anderen Merkmale bleiben gleich. In diesem Beispiel kann das Konzept der Teilfamilien verwendet werden, sodass eine zusätzliche PFMEA-Analyse lediglich für die modifizierten Zylinderbohrungen erforderlich ist.

Aufgrund der engeren Toleranzen würden wir höhere Fehlerraten erwarten.

Es gibt einige Fälle, wo FMEA für „nicht teilespezifische“ Anwendungen eingesetzt werden können. Zum Beispiel gibt es Maschinen-FMEA, die bei der Gestaltung von Prozessmaschinen oder Montagevorrichtungen helfen. Einige Dienstleistungsunternehmen verwenden einen FMEA-Ansatz, um transaktionale Prozesse zu gestalten. Derartige Ansätze sind nicht Gegenstand dieses Leitfadens.

## b) Kernteam

Die Anforderung besteht darin, die für das Originaldokument verantwortlichen Mitglieder des Kernteams (einschließlich ihrer Funktion) aufzulisten. Wir sollten bedenken, dass dieses Dokument über die Lebensdauer des jeweiligen Teils regelmäßig aktualisiert wird und daher die Teammitglieder nicht immer die gleichen sein werden.

Es ist wichtig, dass das Team die richtige Zusammensetzung hat, um potenzielle Produktfehlermodi und mögliche Prozessursachen identifizieren und bewerten zu können. So sollte sich das Team zumindest aus Manufacturing Engineering, Design Engineering, Operations, Quality und Maintenance zusammensetzen.

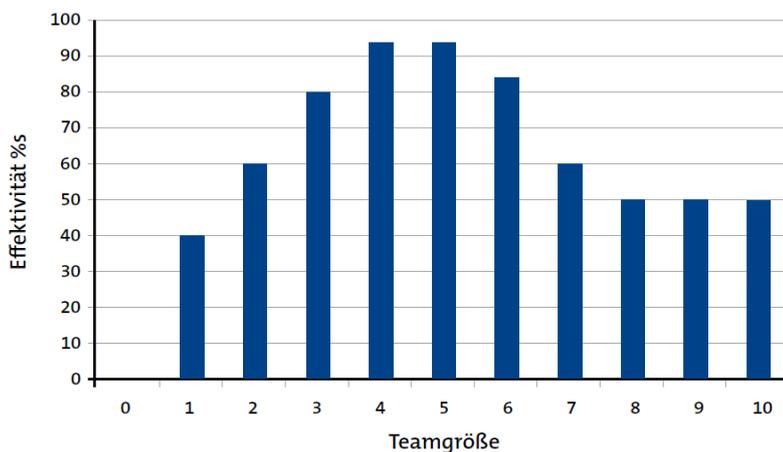
Unter Umständen sollten auch Kunden bzw. relevante Vertreter des Lieferanten an bestimmten Phasen der Zusammenstellung oder Überprüfung beteiligt sein, um deren Erkenntnisse zu berücksichtigen.

Nicht alle Mitglieder des Teams müssen für alle Stufen der Erstellung einer FMEA anwesend sein, da ihre Beiträge auf bestimmte Aspekte beschränkt sein können. So kann z. B. der Konstrukteur etwas zu den Auswirkungen und der Bedeutung von identifizierten Produktfehlermöglichkeiten sagen, besitzt aber keine ausreichende Kenntnis der Prozesse, um einen wirklich wertvollen Beitrag zu leisten.

Bei der Erstellung von Referenz-PFMEA sollte ein kleines Kernteam mit 3 bis 4 Personen und der entsprechenden Kenntnis des Teils und des Prozesses zusammengestellt werden.

Zu viele Teammitglieder werden lediglich den Prozess verlangsamen und bringen wenig zusätzlichen Nutzen.

**Abbildung 20: Effektivität unterschiedlicher Teamgrößen**



Nach der Fertigstellung können die Referenz-PFMEA und die teilespezifische PFMEA an eine größere Gruppe für weitere Kommentare und zur Plausibilitätsprüfung verteilt werden.

### **c) Originaldatum / Revisionsdatum**

Die Prozess-FMEA ist ein Live-Dokument und muss daher einer Versionsverwaltung unterliegen, um ein nachvollziehbares Protokoll der Änderungen, Aktualisierungen usw. zu erhalten.

Änderungen an einer Prozess-FMEA sind unter folgenden Umständen zu erwarten:

- Änderung der Produktdefinition
- Prozessänderungen (einschließlich Inspektionsprozesse)
- Aktualisierung nach 8D-Untersuchungen / Kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen
- Qualitätsleistungsdaten, die die RPZ-Werte beeinflussen können

#### **d) Vorgang / Schritt**

Die Prozess-FMEA muss alle Prozessschritte enthalten, in denen das Produkt umgestaltet wird, auch wenn diese unbeabsichtigt ist, z. B. während der Handhabung und Lagerung. Die Prozess-FMEA muss alle Schritte vom ersten Arbeitsvorgang bis zum Versand umfassen. Man darf dabei nicht in die Falle tappen, dass nur Prozesse in die PFMEA aufgenommen werden, die als „wichtig“ gelten.

Die Prozessschritte sollten auf einem Prozessflussdiagramm definiert werden, das die Abfolge der Vorgänge und den Zweck (gefordertes Ergebnis) der einzelnen Vorgänge zeigt. Auf einer

Merkmalsmatrix sind die Merkmale zu definieren, die bei jedem Vorgang erstellt und geprüft werden sollen.

Einige häufige Fehler sind:

- Es werden transaktionale Prozesse mit einbezogen, z. B. Laufzettel ausfüllen, CNC-Programm laden. Diese sind für die Prozess-FMEA nicht relevant, obwohl sie als potenzielle Ursache eines Fehlers erscheinen können, wenn eine Verbindung hergestellt werden kann.
- Ebenso gehören Prozesse wie „Werkzeuge in CNC laden“ nicht als Prozessschritt in eine PFMEA. Es kann keine Produktfehlermöglichkeiten bei diesem Prozessschritt geben, da keine Transformation des Produkts stattfindet.
- Wenn das Laden von Werkzeugen irgendwelche Auswirkungen auf die Produktqualität hat, wird dies in einem späteren Prozessschritt als „potenzielle Ursache“ einer definierten „Fehlermöglichkeit“ in der PFMEA aufgezeichnet.
- Messprozesse werden als Prozessschritt einbezogen und als Ursache für eine Abweichung der Maßgenauigkeit betrachtet. Dabei ist zu bedenken, dass das Messsystem bei jedem Prozessschritt als Teil der „Entdeckungsmethode“ berücksichtigt wird und nicht unbedingt als unabhängig betrachtet werden muss.

Die einzige relevante Überlegung betrifft eine mögliche Beschädigung des Teils während des Messvorgangs durch Handhabung oder Lagerung.

### **e) Prozessfunktion / Anforderung**

Für jeden Vorgang müssen die Funktion (Zweck) und das geforderte Ergebnis (Anforderung) definiert werden.

Diese müssen ausreichend detailliert beschrieben werden, damit die potenzielle Fehlermöglichkeit (nächste Spalte) direkt aus der Beschreibung abgeleitet werden kann.

Wenn z. B. der Zweck bei diesem Schritt darin besteht, ein Loch von 10 mm +/- 0,2 mm zu bohren, dann sind als mögliche Fehler „Loch zu groß“ (d. h. über 10,20 mm) oder „Loch zu klein“ (d. h. kleiner als 9,80 mm) denkbar.

Bei einem Montagevorgang kann es erforderlich sein, dass eine Dichtung in korrekter Ausrichtung ohne Beschädigung oder Verunreinigung der Dichtflächen eingesetzt wird. Die Fehlermöglichkeiten wären dann (a) falsche Ausrichtung, (b) Oberfläche beschädigt und (c) Oberfläche verschmutzt.

In diesem Schritt ist es wichtig, alle Anforderungen zu identifizieren, die dazu beitragen, ein Merkmal als konform oder nicht konform zu definieren.

Zum Beispiel ist vielen Merkmalen eine allgemeine Spezifikation zugeordnet, die nicht unbedingt auf den ersten Blick ersichtlich ist. Ein Bohrlochmerkmal hat geometrische Toleranzen, kann aber auch einer technischen Spezifikation unterliegen, die „Keine weiße Schicht“ oder ähnliches angibt. Es müssen sämtliche Anforderungen, sei es auf der Zeichnung oder in einer entsprechenden Spezifikation, einbezogen werden.

### **Umgang mit Fertigungstoleranzen**

Die PFMEA muss Fertigungstoleranzen enthalten, die zur Herstellung des Teils verwendet werden. Im Idealfall werden diese Fertigungstoleranzen auf irgendeine Weise innerhalb der PFMEA gekennzeichnet, um deutlich zu machen, ob es sich um eine technische Anforderung handelt oder um eine Fertigungsanforderung (z. B. durch ein bestimmtes Symbol in der Merkmalspalte oder auf andere Weise).

Fertigungstoleranzen können sich auch auf Prozesse beziehen, die für einen erfolgreichen Fertigungsschritt erforderlich sind. Zum Beispiel kann ein Reinigungsvorgang vor dem Schweißen enthalten sein, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigung vorliegt, die eine Porosität verursachen könnte. Selbst wenn dies möglicherweise nicht in der Zeichnung oder Spezifikationen angegeben werden kann, besteht eine interne Anforderung, dass das Teil vor dem Schweißen sauber ist. Daher ist es beim Reinigungsvorgang erlaubt, „Sauberes Teil“ als Prozessanforderung einzubeziehen (die Reinigung kann auch bei der Bewertung des Schweißprozesses als mögliche Ursache von „Porositätsdefekten“ bezeichnet werden).

**Abbildung 21: Prozessfunktion und Verknüpfung zu Fehlermöglichkeiten in einer PFMEA**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (PFMEA)													
Teilnummer : ABC123XYZ					Anspruchspartner / Telefon		A. Day (Man. Engineering) 07771 255 5521			Datum (Orig.)	01.02.17		
Beschreibung : Verteilerblock					Core Team		E. Zee (Engineering), G. Knight (VorgangsOperations), B. Wright (Quality), I. Care (Maintenance)			Kunden-Genehmigungsdatum			
Vorgang	Schritt	Funktion	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
10	1	CNC Bearbeitung Mazak	<p><b>Vier 10 mm +/- 0.1 mm Löcher bohren</b></p> <p>an Position 100,30 100,40 100,50 und 100,60 (Lagetoleranz +/-0,2 mm) bis zu einer Tiefe von 20 mm +/-1 mm and 100, 60 (location tolerance +/- 0.2mm)</p>	Loch zu groß	Teil kann während des Betriebs vibrieren, führt zu Halterungsbruch und Systemausfall	9	KCF	Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7	126
								Gelieferter Bohrer hat Übermaß	Nur Konformitätsbescheinigung	3			189
									Werkzeugeinrichtung	2			126
				Loch zu klein	Teil muss verschrottet werden, wenn es während der Herstellung entdeckt wird	6	CNC-Spindelausrichtung außerhalb der Spezifikation	Wöchentliche Kugelstabprüfung	4	224			
								Vierteljährliche Laser-Ausrichtung-süberprüfung					
								Werkzeugverschleiß	Werkzeugeinrichtung				4
Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7	112								
	Gelieferter Bohrer vom Lieferanten hat Untermaß	Werkzeugeinrichtung			2	112							
Konformitätsbescheinigung vom Lieferanten		3	168										

In diesem Beispiel sehen wir, dass die Fehlermöglichkeit als logischer Schritt aus der Anforderungsbeschreibung abgeleitet wurde.

Dies ist besonders wichtig für Montagearbeiten, bei denen der erforderliche Genauigkeitsgrad möglicherweise nicht offensichtlich ist.

So sind z. B. beim Zusammenfügen von zwei Teilen die Erfolgsmerkmale auf der Zeichnung oder in den Konstruktionsnotizen nicht besonders vermerkt. Daher muss die Prozess-FMEA (und später die Verfahrensanweisungen) die Einzelheiten angeben. Zum Beispiel:

„Teil A und Teil B in korrekter Ausrichtung zusammenfügen, ohne Beschädigung der Oberfläche 'D' zu verursachen und mit Gewindebolzen und Mutter bei einem Drehmoment von 100N +/- 2N in einem Winkel von 360 Grad sichern.“

Aus dieser Beschreibung können dann folgende Fehlermöglichkeiten abgeleitet werden.

- Falsche Ausrichtung
- Beschädigung der Oberfläche D
- Drehmoment zu hoch
- Drehmoment zu niedrig
- Kein Drehmoment
- Schraube nicht montiert
- Winkel nicht erreicht

Wir müssen darauf achten, nicht auf Anforderungen zu schließen, die es nicht gibt. Es gibt Beispiele, wo die Anforderung für ein Bohrloch von 10 mm +/- 0,2 mm bestand und das Team andere Fehlermöglichkeiten aufgeführt hat, z. B. „Loch nicht rund“. Sofern keine spezifische Rundheitsangabe auf der Zeichnung existiert, ist dies nicht relevant und sollte nicht berücksichtigt werden.

Es kann auch allgemeine Zeichnungsvorgaben geben, die bei bestimmten Vorgängen berücksichtigt werden müssen. Dazu gehören beispielsweise:

- Keine Schäden / Schaden darf bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten
- Keine scharfen Kanten / Grate
- Keine Fremdkörper (FOD) / Keine FOD oberhalb festgelegter Grenzen

Gegebenenfalls sollten diese Vorgaben als zusätzliche Anforderungen betrachtet, und daher als Fehlermöglichkeit aufgeführt werden.

**f) Fehlermöglichkeiten**

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben bezieht sich die Fehlermöglichkeit auf die Art und Weise, in der das Produkt versagen könnte, die Entwurfsabsicht (Zeichnung oder Spezifikation) zu erfüllen.

Es ist entscheidend, dass die Fehlermöglichkeit ein Produktmerkmal / eine Eigenschaft und keinen Prozessfehler beschreibt. Wenn diese Spalte nicht korrekt ausgefüllt ist, haben alle weiteren Einträge in den FMEA-Spalten rechts davon keine Relevanz.

Als einfache Fragestellung kann folgende Formulierung dienen: „Beschreibt die Fehlermöglichkeit etwas am Produkt, das in Bezug auf die Zeichnung oder Spezifikation nicht richtig ist?“

Wahrscheinlich existieren mehrere Fehlermöglichkeiten pro Merkmal / Eigenschaft. Dies ist eine weitere gute Möglichkeit um zu überprüfen, ob die PFMEA konsequent ausgefüllt wurde. Wenn nämlich nur eine Fehlermöglichkeit identifiziert wurde, dann dürfte etwas falsch sein.

Allerdings ist darauf zu achten, dass nicht einfach „Fehlergrade“ aufgelistet werden. Zum Beispiel ist "Loch zu klein" oft ausreichend, um eine Fehlermöglichkeit und ihre Folgen zu beschreiben.

Vermeiden Sie die Verwendung von „Loch unterdimensioniert“ oder „Loch 10 % unterdimensioniert“ oder „Lochuntermaß der zweifachen Toleranz“ usw. Wenn es eine Reihe von Folgen durch „Loch zu klein“ gibt, dann sollten diese in der Spalte "Mögliche Folgen" aufgeführt werden (siehe Beispiel- PFMEA).

**Tabelle 4: Beispiele für Fehlermöglichkeiten**

Gültige Fehlermöglichkeit-Beschreibung	Ungültige Prozessfehlermöglichkeit-Beschreibungen
Loch zu groß	Bohrer gebrochen
Oberfläche zu rau	Maschinenausfall
Drehmoment über Nennwert	Falsche Drehmomenteinstellung verwendet
Profilform falsch	Schrottteile
Fehlendes Merkmal	Falsches CNC-Programm verwendet
Porosität in der Schweißnaht	Beschädigtes Werkzeug
Lochposition falsch	Falscher Kühlmitteldruck

Eine weitere gute Plausibilitätsprüfung in diesem Stadium besteht darin, die identifizierten Fehlermöglichkeiten mit bekannten Abweichungen bei ähnlichen Teilen zu vergleichen, z. B. Durchschlupf, Verschrottungsursachen, Nachbesserungsursachen usw. Sind alle diese Fehlermöglichkeiten erfasst worden?

## **g) Mögliche Fehlerfolge**

Dies ist ein Kernpunkt, bei dem die Verbindung zur Design-FMEA und zum Design Engineering eine wichtige Rolle spielt.

Jedes Merkmal hat einen bestimmten Zweck, warum wäre es sonst vorhanden?

Wir müssen daher die Auswirkungen auf das Endprodukt verstehen, wenn dieses Merkmal nicht vorhanden bzw. nicht konform ist (aus Sicht des Kunden oder Endbenutzers), aber auch die Auswirkungen auf die Produktionsstätte / das Unternehmen.

Dies ist einer der Faktoren, die erklären können, warum „prozessbasierte (generische) PFMEA“ im Gegensatz zu „produktorientierten PFMEA“ nicht effektiv sind. In einer prozessbasierten PFMEA würde das Risiko für alle ausgeführten Bohrungen als gleich angenommen und somit gleich bewertet werden. Der unterschiedliche Zweck der einzelnen Löcher bedeutet jedoch, dass die Auswirkungen bei jedem Loch unterschiedlich sein können. Dies kann nur dann erkannt werden, wenn sich die PFMEA auf die Produktmerkmale konzentriert.

Die Verwendung einer prozessbasierten PFMEA bedeutet auch, dass die Verbindung zur Design-FMEA irrelevant ist.

Für jede Fehlermöglichkeit müssen alle relevanten Auswirkungen aufgelistet werden. Bei den meisten Fehlermöglichkeiten sind mehrere Auswirkungen zu erwarten (eine weitere gute Kontrollmöglichkeit).

Die wichtigsten Auswirkungen sind solche, die den Kunden oder Endbenutzer direkt betreffen, insbesondere dann, wenn es um die Produktsicherheit geht.

Es können aber auch interne Auswirkungen aufgeführt werden, z. B. Ausschuss, Nacharbeit usw. Wenn Fehlermöglichkeiten die Sicherheit des Bedieners betreffen, müssen diese ebenfalls aufgeführt werden (siehe Richtlinien für die Bedeutungsbewertung).

### **Richtige Detailtiefe bei der Beschreibung von Fehlermöglichkeiten angeben**

Bei der Beschreibung von möglichen Fehlerfolgen ist es wichtig, die Bedingungen zu verstehen, die für das Auftreten der Folgen vorhanden sein müssen. So kann z. B. ein Maßfehler eine Reihe von möglichen Folgen haben, abhängig vom jeweiligen Schweregrad.

Dies bedeutet, dass der Fehler eventuell eine Sonderfreigabe erhält oder aber das Teil überarbeitet bzw. verschrottet werden muss. Diese Angabe allein reicht jedoch nicht aus und es muss erklärt werden, wann eine Sonderfreigabe oder eine Verschrottung stattfinden soll.

Für diese Art der Fehlermöglichkeit sind drei Arten von Folgenbeschreibung möglich:

1. Wenn ein Übermaß vorliegt, kann es möglich sein, das Teil zu überarbeiten und in die vorgegebene Toleranz zu bringen
2. Wenn die Maße geringfügig vom unteren Grenzwert abweichen und das Teil daher nicht überarbeitet werden kann, kann die Konstruktionsabteilung eine Sonderfreigabe gewähren

3. Wenn weder eine Überarbeitung noch eine Sonderfreigabe möglich ist, wird das Teil abgelehnt (verschrottet)

Es kann vorkommen, dass eine Fehlermöglichkeit in einem Prozess später eine andere Fehlermöglichkeit in einem anderen Prozess verursacht. So ist zum Beispiel ein verunreinigtes Teil eine Fehlermöglichkeit für einen Reinigungsprozess und eine mögliche Fehlerfolge könnte „Porosität der Schweißnaht“ in einem späteren Vorgang sein. In diesem Beispiel muss das Team in der Beschreibung der Folgen so genau wie möglich sein.

HINWEIS : Auswirkungen auf die Sicherheit des Bedieners sollten nur berücksichtigt werden, wenn diese sich aus einem Produktfehler ergeben, der nicht ein Prozess ist, und dann nur, wenn er die in der Bewertungstabelle für den Schweregrad angegebenen Kriterien erfüllt, d. h. nicht für kleinere HSE-Probleme. Prozess-Risikobewertungen sind eine separate Tätigkeit.

## h) Schweregrad

Der Schweregrad jeder Fehlermöglichkeit wird unter Verwendung der Bewertungstabelle in AS13004 eingeordnet und ist unten in Tabelle 2 dargestellt.

Bei der späteren Berechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ) wird die höchste Punktzahl (schwerstwiegende) für diese Fehlermöglichkeit verwendet.

Manchmal ist es nicht möglich, den Schweregrad direkt aus der DFMEA abzuleiten. Dann ist die Anwesenheit eines Mitarbeiters aus der Design-Engineering-Abteilung entscheidend, um die möglichen Fehlerfolgen als auch den Schweregrad richtig einzuschätzen.

Selbst wenn keine DFMEA zur Verfügung steht, kann durch den richtigen Design-Input eine effektive Prozess-FMEA erstellt werden.

**Tabelle 5 : AS13004 Prozess-FMEA Schweregrad-Risikobewertung**

Auswirkung	Schweregrad der Auswirkung auf das Produkt (Kundeneffekt)	Bewertung	Auswirkung	Schweregrad der Auswirkung auf den Prozess (Fertigungs- / Montageeffekt)
Nichteinhaltung von Sicherheits- und/oder behördlichen Anforderungen	Fehlermöglichkeit beeinflusst den sicheren Betrieb und/oder die Nichteinhaltung von Vorschriften <b>ohne</b> Vorwarnung	10	Nichteinhaltung von Sicherheits- und/oder behördlichen Anforderungen	Gefährdet Bediener, Maschine oder Montage <b>ohne</b> Vorwarnung
	Fehlermöglichkeit beeinflusst den sicheren Betrieb und/oder die Nichteinhaltung von Vorschriften <b>mit</b> Vorwarnung	9		Gefährdet Bediener, Maschine oder Montage <b>mit</b> Vorwarnung
Verlust oder Verschlechterung der Primärfunktion	Verlust der Primärfunktion (Produkt nicht funktionsfähig, beeinträchtigt nicht den sicheren Betrieb)	8	Größere Störung	100% des Produkts muss möglicherweise verschrottet werden. Montage bzw. Auslieferung gestoppt
	Verschlechterung der Primärfunktion (Produkt nicht funktionsfähig, aber mit verminderter Leistung)	7	Signifikante Störung	Ein Teil der Produktion muss möglicherweise verschrottet werden. Abweichung vom Primärprozess; verringerte Liniengeschwindigkeit oder zusätzliche Arbeitskräfte
Verlust oder Verschlechterung der Sekundärfunktion	Verlust der Sekundärfunktion (Produkt funktionsfähig, aber optisch beeinträchtigt, Komfortfunktionen nicht funktionsfähig, Kunde unzufrieden)	6	Mäßige Störung	100% der Produktion muss eventuell nachbearbeitet und akzeptiert werden.
	Verschlechterung der Sekundärfunktion (Produkt funktionsfähig, aber optisch beeinträchtigt, Komfortfunktionen funktionsfähig auf reduziertem Niveau, Kunde unzufrieden)	5		Eventuell muss ein Teil der Produktion nachgearbeitet und akzeptiert werden
Ärgernis	Aussehen, Passform und Oberflächenausführung entsprechen nicht den Anforderungen, Defekt wurde von den meisten Kunden bemerkt (>75%)	4	Mäßige Störung	100% der Produktion muss eventuell vor der Verarbeitung in der Station nachbearbeitet werden
	Aussehen, Passform und Oberflächenausführung entsprechen nicht den Anforderungen, Defekt wurde von etwa der Hälfte der Kunden bemerkt (50%)	3		Eventuell muss ein Teil der Produktion vor der Verarbeitung an der Station nachgearbeitet werden.
	Aussehen, Passform und Oberflächenausführung entsprechen nicht den Anforderungen, Defekt wurde von anspruchsvollen Kunden bemerkt (<25%)	2	Geringe Störung	Leichte Unannehmlichkeiten für Prozess, Betrieb oder Bediener
Keine Auswirkung	Keine erkennbare Auswirkung	1	Keine Auswirkung	Keine erkennbare Auswirkung

### I) Potenzielle Ursache(n) der Fehlermöglichkeit

In diesem Abschnitt wollen wir die Dinge im Fertigungs- / Montageprozess identifizieren, die dazu führen könnten, dass die potenzielle Fehlermöglichkeit existiert. Dies ist der Grund für die Bezeichnung „Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“, d. h. wir suchen nach den Prozessrisiken, die eine Nichtkonformität des *Produkts* bewirken könnten.

Bei korrekter Ausführung sind mehrere mögliche Ursachen pro Fehlermöglichkeit zu erwarten.

**Abbildung 22: Mögliche Fehlerursachen in einer PFMEA**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (PFMEA)													
Teilnummer : ABC123XYZ					Anspruchspartner / Telefon		A. Day (Man. Engineering) 07771 255 5521			Datum (Orig.)		01.02.17	
Beschreibung : Verteilerblock					Core Team		E. Zee (Engineering), G. Knight (VorgangsOperations), B. Wright (Quality), I. Care (Maintenance)			Kunden-Genehmigungsdatum			
Vorgang	Schritt	Funktion	Anforderungen	Fehlermöglich-lichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsm aßnahmen	Auftreten	Entdeckungs- maßnahmen	Entdeckung	RPZ
10	1	CNC Bearbeitung Mazak	Vier 10 mm +/- 0.1 mm Löcher bohren  an Position 100,30 100,40 100,50 und 100,60 (Lagetoleranz +/-0,2 mm) bis zu einer Tiefe von 20 mm +/-1 mm and 100, 60 (location tolerance +/- 0.2mm)	Loch zu groß	Teil kann während des Betriebs vibrieren, führt zu Halterungsbruch und Systemausfall	9	KCF	Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7	126
								Gelieferter Bohrer hat Übermaß	Nur Konformitätsbescheinigung	3			189
									Werkzeugeinrichtung	2			126
					Teil muss verschrottet werden, wenn es während der Herstellung entdeckt wird	6		CNC- Spindelausrichtung außerhalb der Spezifikation	Wöchentliche Kugelstabprüfung	4			252
									Vierteljährliche Laser- Ausrichtung-überprüfung				
				Loch zu klein	Kann nicht an Halterung montiert werden	4		Werkzeugverschleiß	Werkzeugeinrichtung	4	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7	224
								Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2			112
					Schlechte Passgenauigkeit führt zu Spannung in Schraube	8		Gelieferter Bohrer vom Lieferanten hat Untermaß	Werkzeugeinrichtung	2			112
											Konformitätsbescheinigung vom Lieferanten	3	168

Der entscheidende Erfolgsfaktor besteht darin, eine Liste von potenziellen Ursachen zu erstellen, die „kontrollierbar“ sind, d. h. bei denen es eine direkte „Ursache und Wirkung“ gibt. Gute Beispiele sind „Falscher Bohrer verwendet“, „Übermaß“ oder „Spindelausrichtung fehlerhaft“. Mit anderen Worten: Wenn diese Dinge passieren, dann ist das Ergebnis ein nichtkonformes Produkt. Diese Beispiele erlauben uns, eine spezifische Maßnahme zu ergreifen, um sie zu kontrollieren.

Ein häufiges Problem besteht hierbei darin, dass das Team eine lange Liste von möglichen Ursachen identifiziert, die sehr „unscharf“ sind. Zum Beispiel „Bediener befolgt Arbeitsablauf nicht richtig“, „Wartungsfehler“. Diese Beschreibungen sind bei der

Erstellung einer effektiven Prozess-FMEA wertlos, da die erforderlichen Maßnahmen nur schwer zu bestimmen sind.

Eine typische Fehlermöglichkeit für den Bearbeitungsprozess ist „falsches Programm“. Es kann weiter aufgeteilt werden in „falsches Programm - andere Teilenummer“ oder „falsches Programm - falsche Version“. In diesen beiden Beispielen gibt es keine direkte „Ursache und Wirkung“ zwischen diesem Fehler und der Funktionsunfähigkeit eines bestimmten Merkmals. Wenn das falsche Teilenummernprogramm verwendet wurde, führt dies eher zu einem katastrophalen Maschinenfehler und schweren Schäden am Teil und an der Maschine. Nun ist das Laden des falschen Programms ein Problem – es passiert. Da jedoch der Zusammenhang mit einer Fehlermöglichkeit auf „Merkmalsebene“ minimal ist, sollte diese nur einmal in der FMEA aufgeführt werden, d. h. als einzelne Zeile und nicht für jedes Merkmal wiederholt werden.

Das Team sollte davon ausgehen, dass die eingehenden Teile / Werkstoffe korrekt sind. Das Team kann diesbezüglich Ausnahmen machen, aber nur wenn Werte aus der Vergangenheit darauf hindeuten, dass dies ein bekanntes Problem ist.

### **Gefahren durch zu viele Details!**

Allerdings sollten wir vermeiden, zu sehr in Details zu gehen.

In Bezug auf die falsche Platzierung einer Schweißnaht identifizierte ein Team z. B. als mögliche Fehlerursache, dass das Teil nicht richtig in der Spannvorrichtung eingesetzt war. Das ist richtig.

Dann jedoch begann das Team alle Gründe aufzulisten, warum das Teil falsch in die Vorrichtung eingespannt werden könnte (Bedienfehler, Spannvorrichtung verschlissen, beschädigt usw.). Diese zusätzlichen Details leisten keinen weiteren Beitrag zur PFMEA außer „Teil liegt falsch in der Spannvorrichtung“.

Ein anderes Beispiel wäre „Bohrloch-Übermaß“. Eine der Ursachen wäre, dass das Werkzeug überdimensioniert ist (z. B. der Bohrer). Dafür kann es mehrere Gründe geben, wie zum Beispiel, dass der falsche Bohrer verwendet wurde, der Bohrer vom Lieferanten überdimensioniert war, vom Bediener falsch eingestellt wurde usw. Auch hier sollte die Fehlermöglichkeit als „Bohrerübermaß“ aufgeführt werden und nicht unbedingt jeder Grund, warum der Bohrer möglicherweise überdimensioniert ist. Diese individuellen Gründe können später in den Spalten Prävention und Erkennung aufgeführt werden.

Es muss sehr darauf geachtet werden, unnötige Details zu vermeiden, da wir sonst „den Wald vor lauter Bäumen nicht sehen“.

Teams denken über diesen Abschnitt der PFMEA oft zu viel nach. Die Verwendung von Ursache- Wirkungs-Diagrammen zur Erstellung langer Listen potenzieller Ursachen durch Brainstorming von 'Maschine', 'Methode', 'Umfeld', 'Mitarbeiter', 'Wartung', etc. ist in der Regel nicht erforderlich.

In der Regel wird der Prozess vom Fertigungsingenieur, Wartungsingenieur und Bediener usw. gut verstanden. Durch die logische Aufteilung des PFMEA-Formblatts kann eine einfache Liste aus diesem kombinierten Wissen meist problemlos erstellt werden.

Die Liste sollte auf Möglichkeiten untersucht werden, ähnliche Ursachen zu gruppieren, oder zu hinterfragen, ob die mögliche Ursache wirklich mit der Fehlermöglichkeit verknüpft ist.

## **j) Vermeidungsmaßnahmen**

Für jede mögliche erkannte Ursache müssen wir nun identifizieren, welche Maßnahmen vorhanden sind (oder nicht), um sicherzustellen, dass die potenzielle Ursache nicht auftreten kann.

Am effektivsten ist die Fehlervermeidung z. B. Vorrichtungen, die verhindern, dass das Teil falsch geladen wird. Für Merkmale mit schweren Folgen müssen wir eine derartige Vermeidung unbedingt anstreben.

Es gibt bestimmte Maßnahmen, die zwar keine Fehlervermeidung bieten, aber von vornherein verhindern, dass die mögliche Ursache eintritt z. B. Kalibrierung, Wartung, usw.

Zum Beispiel: Bei unserem PFMEA-Beispiel sehen wir, dass eine der möglichen Ursachen für „Loch-Übermaß“ darin liegt, dass die „Spindelausrichtung fehlerhaft“ ist. In diesem Fall hat das Unternehmen dieses Problem erkannt und einen Wartungsplan eingeführt, um die Spindelausrichtung mit zwei Methoden zu überprüfen.

a) eine wöchentliche Kugelstabprüfung durch den Bediener und

b) eine vierteljährliche Laserausrichtungsüberprüfung durch das Wartungsteam.

Vorausgesetzt, dass diese beiden Aktivitäten und alle erforderlichen Korrekturmaßnahmen planmäßig durchgeführt werden, dürfte ein „Loch-Übermaß“ durch falsche Spindelausrichtung kaum noch auftreten.

Ein anderes Beispiel wäre „Werkzeug-Übermaß - falsches Werkzeug verwendet“. Es mag logisch erscheinen, die Maßnahme „Wird vom Bediener während der Einrichtung kontrolliert“ zu spezifizieren. Dies kann aber nur der Fall sein, wenn eindeutig nachgewiesen wird, dass die Rüstkontrollen diesen Fehler wirklich finden würden, indem z. B. das Werkzeug in jedem Werkzeughalter mit einem Barcode versehen wird. Wenn eine Maßnahme nicht spezifisch ist, dann sollte sie nicht aufgeführt werden.

### **Inakzeptable Vermeidungsmaßnahmen**

Ein weiteres Beispiel, bei dem Vorsicht geraten ist, betrifft die Maßnahme „Bedienerschulung“. Kann so wirklich eine mögliche Ursache wirklich „verhindert“ werden? Die Gefahr besteht darin, dass das Team nach einem solchen Vermerk fortfährt, ohne zu fragen, „Welche besseren Maßnahmen könnten wir verwirklichen“. Wenn die einzige Maßnahme „Bedienerschulung“ ist, sollten wir deren Wirksamkeit in Frage stellen – möglicherweise ist es besser, eine solche Maßnahme überhaupt nicht erst aufzunehmen.

Wenn derzeit wirklich keine präventiven Maßnahmen für diese spezielle potenzielle Ursache existieren, sollten Sie bereit sein, „Keine“ in diese Spalte zu schreiben. Es kann sein, dass diese Lücke dann im Rahmen von Verbesserungsmaßnahmen geschlossen wird.

**ACHTUNG:** Die identifizierten Maßnahmen müssen die Ursache tatsächlich „verhindern“ können, und nicht nur „die Wahrscheinlichkeit des Auftretens verringern“. Dies werden Aktivitäten sein, die die Ursache von vornherein ausschließen, anstatt sie zu einem späteren Zeitpunkt ausfindig zu machen.

Ein häufiger Fehler besteht darin, hier Maßnahmen aufzuzählen, die die mögliche Ursache entdecken, anstatt sie zu verhindern. Zum Beispiel ist eine Werkzeugkontrolle am Ende des Prozesses, um sicherzustellen, dass es nicht gebrochen ist, keine Vermeidungs-, sondern eine Entdeckungsmaßnahme.

### **k) Auftretenswahrscheinlichkeit**

Die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit untersucht das potenzielle Risiko für das Auftreten einer möglichen Fehlerursache. Wie bei der Bewertung des Schweregrads geschieht dies auf einer Skala von 1 bis 10, wo 10 „fast immer der Fall“ und 1 „tritt nie auf / unwahrscheinlich“ bedeuten.

Jede potenzielle Ursache muss separat bewertet werden.

Typische Datenquellen sind: vom Kunden übersehene Problemteile, Prozessfähigkeitsdaten (Cp, Cpk), Teile pro Million (PPM), Gewährleistungskennzahlen usw.

### **Vorsicht bei der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit**

Die Fähigkeit, das Auftreten einzelner potenzieller Ursachen zu bewerten, hängt von den vom Unternehmen erfassten Daten ab. In vielen Fällen stehen diese für die einzelnen Ursachen möglicherweise nicht zur Verfügung, sodass andere Optionen in Erwägung gezogen werden müssen.

1. Verwenden Sie die gleiche Punktzahl für jede mögliche Ursache. Wenn wir z. B. wissen, dass ein „Loch-Übermaß“ bei etwa 500 Teilen pro Million (1 Teil pro 2000) auftritt, würde die Bewertungstabelle den Wert 4 erhalten. Wir könnten die gleiche Punktzahl für alle identifizierten Ursachen verwenden.

Der Nachteil dieser Methode ist, dass sie das Auftreten dieser Ursache überschätzt und alle Ursachen gleich bewertet. Wenn wir jedoch keine besseren Informationen haben, kann dies der einfachste Weg sein, bis weitere Daten verfügbar sind.

Bei etwas mehr Sachkenntnis über die Hauptursachen können wir unsere technische Erfahrung nutzen, um jeder Ursache die entsprechende Punktzahl zuzuordnen.

Zum Beispiel sollten sich die drei Elemente auf die gleiche Summe addieren (1 pro 2000), aber unsere technische Erfahrung sagt uns, dass eine falsche Spindelausrichtung die wahrscheinlichste Ursache ist, während die Verwendung eines falschen oder zu großen Bohrers höchst unwahrscheinlich ist. Wir können eine Punktzahl von 4 für die „Spindelausrichtung“ vergeben und eine Punktzahl von 2 oder 3 für die beiden anderen möglichen Ursachen zuweisen.

Wie wir sehen, ist dies keine exakte Wissenschaft, wir müssen jedoch sicherstellen, dass wir keine individuellen Ursachen „unterbewerten“ und deshalb später keine Maßnahmen ergreifen.

**Tabelle 6: AS13004 Auftretenswahrscheinlichkeit für Prozess-FMEA**

Bewertung	Beschreibung	Prozess PPM	Wahrscheinlichkeit der Ursache (AIAG Referenz)	Zeitbasiertes Beispiel	Wahrscheinlichkeit der Ursache	Zeitbasiertes Beispiel
					Kleinserienfertigung	
10	Sehr hoch: Dauerhafter Ausfall (Ausfälle sind fast unvermeidlich)	500.000 PPM	1 pro 2	≥ 1 pro Vorkommen pro Schicht	100% der Produktion	≥ 1 pro Vorkommen pro Schicht
9	Sehr hoch: Dauerhafter Ausfall (Fehler treten sehr oft auf)	50.000 PPM	1 pro 20	≥ 1 pro Vorkommen pro Tag	50% der Produktion	≥ 1 pro Vorkommen pro Tag
8	Hoch: Häufige Ausfälle (wiederholte Ausfälle)	20.000 PPM	1 pro 50	≥ 1 pro 2-3 Tage	20% der Produktion	≥ 1 pro 2-3 Tage
7	Hoch: Häufige Ausfälle (Ausfälle treten häufig auf)	10.000 PPM	1 pro 100	≥ 1 pro Woche	10% der Produktion	≥ 1 pro Woche
6	Relativ hoch: Gelegentliche Ausfälle	5000 PPM	1 pro 200	≥ 1 pro 1 Wochen	5% der Produktion	1 pro Monat
5	Mäßig: Gelegentliche Ausfälle (Kleinerer Umfang)	1000 PPM	1 pro 1000	≥ 1 pro Quartal	0.5% der Produktion	2 pro Jahr
4	Relativ niedrig: Seltene Ausfälle	100 PPM	1 pro 10.000	≥ 1 pro Halbjahr	0.1% der Produktion	1 pro Jahr
3	Niedrig: Relativ wenige Ausfälle	10 PPM	1 pro 100.000	≥ 1 pro Jahr	0.05% der Produktion	1 pro 5 Jahre
2	Niedrig: Ausfälle sind selten (einzelne Vorfälle)	1 PPM	1 pro 1.000.000	< 1 pro Jahr	0.01% der Produktion	1 pro 10 Jahre
1	Unwahrscheinlich: Fehlervermeidung durch vorbeugende Kontrolle	Null	Null	Nie	Weniger als 0,01% der Produktion	<1 pro 10 Jahre

## **l) Entdeckungsmaßnahmen**

Dies ist eine Beschreibung aller Möglichkeiten, mit denen die Fehlermöglichkeit (und die **wichtigsten** potenziellen Ursachen) während des gesamten Prozesses kontrolliert oder auf Konformität geprüft werden.

In der Regel geschieht dies in Form von Prozesskontrollen durch den Bediener, automatisierte Kontrollen, Fehlervermeidung oder durch formale Prüfverfahren.

Das Team sollte alle vorhandenen Kontrollen dokumentieren und diesen jeweils eine Punktzahl in der Bewertungstabelle zuweisen.

Da wir wissen, dass jede potenzielle Ursache einen eigenen RPZ-Wert hat, ist es wichtig zu erkennen, dass jede Entdeckungsmaßnahme deshalb auf jede mögliche Ursache ausgerichtet sein muss.

Wenn wir zum Beispiel Lochdurchmesser mit einer Koordinatenmessmaschine am Ende der Linie kontrollieren, würde diese Entdeckungsmethode in unserer Bewertungstabelle (siehe Tabelle 4) die Punktzahl 7 erhalten.

Diese Punktzahl würde für alle potenziellen Ursachen jeder Fehlermöglichkeit in Bezug auf „Lochbohren“ gelten.

Wenn es irgendwelche anderen Entdeckungsmethoden gibt, die für bestimmte mögliche Ursachen verwendet werden, dann sollten diese in Bezug auf die jeweilige potenzielle Ursache aufgeführt und entsprechend bewertet werden. Weitere Einzelheiten, siehe „Berechnetes Beispiel für die RPZ- Bewertung in einer PFMEA“.

## m) Entdeckungsbewertung

Das Team wertet jede der in der vorherigen Spalte identifizierten Entdeckungsmaßnahmen anhand der Kriterien in der Bewertungstabelle aus.

Dabei gilt es folgende Frage zu beantworten: „Wenn die Fehlermöglichkeit eingetreten ist, wie wahrscheinlich ist es, dass wir sie entdecken, bevor das Produkt an den Kunden geschickt wurde?“

Die Bewertung konzentriert sich auf die Methoden, die eingesetzt werden, um die Fehlermöglichkeit zu untersuchen oder zu verhindern. Aber auch auf die Phase des Prozesses, an der die Kontrolle durchgeführt wird, d. h. an der Stelle, an der die Fehlermöglichkeit unmittelbar oder später im Prozess entstehen kann.

In der Bewertungstabelle sind folgende Punkte besonders zu beachten:

- Es existiert kein Verweis auf die Fähigkeit der Messmethode. Es wird davon ausgegangen, dass die jeweils verwendete Messmethode bzw. der Prüfablauf bewährt ist.
- Die einzige Möglichkeit eine Punktzahl von weniger als 5 auf der Skala zu erreichen, besteht darin, automatisierte Kontrollen zur Entdeckung der Fehlermöglichkeit (Bewertungszahl 2 bis 4) oder eine automatisierte Kontrolle zur Verhinderung der potenziellen Ursache der Fehlermöglichkeit zu verwenden (Bewertungszahl 1).

**Tabelle 7: AS13004 Bewertungstabelle für die Entdeckung**

Bewertung	Wahrscheinlichkeit der Erkennung durch Prozesskontrolle – Kategorie	Wahrscheinlichkeit der Erkennung durch Prozesskontrolle - Kriterien
10	Absolute Ungewissheit	Keine aktuelle Prozesskontrolle; nicht erkannt oder Compliance-Analyse kann nicht durchgeführt werden
9	Schwer zu erkennen	Defekt (Fehlermöglichkeit) bzw. Fehler (Ursache) ist nicht leicht zu erkennen (z. B. Stichproben)
8	Fehlererkennung nach Bearbeitung	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) nach Bearbeitung durch Bediener mittels visueller/taktiler/auditierbarer Mittel ohne Grenzmuster
7	Fehlererkennung an Quelle	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) an der Station durch Bediener mittels visueller/taktiler/akustischer Mittel oder nach Bearbeitung durch Attributenprüfung (gut/nicht gut, manuelle Drehmomentkontrolle/Knickschlüssel, etc.) ohne Grenzmuster.
6	Fehlererkennung nach Bearbeitung	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) nach Bearbeitung durch Bediener mittels Messlehre oder an der Station durch Bediener mittels Attributenprüfung (gut/nicht gut, manuelle Drehmomentkontrolle/Knickschlüssel, etc.) mit Grenzmuster.
5	Fehlererkennung an Quelle	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) oder Fehler (Ursache) an der Station durch Bediener mittels Messlehre oder durch automatische Kontrollen, die abweichende Teile erkennen und den Bediener benachrichtigen (Licht, Summer usw.). Messungen bei Einrichtung und Erststückkontrolle (nur für Einrichtungsursachen)
4	Fehlererkennung nach Bearbeitung	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) nach Bearbeitung durch automatisierte Kontrollen, die abweichende Teile erkennen und sperren, um deren Weiterverarbeitung zu verhindern.
3	Fehlererkennung an Quelle	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) an der Station durch automatisierte Kontrollen, die abweichende Teile erkennen und in der Station automatisch sperren, um deren Weiterverarbeitung zu verhindern.
2	Fehlererkennung bzw. Fehlervermeidung	Erkennung von Fehlern (Ursachen) an der Station durch automatisierte Kontrollen, die Fehler erkennen und verhindern, dass abweichende Teile hergestellt werden
1	Erkennung nicht anwendbar	Vermeidung von Fehlern (Ursachen) durch Vorrichtungsdesign, Maschinendesign oder Bauteildesign

### n) Risiko-Prioritätsbewertung

Die nächste Stufe der Prozess-FMEA ist die Berechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ) für jede mögliche Ursache einer bestimmten Fehlermöglichkeit.

Die Berechnung ist ganz einfach.

Bedeutung x Auftretenswahrscheinlichkeit x Entdeckungswahrscheinlichkeit = RPZ

Für den Bedeutungswert verwendet wird die höchste Zahl für die Fehlermöglichkeit, d. h. das Schlimmste, was passieren könnte.

Zur Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit für jede Fehlermöglichkeit wird eine RPZ- Bewertung für jede mögliche Ursache gegeben, die für eine bestimmte Fehlermöglichkeit identifiziert wurde.

Die Entdeckungsbewertung ist die beste (niedrigste) Punktzahl. Vorausgesetzt, dass alle Teile durch jeden Prüfpunkt gehen, fängt so die effektivste Entdeckungsmaßnahme die Fehlermöglichkeit auf, bevor das Produkt an den Kunden geht.

**Abbildung 23: RPZ-Bewertungsbeispiel**

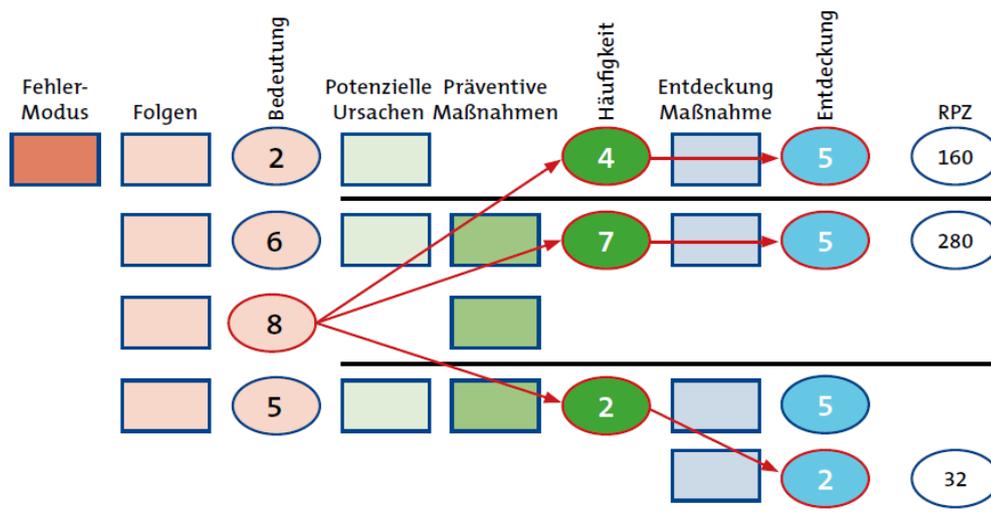


Abbildung 23 zeigt, dass wir zur Berechnung der RPZ folgende Werte für die Fehlermöglichkeit auswählen:

1. Die **HÖCHSTE** Bedeutungszahl, multipliziert mit
2. **JEDER** Auftretenswahrscheinlichkeit, dann multipliziert mit
3. Der **NIEDRIGSTEN** Entdeckungszahl für jede Fehlermöglichkeit und jede potenzielle Ursache (sofern relevant).

Es gibt daher drei RPZ, eine für jede mögliche Ursache.

Häufig lohnt sich eine schnelle Plausibilitätsprüfung durch die Berechnung der „Gesamt-RPZ“ für eine Fehlermöglichkeit.

1. Wir können die Bedeutungszahl für eine bestimmte Fehlermöglichkeit leicht bestimmen, also verwenden wir diese.
2. Die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit für eine einzelne Ursache kann ziemlich schwierig sein, aber die Gesamtfehlerrate für die Fehlermöglichkeit sollte relativ einfach bestimmbar sein, so dass wir diese ebenfalls verwenden können.
3. Die Entdeckungsbewertung, besonders wenn sie mit Kontrollen verbunden ist, lässt sich ebenfalls recht einfach bestimmen, sodass wir diesen Wert verwenden können.

Durch Berechnung dieser drei Werte erhalten wir eine Annäherung an das Risikoprofil für diese Fehlermöglichkeit, die wir dann mit unseren einzelnen RPZ-Werten für jede mögliche Ursache vergleichen können. Wir können dann die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit bei Bedarf für die einzelnen Werte anpassen.

## **o) Verbesserungsmaßnahmen**

Trotz der Stringenz einer gut gemachten Prozess-FMEA hat diese nur dann einen Wert, wenn wir auf das Risikoprofil entsprechend reagieren.

Der Schwerpunkt muss auf jenen Risiken liegen, die einen hohen Schweregrad besitzen, unabhängig von den anderen ermittelten Werten. Welche weiteren Maßnahmen müssen wir ergreifen, um die RPZ dieser Problempunkte zu reduzieren, damit im Idealfall die Fehlermöglichkeit verhindert wird, oder sich zumindest die Entdeckung des Problems verbessert.

Denken Sie daran, dass die einzige Möglichkeit den Schweregrad zu reduzieren, normalerweise darin besteht, das Produkt neu zu gestalten.

Hohe RPZ-Werte müssen nach unten korrigiert werden. Hierfür gibt es keine Patentrezepte. Vielmehr ist Urteilsvermögen gefragt. Wie viel Risiko sind Sie bereit, zu tolerieren?

Einige RPZ werden nach dem Paretoprinzip als übermäßig hoch hervorstechen und sind eindeutig verbesserungsbedürftig.

Einige Unternehmen verwenden einen RPZ-Schwellenwert, um zu entscheiden, welche RPZ-Werte verbessert werden sollen. Dies kann gefährlich sein, da Teams bald lernen, wie man eine Punktzahl erhält, die unter den Schwellenwert fällt (schließlich ist es alles andere als eine genaue Wissenschaft).

Eine weitere Strategie besteht darin, sich das Profil anzuschauen, um zu sehen, wo die Daten ein „Abflachen der RPZ-Werte“ zeigen. Die Risiken links von diesem Punkt sollten hinsichtlich möglicher Verbesserungen in Betracht gezogen werden.

Denken Sie daran, dass unser Ziel die kontinuierliche Reduzierung des Gesamtrisikos sein sollte – dies ist ein permanenter Prozess, der nie aufhört.

Verbesserungsmaßnahmen sollten in der PFMEA dokumentiert werden und nach der Umsetzung überprüft werden. Anschließend kann der RPZ-Wert neu berechnet werden, um die Wirkung der Verbesserungsmaßnahme zu messen.

**Abbildung 24: RPZ-Verbesserungsmaßnahmen in einer PFMEA**

keits- und Einflussanalyse (PFMEA)															
Ansprechpartner / Telefon		A. Day (Man. Engineering) 07771 255 5521			Datum (Orig.)		01.02.17								
Core Team		E. Zee (Engineering), G. Knight (VorgangsOperations), B. Wright (Quality), I. Care (Maintenance)			Kunden-Genehmigungsdatum										
Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ	Ergebnisse						
									Empfohlene Maßnahme	Verantw. & Zieldatum	Getroffene Maßnahmen	Bedeutung	Auftreten	Entdeckung	RPZ
Teil kann während des Betriebs vibrieren, führt zu Halterungsbruch und Systemausfall	9	KCF	Falscher Bohrer verwendet	Werkzeugeinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses (OP220)	7	126							
			Gelieferter Bohrer hat Übermaß	Nur Konformitätsbescheinigung	3				189						
				Werkzeugeinrichtung	2				126						
Teil muss verschrottet werden, wenn es während der Herstellung entdeckt wird	6		CNC-Spindelausrichtung außerhalb der Spezifikation	Wöchentliche Kugelstabprüfung	4			252	Verschieben der Bohrlochgrößenprüfung in den OP10-Prozess	G. Day 01.03.17	Mikrometermessung der Bohrung für OP10 eingeführt (27.02.17) MSA 10% - akzeptabel	9	2	5	90
				Vierteljährliche Laser-Ausrichtung-überprüfung						Monatliche Überprüfung der Laserausrichtung	G. Day 20.02.17	Ausrichtungsprüfung jetzt monatlich und Abnahmegrenzen um 40% reduziert (20.02.17)	9	2	5
Kann nicht an Halterung montiert werden	4		Werkzeugverschleiß	Werkzeugeinrichtung	4			224	Werkzeugstandzeit spezifiziert auf max. 10 Teile vor Werkzeugwechsel	G. Day 20.02.17	Werkzeugstandzeit im CNC-Programm enthalten (19.02.17)	8	2	5	80

## Berechnetes Beispiel für die RPZ-Bewertung in einer PFMEA

Nehmen wir an, dass die Fehlermöglichkeit „Lochdurchmesser zu groß“ ist. Das Team hat vier potenzielle Folgen identifiziert.

1. Geringfügige Abweichungen müssen möglicherweise akzeptiert werden, geringfügige Betriebsstörungen, Kunde würde es nicht bemerken = Schweregrad 2.
2. Könnte zu Vibrationen in einem Untersystem führen und Auswirkungen auf die Produktleistung haben, die der Kunde bemerken würde = Schweregrad 6.
3. Kann Vibrationen im Triebwerk verursachen, die zu vorzeitigem Verschleiß und potenziellem Produktversagen führen (nicht sicherheitsrelevant) = **Schweregrad 8**.
4. Könnte Vibrationsgeräusch verursachen, das der Kunde bemerken würde = Schweregrad 5. Deshalb wird in diesem Beispiel der höchste Schweregrad (8) verwendet.

Das Team hat drei mögliche Fehlerursachen identifiziert:

5. Falscher Bohrer (überdimensioniert). Für diese mögliche Ursache gibt es keine definierte Vorbeugungsmaßnahme.
6. Spindelverschleiß auf CNC-Maschine. Das Unternehmen hat zwei Möglichkeiten, diese potenzielle Ursache zu verhindern (a) Kugelstabprüfung, die wöchentlich vom Bediener durchgeführt wird, und (b) Laserausrichtungsprüfung, die vom Wartungspersonal alle 6 Monate durchgeführt wird.
7. Beschädigtes Werkzeug (Bohrer). Die Maschine verfügt über ein integriertes Programm, das für jedes Werkzeug vor dem Einsatz ein optisches Vergleichssystem verwendet, um Beschädigungen festzustellen.

Für jede identifizierte mögliche Ursache wird die Auftretenswahrscheinlichkeit bewertet.

### **Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit**

Das Team weiß, dass dies ein problematisches Merkmal mit einer engen Toleranz ist. Es verursacht etwa 15 % der nichtkonformen Teile, von denen die meisten akzeptiert werden (geringfügige Abweichung).

Das Team hat keine Daten, die zeigen, wie diese Nichtkonformität genau auf jede der drei Ursachen zurückzuführen ist, und hat sich deshalb für die folgende Logik entschieden.

1. Die wahrscheinlichste Ursache ist der Spindelzustand. Die Daten zeigen eine breite Streuung der Ergebnisse und eine Cp von weniger als 1, die auf die Ungenauigkeit der Maschine zurückzuführen sein könnte. Es wurde eine **Punktzahl von 7** zugewiesen, sodass diese Ursache mindestens die Hälfte des Problems ausmacht.
2. Das Team weiß, dass die Verwendung eines falschen Werkzeugs zuvor bereits passiert ist, wenn auch nur selten (einmal oder zweimal pro Jahr). Da es keine

Präventivmaßnahme für diese potenzielle Ursache gibt, wurde eine **Punktzahl von 4** zugewiesen.

3. Seit seiner Einführung vor über 9 Monaten hat das optische Werkzeugsystem die Verwendung gebrochener Werkzeuge verhindert. Es wurde beschlossen, eine **Punktzahl von 2** (anstatt 1) zu vergeben, da das System noch relativ neu ist.

### **Entdeckungsmethoden und Bewertung**

Der Lochdurchmesser wird vom Bediener mit einer einstellbaren Lehre gemessen, sodass sich eine **Punktzahl von 5** für die Entdeckung ergibt.

Für die drei potenziellen Ursachen wird dieser Entdeckungswert jeweils als Ausgangspunkt angezeigt.

Die Entdeckungsmethoden für „Falsches Werkzeug (Übermaß)“ und „Spindelverschleiß“ beruhen darauf, dass der Bediener die Fehlermöglichkeit an seiner Station mit einem Innenmikrometer kontrolliert. Deshalb wurden beide Fehlermöglichkeiten gemäß den Richtlinien für die Entdeckungsbewertung mit einer '5' bewertet.

Die mögliche Ursache für „Beschädigtes Werkzeug“ kann mit dem in der CNC-Maschine eingebauten Vision-System automatisch erkannt werden. Das Team hat die gleiche Logik wie für die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit angewendet und einen **Entdeckungswert von '2'** zugewiesen.

### **Berechnen der RPZ**

Daraus ergeben sich in unserem berechneten Beispiel folgende drei RPZ-Werte (eine für jede mögliche Ursache):

#### **Mögliche Ursache 1: Falscher Bohrer verwendet (Übermaß)**

Bedeutung 8 x Auftretenswahrscheinlichkeit 4 x Entdeckungswahrscheinlichkeit 5 = 160

#### **Mögliche Ursache 2: Spindelverschleiß**

Bedeutung 8 x Auftretenswahrscheinlichkeit 7 x Entdeckungswahrscheinlichkeit 5 = 280

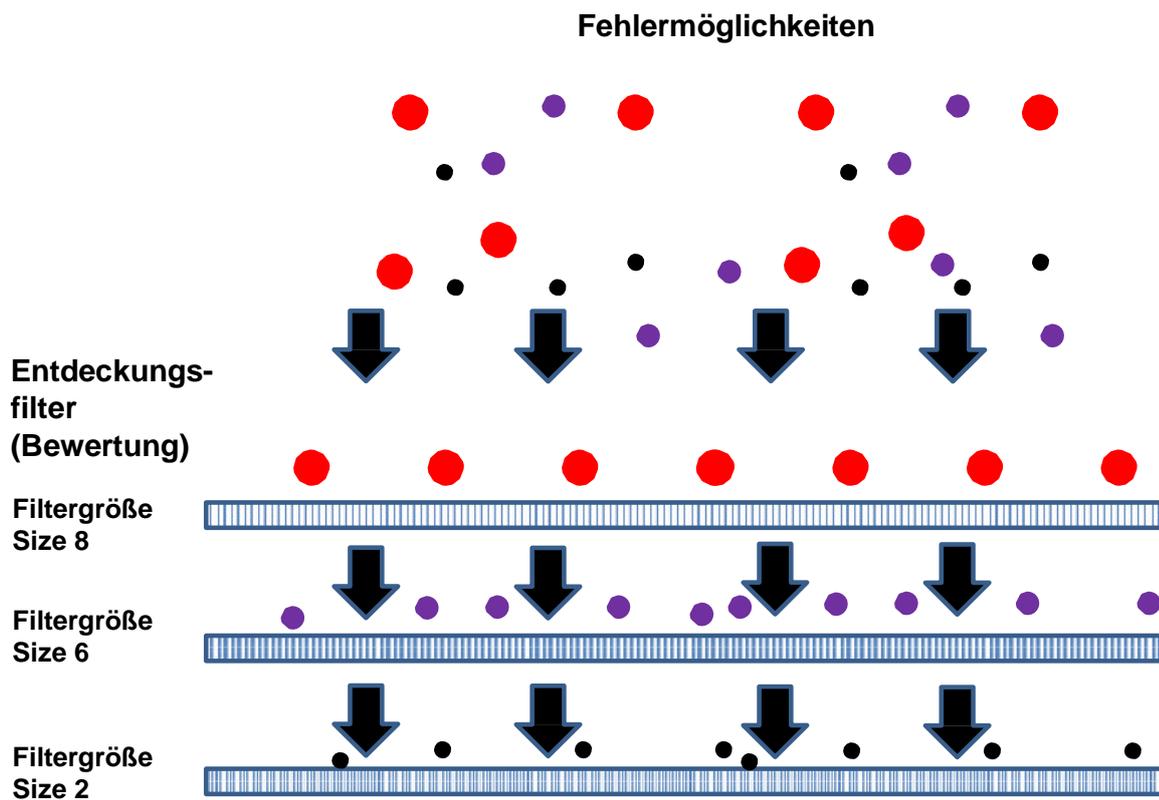
#### **Mögliche Ursache 3: Beschädigtes Werkzeug**

Bedeutung 8 x Auftretenswahrscheinlichkeit 2 x Entdeckungswahrscheinlichkeit 2 = 32

### **Warum wird der niedrigste Entdeckungswert verwendet?**

Die Wahl des niedrigsten Entdeckungswerts (anstatt des höchsten Werts) kann oft zu Verwirrung führen. Betrachten Sie jede Entdeckungsmaßnahme als sei sie wie ein Filterpapier mit unterschiedlichen Porengrößen (1 bis 10). Wenn drei Entdeckungsmethoden mit den Werten 2, 6 und 8 ermittelt wurden, dann könnte die Fehlermöglichkeit am besten vom Filterpapier der Größe 2 aufgefangen werden. Dies ist also die Punktzahl, die wir verwenden würden. Siehe Abbildung 25.

**Abbildung 25: Veranschaulichung der Entdeckungsbewertung**



Sobald die RPZ-Werte für jede Fehlermöglichkeit und potenzielle Ursache berechnet wurden, können sie in Reihenfolge ihres Werts (Paretoprinzip) eingestuft werden.

Es ist nützlich, das Risikoprofil für den gesamten Prozess zu sehen, damit wir die Prozessschritte mit dem höchsten Risiko identifizieren können. Allerdings reicht eine einfache Analyse nicht aus, um festzustellen, welche Maßnahmen ergriffen werden sollen.

# Kapitel 6

## Erstellen von Referenz-FMEA

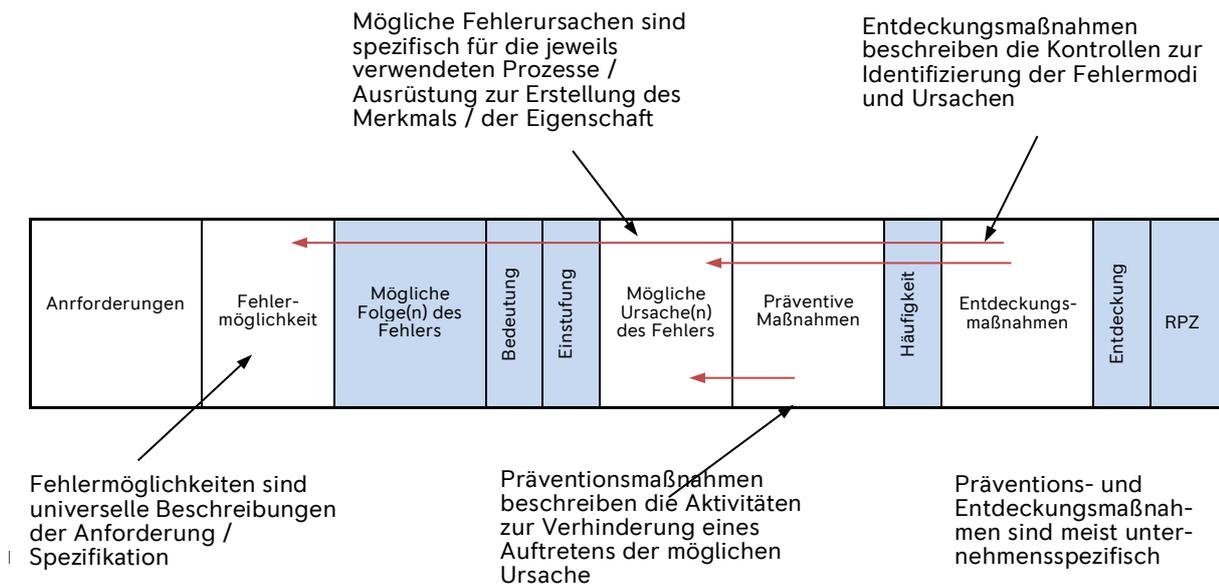
Referenz-Prozess-FMEA sollten von einem bereichsübergreifenden Team entwickelt werden, das aus Manufacturing Engineers, Design Engineers, Maintenance und Operations besteht.

Idealerweise sollten Referenz-PFMEA auf Unternehmensebene gehalten und vom verantwortlichen Prozesseigner (Manufacturing Process Owner) verwaltet werden. Sie sollten im ganzen Unternehmen zum Einsatz kommen, um teilespezifische PFMEA auf möglichst effiziente Weise zu erstellen.

Referenz-PFMEA sind nicht einfach eine „Cut and Paste“ Lösung. Sie nutzen lediglich das Wissen über ähnliche Funktionen und Prozesse und sind nach ihrer Erstellung für mehrere Merkmale der teilespezifischen PFMEA relevant.

Die folgende Abbildung zeigt, was in einer Referenz-PFMEA enthalten sein kann und warum.

**Abbildung 26: Übersicht der Referenz-PFMEA-Elemente**



Die grauen Spalten erfordern spezifische Teileinformationen und können daher erst beim Ausfüllen der teilespezifischen Prozess-FMEA vervollständigt werden.

## **SCHRITT 1: Den zu bewertenden Prozess auswählen**

Eine Referenz-FMEA betrifft jeweils einen Prozesstyp, z. B. CNC-Bearbeitung, Elektronenstrahlschweißen, Drehmomentschrauber, Sandstrahlen usw.

Das Team muss zuerst den Prozesstyp für Auswertung auswählen. Manche Prozesse haben mehrere Teilprozesse. Zum Beispiel kann die CNC-Bearbeitung folgende Teilprozesse haben:

- Drehen
- Schleifen
- Fräsen
- Bohren

Das Team würde sich auf eines dieser Elemente konzentrieren, um eine Referenz-PFMEA zu erstellen.

Die Referenz-PFMEA kann auch gerätespezifisch sein. Einige CNC-Maschinen sind Spezialausführungen, sodass die möglichen Fehlerursachen nur diesen Maschinentyp betreffen. Das Team muss sich entscheiden, ob der beste Ansatz darin besteht, eine universelle Referenz-PFMEA zu erstellen oder ob auch Ableitungen davon entwickelt werden sollen.

## **SCHRITT 2: Definieren Sie die typischen Merkmale und Eigenschaften des zu bewertenden Prozesses**

Jeder Prozesstyp dient dazu, bestimmte Merkmale und Eigenschaften zu erzeugen. Das Team sollte diese für den zu bewertenden Prozess / Teilprozess auflisten. Eine typische Merkmalsmatrix oder Montageanleitung für den Prozess kann dazu beitragen, Merkmale / Eigenschaften zu identifizieren. Das Team muss sich zudem auf typische Zeichnungen und verwandte technische Spezifikationen beziehen.

Beispielsweise wird ein Bohrvorgang auf einer CNC-Maschine die folgenden Merkmale / Eigenschaften erzeugen:

- Lochposition
- Lochdurchmesser
- Lochtiefe
- Loch-Rundheit
- Oberflächen-Finish
- Keine weiße Schicht

Beim Strahlschweißen werden folgende Merkmale / Eigenschaften erzeugt:

- Lage der Schweißnaht
- Schweißnahtlänge
- Breite der Schweißnaht
- Schweißporosität innerhalb Grenzwerte
- Schweißspritzer innerhalb Grenzwerte

Die Referenz-PFMEA sollte so aufgebaut sein, dass das Team spezifische Merkmale aus dem Prozess / Teilprozess auswählen kann, die bei der Erstellung einer teilespezifischen PFMEA verwendet werden sollen.

Definieren Sie alle Eigenschaften / Merkmale, bevor Sie zum nächsten Schritt übergehen.

### Schritt 3: Definieren Sie typische Fehlermöglichkeiten für jedes Merkmal

Konstruktionsmerkmale haben eine universelle und endliche Anzahl von zuweisbaren Fehlermöglichkeiten, unabhängig davon, wie sie produziert werden. Das Team kann diese zuerst ausarbeiten, um die Datenbank der Referenz-FMEA zu definieren.

Beispiele sind in Tabelle 8 dargestellt (siehe auch Anhang B).

**Tabelle 8: Beispiele für Fehlermöglichkeiten**

Merkmal	Fehlermöglichkeit(en)
Länge	Zu lang
	Zu kurz
Durchmesser	Zu groß
	Zu klein
Radius	Zu groß
	Zu klein
Position	Falsche Position
Oberflächenfinish	Zu rau
	Zu glatt
Profilform	Falsches Profil
Rundheit	Unrund
Keine Kratzer / Makel	Kratzer / Makel
Kein pitting	Pitting

Für jede der in „Schritt 2“ aufgeführten Merkmale und Eigenschaften muss das Team nun die relevanten Fehlermöglichkeiten definieren.

Darüber hinaus können universelle Fehlermöglichkeiten auf der Zeichnung oder diesbezüglichen Spezifikationen vermerkt sein, die das Team ebenfalls berücksichtigen sollte, z. B. Beschädigung durch Fremdkörper, Oberflächenbeschaffenheit, Sauberkeit usw., auch wenn diese nicht direkt mit dem Merkmal zusammenhängen, sondern am fertigen Teil beurteilt werden.

#### **SCHRITT 4: Identifizieren Sie mögliche Fehlerursachen nach Prozesstyp**

Die möglichen Ursachen für jede Fehlermöglichkeit hängen vom Prozess ab, der verwendet wird, um das Merkmal / die Eigenschaft zu erstellen.

Zum Beispiel sind beim Bohren eines Lochs mit einem Durchmesser von 10 mm +/-1 mm die Fehlermöglichkeiten gleich, d. h. zu groß oder zu klein. Allerdings unterscheiden sich die möglichen Ursachen für „Loch zu groß“ je nachdem, ob das Loch z. B. auf einer CNC oder per Laserbohren erstellt wurde.

Daher müssen nun Referenz-FMEAs für den jeweiligen Prozesstyp erstellt werden.

In diesem Beispiel betrachten wir „Lochbohrungen“ auf einer CNC-Maschine. Das Team muss entscheiden, ob eine Referenz-PFMEA für den CNC-Bohrvorgang ausreicht, oder ob es verschiedene Arten von CNC-Maschinen gibt, die eine eigene Referenz-PFMEA erfordern.

Dies kann durch einen Blick auf die Liste der möglichen Ursachen für jede Maschine entschieden werden. Wenn diese ähnlich sind, sollte möglichst nur eine Referenz-PFMEA zum Einsatz kommen. Wenn sie sich jedoch deutlich unterscheiden (aufgrund der maschinentechnischen Ausführung zum Beispiel) dann müssen getrennte Referenz-PFMEA erstellt werden.

Das Team sollte alle direkten Ursachen berücksichtigen, die zu einer Fehlermöglichkeit im Produkt führen könnten.

HINWEIS: Dies sind die typischen Spalten, die in eine Referenz-PFMEA aufgenommen werden sollten. Es kann sinnvoll sein, dies in den Spalten Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen fortzusetzen, sofern:

- Es einen gemeinsamen Prozess für Prävention und Erkennung im gesamten Unternehmen gibt.
- Das Unternehmen den Einsatz bestimmter Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen vorschreiben will

Wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, kann das Unternehmen die „typischen Maßnahmen“ als Anleitung für das Team, das die Prozess-FMEA entwickelt, aufnehmen und dem Team erlauben, diese entsprechend zu bearbeiten.

**Abbildung 27: Referenz-PFMEA für CNC-Lochbohrung: Mögliche Fehlerursachen**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (PFMEA) nach Merkmal												
Merkmal / Eigenschaft	Anforderung	Fehlermöglichkeits	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ	
Loch bohren	Durchmesser	Durchmesser zu groß				Falscher Bohrer verwendet						
						Gelieferter Bohrer hat Übermaß						
						CNC-Spindelausrichtung außerhalb der Spezifikation						
		Durchmesser zu klein										Werkzeugverschleiß
												Falscher Bohrer ausgewählt
												Gelieferter Bohrer hat Untermaß
	Tiefe	Zu Tief					Werkzeugeinstellung falsch					
							CNC-Programm-Offset falsch eingestellt					
		Nicht tief genug										Werkzeugeinstellung falsch
												CNC-Programm-Offset falsch eingestellt
												Werkzeugverschleiß

**SCHRITT 5: Identifizierung der Präventionsmaßnahmen, die auf die identifizierten potenziellen Ursachen in der Referenz-PFMEA ausgerichtet sind**

Im nächsten Schritt sollte das Team alle Präventionsmaßnahmen identifizieren, welche die potenziellen Ursachen verhindern können. Wieder sollte sehr darauf geachtet werden, dass diese Präventionsmaßnahmen tatsächlich vorhanden und wirksam sind.

In der Praxis können die Präventionsmaßnahmen für ein bestimmtes Werk oder einen Standort einzigartig sein, daher muss bei der Überprüfung der teilespezifischen PFMEA unbedingt bestätigt werden, dass die aufgeführten Maßnahmen „tatsächliche Praxis“ sind und nicht nur ein Verweis auf bewährte Verfahren eines anderen Unternehmens.

Es kann jedoch sinnvoll sein, den Teams eine „Startliste“ zu geben, die dann in Hinsicht auf bewährte Verfahren geprüft werden kann.

**Abbildung 28 Präventionsmaßnahmen in einer Referenz-PFMEA**

Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)																					
Entwurf / Prozess			Ansprechpartner / Telefon		Datum (Orig.)					Kunden-Genehmigungsdatum											
Teilenummer	Kernteam																				
Prozess	Anforderungen	Fehlermöglichkeits	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantw. & Zieldatum	Getroffene Maßnahmen	BED	AUFT	ENTD	RPZ			
CNC-Bohrung	Lochdurchmesser	Loch zu groß				Falscher Bohrer verwendet (zu groß)	Werkzeugeinstellverfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße														
						Übergroßer Bohrer (vom Lieferanten)	Werkzeugeinstellverfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße														
						CNC Spindel falsch ausgerichtet	Monatliche Kugelstabprüfung und 6-monatliche Laser-Ausrichtungsprüfungen bei Asset Care (AC012) Monthly ball bar														
						Späne im Werkzeug	Keine														
						Teil sitzt nicht fest in Spannvorrichtung	Einrichtungskontrolle durch Bediener														
		Loch zu klein			Falscher Bohrer verwendet (zu klein)	Werkzeugeinstellverfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße															
					Bohrer zu klein (vom Lieferanten)	Werkzeugeinstellverfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße															
					Bohrerschleiß (zu klein)	Werkzeugeinstellverfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße und Werkzeugstandzeit im Maschinenprogramm															

**SCHRITT 6: Identifizierung von Entdeckungsmaßnahmen für Fehlermöglichkeiten in der Referenz-PFMEA**

Die nächste Aufgabe besteht darin, typische Entdeckungsmaßnahmen für die jeweilige Fehlermöglichkeit zu identifizieren. Diese dienen lediglich als Anhaltspunkt und sollten die neuesten Erkenntnisse von Experten aus der Branche umfassen.

Wie bei den Präventionsmaßnahmen sind diese oft orts- oder geschäftsspezifisch und es muss sorgfältig geprüft werden, ob sie die tatsächlichen Umstände der jeweiligen Anwendung (die teilenummerspezifische PFMEA) widerspiegeln.

Der Global Process Owner kann Mindestanforderungen für bestimmte Entdeckungsmaßnahmen festlegen, die dann auch eingehalten werden müssen. Zum Beispiel kann es eine Standardmethode zur Messung der Oberflächengüte innerhalb einer Bohrung geben, die eine spezifische Messeinrichtung erfordert. Vorgeschriebene Entdeckungsmaßnahmen müssen in der jeweiligen Spalte durch eine Anmerkung hervorgehoben werden.

Wenn aus der teilespezifischen PFMEA hervorgeht, dass die vom Global Process Owner vorgeschriebenen Entdeckungsmaßnahmen nicht vorhanden sind, sollte dieser Umstand als Verbesserungsmaßnahme innerhalb der PFMEA identifiziert werden.

**Abbildung 29: Identifizierung typischer Entdeckungsmaßnahmen in der Referenz-PFMEA**

Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)													
Entwurf / Prozess			Ansprechpartner / Telefon								Datum(		
Teilenummer			Kernteam								Kunden-G		
Prozess	Anforderungen	Fehlermöglich- lichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventions- maßnahmen	Auftreten	Entdeckungs- maßnahmen	Entdeckung	RPZ	Empfohle Maßnahm	
CNC- Bohrung	Lochdurch- messer	Loch zu groß				Falscher Bohrer verwendet (zu groß)	Werkzeugeinstell- verfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße		CMM Inspektion bie OP240				
						Übergroßer Bohrer (vom Lieferanten)	Werkzeugeinstell- verfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße						
						CNC Spindel falsch ausgerichtet	Monatliche Kugelstabprüfung und 6-monatliche Laser- Ausrichtungs- prüfungen bei Asset Care (AC012)						
						Späne im Werkzeug	Keine						
					Teil sitzt nicht fest in Spannvorrich- tung		Einrichtungs- kontrolle durch Bediener						
		Loch zu klein			Falscher Bohrer verwendet (zu klein)			Werkzeugeinstell- verfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße		CMM Inspektion bei OP240			
						Bohrer zu klein (vom Lieferanten)		Werkzeugeinstell- verfahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße					
						Bohrerver- schleiß (zu klein)		Werkzeugeinstellver- fahren (TS001) bestätigt Werkzeuggröße und Werkzeugstandzeit im Maschinenprogramm					



# Kapitel 7

## Erstellung einer PFMEA mit Referenz-PFMEA-Bausteinen

Bei einer ausgereiften Produktion wird das Unternehmen eine Datenbank aller Referenz-PFMEA für die verwendeten Prozesse haben. Diese Datenbank enthält bewährte Verfahren für jeden Prozess und ist ein Wissensmanagementsystem, das alle Kenntnisse des Unternehmens zum jeweiligen Prozess enthält.

Die Referenz-PFMEA-Datenbank sollte aktualisiert werden, sobald neue Informationen ans Licht kommen, damit sie über das gesamte Unternehmen geteilt werden können. Auf diese Weise werden sie zu einem wichtigen Bestandteil der kontinuierlichen Verbesserungsmaßnahmen.

Da die Referenz-PFMEA keine produktspezifischen Details enthält, kann sie auch der externen Lieferkette zur Verfügung gestellt werden. Auf diese Weise kann die Wissensmanagement-Datenbank mit den Erfahrungen und dem Wissen aus der externen Lieferkette ergänzt werden, um sie so noch leistungsfähiger zu machen.

Bei der Gestaltung der Dateistruktur für die Referenz-PFMEA ist darauf zu achten, dass diese leicht zugänglich und einsehbar ist.

Ein typischer Aufbau umfasst 4 Ebenen.

### **Ebene 1: Die Prozessgruppe**

Dies ist der allgemeine Name für den Prozess und wird in der Regel durch die Ausrüstung oder den Prozess definiert. Beispiele sind CNC-Bearbeitung, Fügeverfahren, Oberflächenvorbereitung

### **Ebene 2: Prozesstyp**

Hier kann der Prozess in Form der verwendeten Ausrüstung oder einer detaillierteren Prozessbeschreibung genauer definiert werden. Zum Beispiel CNC-Schleifen, CNC-Bohren, CNC-Drehen, Strahlschweißen, Reibschweißen, Oberflächenvorbereitung durch Sandstrahlen usw.

### **Ebene 3: Prozessbeschreibung**

Der Prozesstyp muss konkretisiert werden, wenn es verschiedene Methoden oder Ausrüstungsvarianten gibt, die sich auf die Prozessursachen auswirken. So kann das z. B. das CNC-Schleifen auf einer Mazak CNC andere potenzielle Fehlerursachen haben, als wenn das Teil auf einer Viking Horizontalschleifmaschine bearbeitet wird. In diesem Fall müssen zwei separate Referenz-PFMEA für das CNC-Schleifen erstellt werden, eine für die Mazak und eine für die Viking.

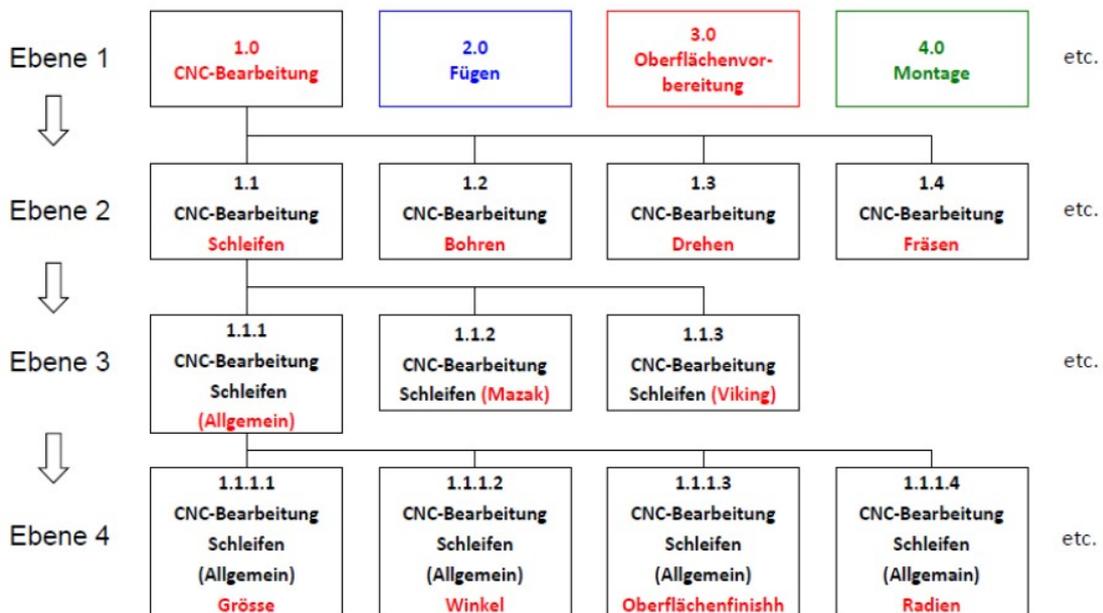
#### Ebene 4: Prozessmerkmale / Eigenschaften

Die Referenz-PFMEA muss nun die typischen Merkmale / Eigenschaften identifizieren, die durch den Prozess / die Ausrüstung erstellt werden sollen. Für den CNC-Schleifbetrieb mit der Mazak könnte dies beinhalten:

- Größe (Länge, Höhe, etc.)
- Radien
- Winkel
- Oberflächengüte

Diese Struktur ist in Abbildung 30 dargestellt.

**Abbildung 30: Beispiel der Datenbankstruktur einer Referenz-PFMEA**



**SCHRITT 1: Wählen Sie die Teilenummer für die PFMEA-Aktivität aus und sammeln Sie alle zugehörigen Unterlagen, die zur Erstellung der PFMEA erforderlich sind**

PFMEA müssen für eine bestimmte Teilenummer oder Baugruppe erstellt werden.

Berücksichtigt werden *alle* Prozessschritte sowie Merkmale, die erstellt werden, um die Entwurfsabsicht zu erfüllen.

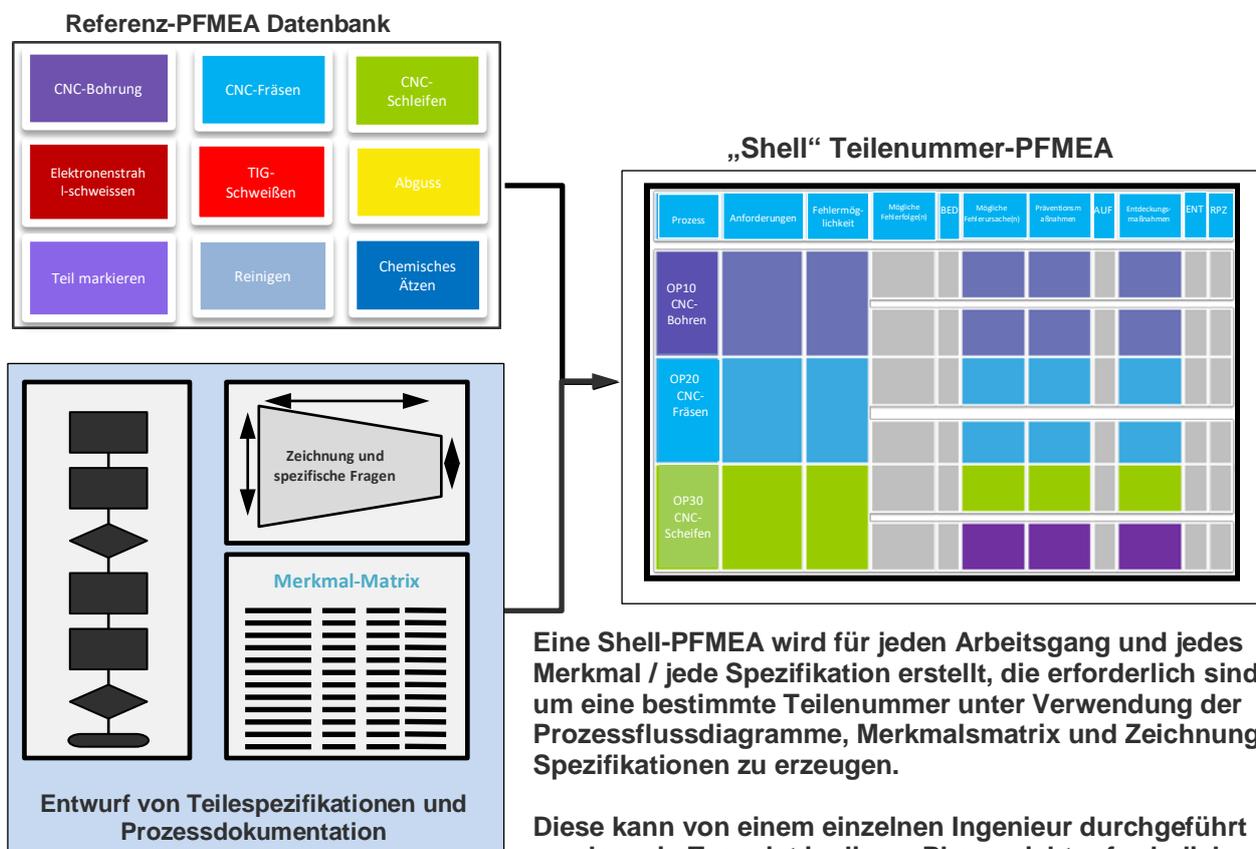
Um eine teilespezifische PFMEA zu erstellen, braucht das Team:

- (1) Teil- / Montagezeichnung(en)
- (2) Die in der Zeichnung verwandten Spezifikationen
- (3) Ablaufdiagramm der Herstellungsmethode
- (4) Produktmerkmalsmatrix mit den bei jedem Prozessschritt erstellten Merkmalen
- (5) Montageanleitung

Die Dokumente sollten überprüft werden, um sicherzustellen, dass diese vollständig und von ausreichender Qualität sind, um eine brauchbare PFMEA zu erstellen.

Diese Dokumente werden verwendet, um die „Shell“-PFMEA für die spezifische Teilenummer unter Verwendung der entsprechenden Referenz-PFMEA zu erstellen, wie in Abbildung 31 gezeigt.

**Abbildung 31: Erstellen einer teilespezifischen „Shell“-PFMEA**



**SCHRITT 2: Füllen Sie die Spalten „Prozessschritt“ und „Anforderung“ der PFMEA mit den in SCHRITT 1 gesammelten Informationen aus.**

Für jeden Vorgang / Prozessschritt werden die jeweils zu erstellenden Konstruktionsmerkmale / Eigenschaften aufgelistet (entnommen aus der Merkmalsmatrix, Teilezeichnung und zugehörigen Spezifikationen).

Die Beschreibung der Entwurfsanforderungen muss ausreichend detailliert sein, damit die Fehlermöglichkeiten leicht identifiziert werden können. Führen Sie für jedes aufgeführte Element die Spezifikationen oder Abnahmekriterien auf.

**Abbildung 32: Vervollständigung der Prozessschritt- und Anforderungsspalte**

Prozessschritte	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung
<b>OP10 CNC Bearbeitung</b>	Loch Nr. 1 Durchmesser 10mm +/- 1mm				
	Loch Nr. 1 Position 100 (x), 350(y) +/- 0.25mm				
	Loch Nr. 2 Durchmesser 10mm +/- 1mm				
	Loch Nr. 2 Position 100 (x), 350(y) +/- 0.25 mm				

Idealerweise sollte dieser Schritt in xFMEA (oder einer ähnlichen FMEA-Software) vorgenommen werden, damit er leicht mit den Referenz-PFMEA verknüpft werden kann.

Obwohl die PFMEA grundsätzlich für jedes Merkmal der Designdefinition erstellt werden sollte, sind bestimmte Ausnahmen und Problemfälle zu berücksichtigen.

A) Merkmalsmuster

Das Risikoprofil (RPZ) eines Merkmals innerhalb einer PFMEA wird aus drei Attributen abgeleitet:

- Mögliche Auswirkungen der Nichtkonformität (Schweregrad), bezogen auf den Zweck des Merkmals,
- Wahrscheinlichkeit, dass es passiert (Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit) im Zusammenhang mit Prozessfähigkeit und Spezifikationsgrenzwerten, und
- Fähigkeit, die Nichtkonformität zu entdecken (Entdeckungsbewertung).

Wenn also mehrere Merkmale vorhanden sind, die denselben Zweck und dieselbe Spezifikation haben, die in gleicher Weise (und im selben Schritt) hergestellt und auf dieselbe Weise überprüft werden, so können diese Merkmale als Muster in einem einzelnen Element innerhalb der PFMEA zusammengefasst werden.

Ein Beispiel hierfür wären Schraubenlöcher, die dazu dienen, ein Teil an einem anderen zu montieren. Nehmen wir an, es werden 26 Löcher verwendet – dann könnten diese in der PFMEA als ein Merkmal betrachtet werden.

**Abbildung 33: Beispiel – Lochmuster**



**B) Profil merkmale**

Einige Teile können ein bestimmtes Profil mit mehreren Prüfpunkten haben, um festzulegen, wie dieses inspiziert werden soll. Verwechseln Sie die Prüfpunkte nicht mit Merkmalen.

Das Merkmal in der PFMEA ist „Profilform“ und nicht die 100 Prüfpunkte, die in der Zeichnung angegeben sind.

Zum Beispiel gibt es an einer Turbinenschaufel mehrere Profilbereiche entlang der Schaufel, die bei Nichtkonformität unterschiedliche Design-Konsequenzen aufweisen. Die Profilbereiche sind in der Zeichnung angegeben, um dies zu berücksichtigen. Jeder separat definierte Profilbereich sollte als getrenntes „Merkmal“ in die PFMEA aufgenommen werden.

**SCHRITT 3: Fügen Sie die relevanten Informationen aus der REFERENZ-PFMEA für jedes aufgeführte Merkmal hinzu.**

Um die Referenz-PFMEA zu ermitteln, die für die Erstellung der teilespezifischen PFMEA erforderlich sind, sollte die Merkmalsmatrix überprüft werden, um die Prozesstypen und Merkmale zu identifizieren, die zum Erstellen des Teils verwendet werden.

Zum Beispiel kommen bei einer Hauptwelle die folgenden Prozesse zum Einsatz, um die definierten Merkmale zu erstellen:

**Abbildung 34: Ermittlung der erforderlichen Referenz-PFMEA**

Vorgang Reihenfolge	Referenz PFMEA Vorg. Typ	Merkmalliste aus Merkmal-Matrix	Erforderliche Referenz-PFMEA
OP100	1.1.2 CNC Schleifen (Mazak)	Länge 100mm +/- 1mm Winkel 75° +/- 2° Oberflächenfinish MAX 1.5 etc.	1.1.2.1 Grösse 1.1.2.2 Winkel 1.1.2.3 Oberflächenfinish etc.
	↓		
OP110.1	1.3.1 CNC Drehen (Allgemein)	∅ 50mm +/- 0.5mm etc.	1.3.1.1 Durchmesser
	↓		
OP110.2	1.1.1 CNC Schleifen (Allgemein)	Länge 10mm +/- 0.1mm Winkel 45° +/- 2° Oberflächenfinish MAX 2.5 etc.	1.1.1.1 Grösse 1.1.1.2 Winkel 1.1.1.3 Oberflächenfinish etc.
	↓		
OP110.3	1.2.1 CNC Bohren (Allgemein)	∅ 40mm +/- 0.1mm Depth 120 mm +/- 1 mm Keine weiße Schicht etc.	1.2.1.1 Durchmesser 1.2.1.2 Tiefe 1.2.1.8 Weiße Schicht
	↓		
OP120	2.2.1 Elektronenstrahl-schweißen (Allgemein)	Schweissnahtposition Porosität innerhalb Grenzwerte Schweißnahtlänge 25mm +/- 1mm etc.	2.2.1.1 Schweissnahtposition 2.2.1.2 Porosität 2.2.1.3 Schweißnahtlänge

In diesem Beispiel werden 5 Arten von Referenz-PFMEA verwendet. Es geht davon aus, dass die Fehlermöglichkeiten auf der Mazak sich von denen der Hermele unterscheiden. Daher wird eine separate Referenz-PFMEA verwendet.

Auf der Merkmalsebene sind 13 Referenz-PFMEA erforderlich, um die aufgeführten Merkmale abzudecken.

Die Referenz-PFMEA umfasst (normalerweise) folgende Informationen:

- Potenzielle Fehlermöglichkeit
- Mögliche Fehlerursachen
- Präventionsmaßnahmen\*
- Entdeckungsmaßnahmen\*

Können standortspezifisch sein. Unternehmen können sich dazu entschließen, eine eigene PFMEA- Untergruppe mit ihren spezifischen Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen zu gründen und diese zur effizienten Erstellung der PFMEA zu verwenden.

**Abbildung 35: Zusammenstellen der 'Shell'-Teilenummer-PFMEA mittels der Referenz-PFMEA**

Vorgang / Schritt	Prozessfunktion / Anforderung	Fehlermöglich- lichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Referenz-PFMEA			RPZ
							Präventions- maßnahmen	Auftreten	Entdeckungs- maßnahmen	
MAZAK CNC SCHLEIFEN	GRÖSSE									
HERMELE DREHEN	Außendurch- messer									
HERMELE SCHLEIFEN	GRÖSSE									
HERMELE BOHREN	DURCHMESSER									
HERMELE BOHREN	TIEFE									
HERMELE BOHREN	POSITION									
ELEKTRONENSTR- AHLSCHEISSEN	SCHWEISSNAHT- POSITION									
ELEKTRONENSTR- AHLSCHEISSEN	SCHWEISSNAHT- LÄNGE									

Die in der Referenz-PFMEA normalerweise enthaltenen Daten sind in der folgenden Abbildung in blauem Text dargestellt. In diesem Beispiel haben wir die Referenz-PFMEA für „CNC-Bearbeitung - Lochbohrung“ verwendet. Wir zeigen hier nur einen Auszug aus der vollständigen Referenz-PFMEA.

Die in der Referenz-PFMEA enthaltenen Informationen sollten lediglich als Ausgangspunkt verwendet werden.

In Schritt 4 muss das Team diese Informationen überprüfen und entscheiden, ob es noch andere Fehlermöglichkeiten, mögliche Ursachen, Präventions- oder Entdeckungsmaßnahmen gibt, die zu berücksichtigen sind.

Wenn keine Referenz-PFMEA zur Verfügung steht, dann sollte das Team diese erstellen, bevor es die Zusammenstellung der PFMEA durchführt (siehe Kapitel 3 zur Erstellung einer Referenz-PFMEA).

Wenn die Referenz-PFMEA einmal erstellt wurde, kann sie an den verantwortlichen Prozesseigner für die laufende Verwaltung und zur Verteilung im restlichen Unternehmen weitergegeben werden.

**Abbildung 36: Beispiel einer Referenz-PFMEA**

Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen
Loch Nr. 1 Durchmesser 10mm +/- 1mm	Loch zu groß				Falscher Bohrer verwendet	Strichcodeleser als Teil der Maschineneinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses
					Übergroßer Bohrer (vom Lieferanten)	Werkzeuggrößenüberprüfung beim Laden in den Werkzeughalter	2	
					Spindelausrichtung	Wöchentliche Kugelstabprüfungen und 6-monatliche Laserausrichtungskontrollen sind Teil des Asset-Care-Programms.	4	
					Späne im Werkzeug	Keine	3	

**SCHRITT 4: Füllen Sie die teilespezifische PFMEA im bereichsübergreifenden Team aus**

Sobald das teilespezifische PFMEA-„Gerüst“ mit den Informationen aus den SCHRITTEN 2 und 3 ausgefüllt wurde, sollte das bereichsübergreifende Team zusammengebracht werden, um die gesammelten Informationen zu überprüfen.

Das bereichsübergreifende Team sollte Manufacturing Engineering, Design Engineering, Operations, Maintenance und Quality (je nach Bedarf) umfassen. An bestimmten Punkten können auch andere Fachleute hinzugezogen werden, z. B. Werkzeugmaschinenlieferant, Zulieferer, etc.

Das Team muss sicherstellen, dass die aus der Referenz-PFMEA entnommenen Informationen für die jeweilige Teilenummer korrekt sind und notwendige Änderungen vornehmen.

Der nächste Schritt besteht darin, die fehlenden Informationen in den Spalten zu ergänzen, die von der Referenz PFMEA nicht abgedeckt wurden.

Es kann sinnvoll sein, dies in drei Unterschritte aufzuteilen.

4(a) Füllen Sie die Spalte „Folgen“ und „Schweregrad“ für jede identifizierte Fehlermöglichkeit aus (Abbildung 37).

Hier ist es wichtig, die Erkenntnisse aus der DFMEA bzw. vom Design-Team zu nutzen, um die bedeutsamsten Folgen abzuschätzen, falls die Fehlermöglichkeit auftreten sollte. Das Team sollte sich auf die Auswirkungen für den Kunden sowie auf den Schweregrad konzentrieren. Interne Auswirkungen und Schweregrade, die mit Folgen wie Verschrottung, Nacharbeit usw. verknüpft sind, sollten ebenfalls berücksichtigt und protokolliert werden. Dabei gilt es, sich auf die bedeutsamen Folgen und nicht auf jede geringfügige Auswirkung zu konzentrieren. Die RPZ-Punktzahl wird sich auf den höchsten Schweregrad konzentrieren.

Dieser Schritt kann nicht ohne Mitarbeit des Design-Teams durchgeführt werden.

**Abbildung 37: Vervollständigung der Folgen- und Schweregradbewertung**

Prozess	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen
OP 10 CNC- Bearbeitung	Loch #1 Durchmesser 10mm +/- 1mm	Loch zu groß	Schwingung der Halterung führt zu IFSD	8		Falscher Bohrer verwendet	Strichcodeleser als Teil der Maschineneinrichtung
			Teil kann Sonderfreigabe durch Engineering-Abteilung erhalten	4		Übergroßer Bohrer (vom Lieferanten)	Werkzeuggrößenüberprüfung beim Laden in den Werkzeughalter
			Teil muss möglicherweise verschrottet werden	5		Spindelausrichtung	Wöchentliche Kugelstabprüfungen und 6-monatliche Laserausrichtungskontrollen sind Teil des Asset-Care-Programms.
						Späne im Werkzeug	Keine

4(b) Überprüfen Sie die potenziellen Ursachen und Präventionsmaßnahmen aus der Referenz- PFMEA (Abbildung 37).

Das Team sollte die aufgeführten Punkte überprüfen und für die jeweilige Teilenummer ggf. ändern, um den realen Umständen Rechnung zu tragen. Das Team kann ggf. Elemente aus der Referenz- PFMEA hinzufügen oder löschen.

In diesem Beispiel haben wir eine weitere mögliche Ursache und Präventionsmaßnahme (siehe roter Text) hinzugefügt.

Das Team sollte die Leistungsdaten überprüfen, um die Auftretenswahrscheinlichkeit in der PFMEA anhand der Bewertungsrichtlinien in Anhang A zu bestimmen, z. B. Durchschlupf, DPU (inkl. Feature- RFT), Sonderfreigaben etc.

**Abbildung 38: Vervollständigung der Abschnitte zu potenziellen Ursachen, Präventionsmaßnahmen und Auftretenswahrscheinlichkeit.**

Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten
Loch zu groß	Schwingung der Halterung führt zu IFSD	8		Falscher Bohrer verwendet	Strichcodeleser als Teil der Maschineneinrichtung	2
	Teil kann Sonderfreigabe durch Engineering-Abteilung erhalten	4		Übergroßer Bohrer (vom Lieferanten)	Werkzeuggrößenüberprüfung beim Laden in den Werkzeughalter	2
	Teil muss möglicherweise verschrottet werden	5		Spindelausrichtung	Wöchentliche Kugelstabprüfungen und 6-monatliche Laserausrichtungskontrollen sind Teil des Asset-Care-Programms.	4
				Späne im Werkzeug	Keine	3
				Teil sitzt nicht fest in Spannvorrichtung	Einrichtungskontrolle	3

4(c) Überprüfen Sie die Entdeckungsmaßnahmen und die Entdeckungsbewertung. Berechnen Sie die RPZ für jede mögliche Ursache (Abbildung 39).

Das Team sollte dann die Entdeckungsmaßnahmen überprüfen (die aus der Referenz-PFMEA stammen) und nach Bedarf ändern. Entdeckungsmaßnahmen beziehen sich auf die teilespezifischen Prüfungen / Inspektionen, um Fehlermöglichkeiten zu entdecken und mögliche Ursachen zu erkennen.

Typische Entdeckungsmaßnahmen sind die Messung von Merkmalen, Sichtprüfung, Fehlervermeidung (Spannvorrichtungen) usw.

Nach Bestätigung der Entdeckungsmaßnahmen und ihrer Bewertung kann das Team die Risikoprioritätszahl (RPZ) für jede mögliche Ursache in der PFMEA berechnen.

Die RPZ errechnet sich durch Multiplikation des höchsten Bedeutungswerts für die Fehlermöglichkeit mit der Auftretenswahrscheinlichkeit UND dem besten (niedrigsten) Entdeckungswert. Für jede mögliche Ursache in der PFMEA muss es eine RPZ-Punktzahl geben.

**Abbildung 39: Aktualisieren der Entdeckungsmaßnahmen, Entdeckungsbewertung und Berechnen der RPZ**

Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Loch zu groß	Schwingung der Halterung führt zu IFSD	8		Falscher Bohrer verwendet	Strichcodeleser als Teil der Maschineneinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses	6	80
	Teil kann Sonderfreigabe durch Engineering-Abteilung erhalten	4		Übergroßer Bohrer (vom Lieferanten)	Werkzeuggrößenüberprüfung beim Laden in den Werkzeughalter	2			80
	Teil muss möglicherweise verschrottet werden	5		Spindelausrichtung	Wöchentliche Kugelstabprüfungen und 6-monatliche Laserausrichtungskontrollen sind Teil des Asset-Care-Programms.	4	Messschieberprüfung durch Bediener	5	160
				Späne im Werkzeug	Keine	3			120
				Teil sitzt nicht fest in Spannvorrichtung	Einrichtungskontrolle	3			120

**Schritt 5: Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen**

Das Team muss nun das Ergebnis der PFMEA überprüfen und die wesentlichen Risiken sowie die erforderlichen Verbesserungsmaßnahmen identifizieren.

Dies geschieht in einer definierten Reihenfolge:

1. Wo sind die höchsten Bedeutungswerte (8, 9 und 10), deren Auftretenswahrscheinlichkeit ebenfalls hoch ist (7, 8, 9 und 10)? - haben wir genügend Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen, um die Fehlermöglichkeit zu entschärfen?
2. Wo sind die höchsten Bedeutungswerte (unabhängig von Auftretenswahrscheinlichkeit- und Entdeckungswerten) und sind wir mit den Entschärfungsmaßnahmen zufrieden?
3. Wo sind die hohen RPZ-Werte und sind wir mit den aktuellen Entschärfungsmaßnahmen zufrieden?
4. Gibt es irgendwelche einfachen Maßnahmen, um die Gesamt-RPZ zu reduzieren?

Maßnahmen müssen in der PFMEA zusammen mit dem Namen der verantwortlichen Person und dem Zieldatum für die Fertigstellung angegeben werden.

Die überarbeitete RPZ kann auf Grundlage der Verbesserungsmaßnahme berechnet werden, um die Auswirkungen der Verbesserung vorherzusagen, wird aber erst bestätigt, nachdem die jeweilige Maßnahme umgesetzt wurde und sich bewährt hat.

**Abbildung 40: Dokumentation von Verbesserungsmaßnahmen und Neubewertung der RPZ**

Präventionsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ	Kunden-Genehmigungsdatum		BET	AUFT	ENTD	RPZ
					Empfohlene Maßnahme	Verantw. & Zieldatum				
Strichcodeleser als Teil der Maschineneinrichtung	2	CMM-Prüfung am Ende des Prozesses	6	80						
Werkzeuggrößenüberprüfung beim Laden in den Werkzeughalter	2			80						
Monatliche Kugelstabprüfungen und 6-monatliche Laserausrichtungskontrollen sind Teil des Asset-Care-Programms.	2	Messschieberprüfung durch Bediener	5	80						
Keine	3			120						
Einrichtungskontrolle	5			200	Druckluftkontrolle an Spannvorrichtung, um sicherzustellen, dass das Teil korrekt positioniert ist	A. Davies 1. März	Druckluftkontrolle am 27. Februar abgeschlossen	8	1	5

**Tabelle 9: Einige Belange bei der Verwendung von Prozess-FMEAs**

<p><b>Die Prozess-FMEA erfolgt auf generischer Prozessebene und ist nicht teilespezifisch.</b></p> <p>PFMEAs müssen ebenso wie alle Fehlervermeidungsinstrumente für eine bestimmte Teilenummer erstellt werden.</p> <p>Das als RPZ (Risikoprioritätszahl) angegebene Produktrisiko hängt von drei Faktoren ab: (a) dem Zweck des Merkmals und den Folgen, wenn es nicht konform ist (Bedeutung), (b) der Wahrscheinlichkeit seines Auftretens (Auftrittswahrscheinlichkeit) und (c) der Fähigkeit, die Normabweichung zu erkennen, wenn sie auftritt (Entdeckungswahrscheinlichkeit).</p> <p>Wenn die PFMEA die bauteilspezifischen Merkmale nicht berücksichtigt, kann dieses Risikoprofil daher nicht berechnet werden.</p>
<p><b>Die PFMEA kann nicht abgeschlossen werden, da keine DFMEA verfügbar ist.</b></p> <p>Es wird oft angenommen, dass das Prozess-FMEA-Team eine Kopie der DFMEA haben sollte, damit es den Schweregrad für jeden identifizierten Fehlerzustand bewerten kann.</p> <p>In der Praxis ist dies nicht der Fall. Wo DFMEAs verfügbar sind, gehen sie nicht unbedingt in der gleichen Detailgenauigkeit auf die einzelnen Merkmale ein, wie es die PFMEA erfordert. Es wird immer notwendig sein, dass der Designbeauftragte die DFMEA interpretiert, um diese Fragen zu beantworten.</p> <p>Selbst wenn es für das verfügbare Teil keine DFMEA gibt, kann der Designbeauftragte somit die Auswirkungen und den Schweregrad aller Fehlermodi in der PFMEA beschreiben.</p>
<p><b>Die PFMEA wurde ausschließlich vom Bereich Fertigungstechnik erstellt.</b></p> <p>Da die PFMEA das von der Organisation erfasste Wissen darstellt, erfordert sie die Einbeziehung aller Funktionsbereiche, die den betreffenden Konstruktions- und Fertigungsprozess beeinflussen können, insbesondere die Bereiche Konstruktion, Produktion, Instandhaltung, Qualität und den Lieferanten (falls zutreffend).</p>
<p><b>Die PFMEA deckt nur „wesentliche Merkmale“ oder „wesentliche Prozessschritte“ ab.</b></p> <p>Zweck der PFMEA ist es, die Hauptrisiken der Herstellung eines bestimmten Produkts im vorgeschlagenen Fertigungs-/Montageprozess zu ermitteln.</p> <p>Diese Risiken bestimmen, was für den Erfolg ausschlaggebend und damit „wesentlich“ ist. Wenn wir dieses Ergebnis vorwegnehmen, indem wir nur das auswählen, was wir anhand anderer ähnlicher Produkte für wesentlich halten, könnten wir wichtige Aspekte verpassen.</p> <p>Daher ist es für die Wirksamkeit von PFMEAs von entscheidender Bedeutung, dass in ihnen alle Prozessschritte und Merkmale berücksichtigt sind.</p>
<p><b>Die PFMEA umfasst mehr als eine Teilenummer, die als „Teilefamilie“ zusammengefasst sind.</b></p> <p>Häufig herrscht Unklarheit darüber, was eine „Teilefamilie“ ausmacht. Um eine PFMEA für eine Teilefamilie zu erstellen, müssen die betreffenden Teile viele Gemeinsamkeiten aufweisen, d. h. mehr als 80 % der Merkmale müssen identisch sein (Zweck, Spezifikationen, Herstellungsprozess, Prüfprozess etc.).</p> <p>Die PFMEA kann dann für die 80 % der identischen Merkmale gelesen werden; die singulären Merkmale müssen durch einen Anhang zur PFMEA abgedeckt werden. In der Realität wird es nur sehr wenige davon geben, und zwar in der Regel nur dann, wenn es für eine Teilenummer aufgrund von Designproblemen oder einer Leistungsabweichung eine Variante gibt.</p>

### **Die PFMEA hat zu viele potenzielle Ursachen pro Fehlermodus ermittelt.**

Häufig findet das PFMEA-Team eine große Anzahl von potenziellen Ursachen, wobei es solche Instrumente wie die Ursache-Wirkungs-Analyse einsetzt, um so viele Brainstorming-Ideen wie möglich zu sammeln.

Wenn diese potenziellen Ursachen nicht vereinfacht werden, so wird die PFMEA zu komplex und ihr Wert verringert sich. Häufig sind viele der Brainstorming-Ideen Varianten eines einzelnen Themas, z. B. könnte ein Teil, das nicht in der Vorrichtung gehalten wird, unter all diesen Fehlermeldungen beschrieben werden: „falsches Aufspannen auf der Vorrichtung“, „das vom Bediener aufgespannte Teil wird nicht sicher gehalten“, „das Teil bewegt sich während der Bearbeitung aufgrund fehlender Wartung der Aufspannvorrichtung“ oder „Aufspannvorrichtung beschädigt“.

Es muss darauf geachtet werden, diese effektiv zu rationalisieren, damit das Problem durch Präventiv- oder Erkennungskontrollen klar erkannt und kontrolliert werden kann.

### **Die Präventivkontrollen sind nicht wirklich Kontrollen zur „Prävention“.**

Präventivkontrollen sollten Kontrollen sein, die das Auftreten der identifizierten potenziellen Ursache verhindern können. Häufig beinhalten die aufgeführten Präventivkontrollen Aspekte wie „Arbeitsanweisungen“, „Bedienerschulung“, „Richtige Aufspannvorrichtung verwenden“ oder ähnliches. Diese Kontrollen werden das Auftreten der Ursache NICHT verhindern, obwohl es wichtig ist, diese Aspekte zu verwenden.

Präventivkontrollen sollten gewährleisten, das Auftreten der Ursache effizient zu verhindern, z. B. die Auslegung der Aufspannvorrichtung ist fehlerfrei und verhindert so, dass das Teil in falscher Ausrichtung aufgespannt wird, oder das CNC-Sichtsystem überprüft das Werkzeug auf Beschädigungen, bevor der Bearbeitungsvorgang beginnt.

### **Vorgänge werden nicht auf der Grundlage des Risikoschweregrads gesteuert.**

Ganz gleich, wie gut die PFMEA erstellt wird, sie ist nur dann von Wert, wenn sie die Vorgänge so steuert, dass unannehmbare Risiken aus dem Prozess eliminiert oder verringert werden.

Insbesondere für hoch eingestufte Risiken (High Severity Risks) darf das Management nicht zulassen, dass der Prozess entwickelt wird, ohne dass die Risiken durch Fehlervermeidungsmaßnahmen gemindert werden.

Zu oft sehen wir PFMEAs einfach als eine Möglichkeit, zu dokumentieren, „was wir heute tun“ und nicht, „was wir tun MÜSSEN“.

Ermittelt die PFMEA keine Änderungen am Prozess, dann wird sie ihrer Aufgabe nicht gerecht.

### **Die PFMEA ist abgeschlossen, nachdem der Fertigungs-/Montageprozess definiert wurde.**

Zweck der PFMEA ist es, bei der Ermittlung und Entwicklung leistungsfähiger Fertigungs- und Montageverfahren zu helfen. Das Ergebnis einer guten PFMEA sollte eine Reihe von Prozessänderungen (einschließlich Messverfahren) sein.

Wenn die PFMEA erst nach der Vereinbarung der Methode erstellt wird, so ist die PFMEA von begrenztem Wert.

### Weiterführende Literatur:

„AS13004 Process FMEA and Control Plan for Aerospace“, AESQ, 2017

„Potential Failure Mode & Effects Analysis (FMEA), 4th Edition, AIAG, 2008

### PFMEA – Schlüsselfragen:

1. Wurde die PFMEA von einem funktionsübergreifenden Team erstellt, das die Bereiche Fertigungstechnik, Konstruktion, Service, Qualität und den Lieferanten (falls zutreffend) umfasst? Sind die einbezogenen Personen hinsichtlich der FMEA geschult?
2. Ist die PFMEA Teilenummer-spezifisch?
3. Wurde die PFMEA zum richtigen Zeitpunkt im Entwicklungsprogramm begonnen?
4. Umfasst der Umfang der PFMEA alle Prozessschritte und Konstruktionsanforderungen (Merkmale und Spezifikationsanforderungen)?
5. Wurde die PFMEA unter Verwendung der richtigen Vorlage abgeschlossen?
6. Beschreiben die Prozess-Fehlermöglichkeiten, wie die Konstruktionsabsicht in der Fertigung / Montage nicht erfüllt werden könnte? (z. B. Produkteigenschaften)
7. Werden für jeden Fehlerzustand mehrere potenzielle Auswirkungen ermittelt? Wurden die Schweregrade entsprechend den Bewertungskriterien vergeben?
8. Werden für jeden Fehlerzustand mehrere potenzielle Ursachen ermittelt? Beschreiben sie, wie der Fertigungs-/Montageprozess das Auftreten eines Fehlerzustands verursachen / zulassen könnte?
9. Wurden die Bewertungskriterien für das Auftreten der potenziellen Ursachen anhand der genehmigten Bewertungskriterien erstellt? Wurden sie konsequent angewendet?
10. Wurden Präventivkontrollen identifiziert, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der potenziellen Ursache zu eliminieren / zu verringern? Wie effektiv sind sie?
11. Wurden Erkennungskontrollen identifiziert, um das Vorhandensein des Fehlerzustands und/oder der potenziellen Ursache zu erkennen? Wie effektiv sind sie?
12. Wurde die Erkennungsbewertung nach den richtigen Kriterien durchgeführt? Wurde es konsequent angewendet?
13. Wurden Verbesserungsmaßnahmen auf der Grundlage der folgenden Prioritäten ermittelt: (i) High Severity Scores (ii) Kombinationen von High Severity (hohe Bedeutung) und High Occurrence (hohe Auftretenswahrscheinlichkeit), oder (iii) High RPNs.
14. Wurde die PFMEA abgeschlossen, bevor das Prozessdesign formell genehmigt wurde? 15. Ist die PFMEA auf dem neuesten Stand und spiegelt sie aus Vorfällen gezogene Erfahrungen wider?

Siehe auch Prüfliste zur Konformitätsbewertung in Anhang D.



# Kapitel 8

## Kontrollpläne

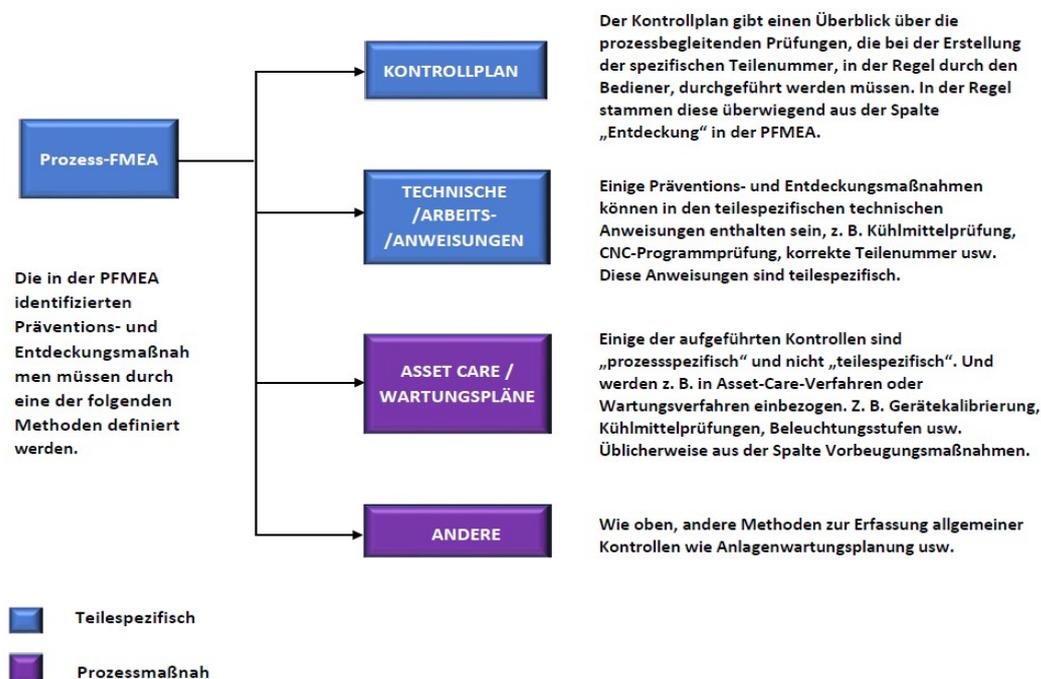
### Erstellung von Produktionslenkungsplänen aus der Process-FMEA

Der Produktionslenkungsplan bietet einen strukturierten Ansatz zur Definition von Wertschöpfungsprozessen und Produktkontrollen, die notwendig sind, um die Konformität des Produkts zu gewährleisten.

Der Kontrollplan wird neben den Arbeits-/Bedieneranweisungen verwendet und enthält eine schriftliche Zusammenfassung der Maßnahmen, die bei der Herstellung eines bestimmten Teils erforderlich sind.

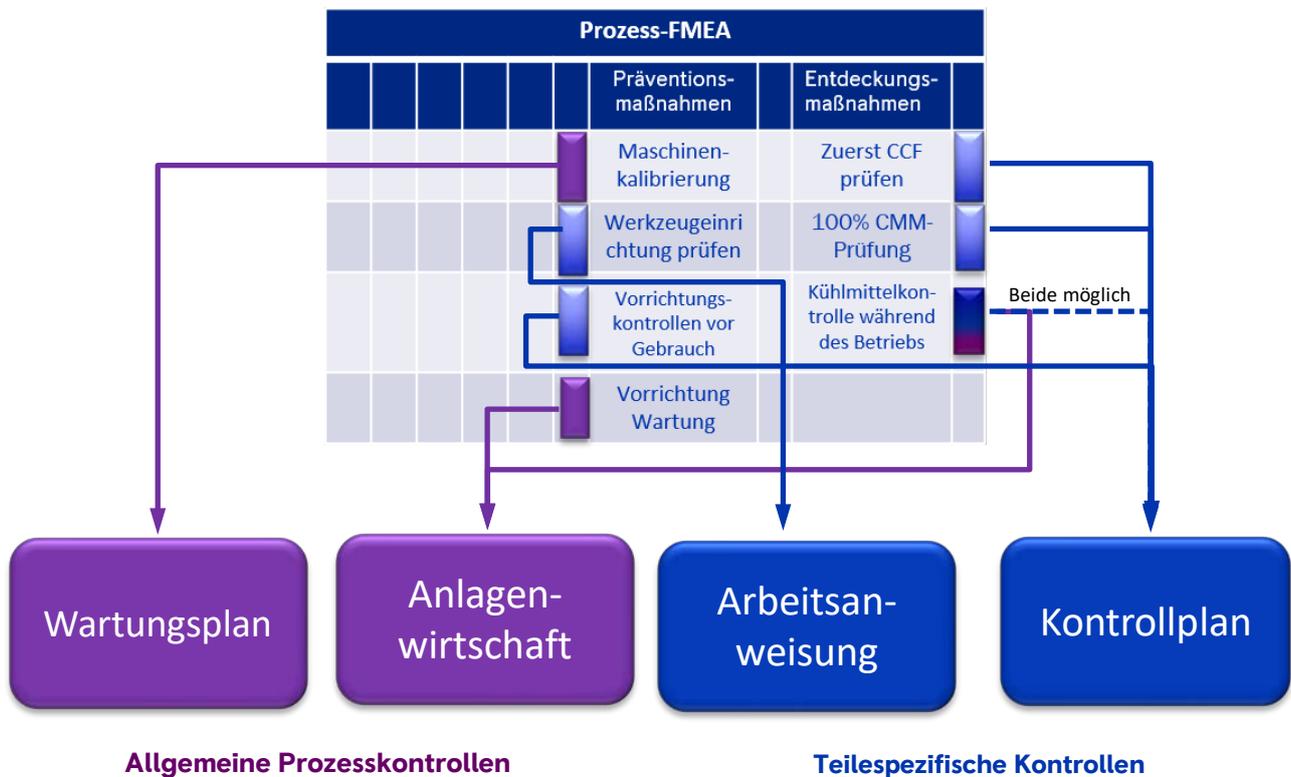
Die Prozess-FMEA identifiziert die notwendigen Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen, die erforderlich sind, um die damit verbundenen Risiken für die hergestellte Teilenummer zu managen. Diese Maßnahmen können in verschiedenen Dokumenten enthalten sein. Der Kontrollplan und die Arbeitsanweisungen erfassen normalerweise die teilespezifischen Maßnahmen, während andere Maßnahmen wie Gerätekalibrierung, Kühlmittelstärke, Umgebungstemperatur und Beleuchtung meist im Wartungsplan oder in den Anforderungen an die Anlagenpflege enthalten sind. Dies ist in Abbildung 41 dargestellt.

**Abbildung 41: Dokumentation der Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen**



Das funktionsübergreifende Team verwendet die Prozess-FMEA, um sicherzustellen, dass alle Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen in der entsprechenden Dokumentation angemessen definiert sind. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 42 dargestellt.

**Abbildung 42 : Wie die Prozess-FMEA Präventions- und Entdeckungsmaßnahmen verwaltet werden.**

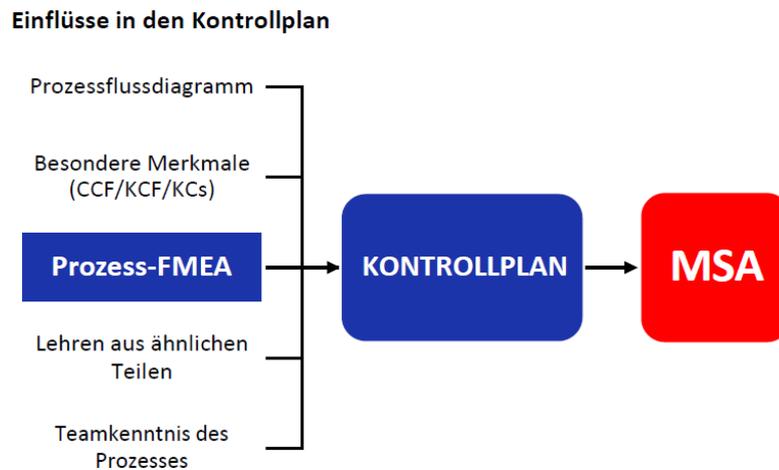


Der Produktionslenkungsplan beschreibt die erforderlichen Maßnahmen, die in jedem Produktionsschritt, vom Wareneingang bis zum Versand, erforderlich sind. Dazu gehören Prüfungen und Inspektionen von Produktmerkmalen wie Durchmesser, Länge, Oberflächenbeschaffenheit, Beschädigung, etc. sowie wichtige Prozesskontrollen wie Temperatur, Druck, Drehmoment, etc.

Das Ziel des Kontrollplans ist es, die Ursachen der Variation des Produkts und des Prozesses zu kontrollieren.

Es ist ein dynamisches Dokument und muss aktualisiert werden, wenn Änderungen am Prozess, am Produktdesign oder an der Prozessfähigkeit vorgenommen werden. Es sollte eine Verbindung zur Prozess-FMEA beibehalten werden.

Der Kontrollplan sollte in einem funktionsübergreifenden Team unter Verwendung der in Abbildung 43 gezeigten Informationen erstellt werden.

**Abbildung 43: Typische Einflüsse in einem Produktionslenkungsplan**

Die Kontrollplan-Methodik wird typischerweise in drei Phasen des Produktlebenszyklus angewendet:

### 1. Prototyp

Dies ist eine Beschreibung der Prüfungen und Tests, die im Prototypenstadium des Entwurfs durchzuführen sind, typischerweise Dimensionsmessungen, Materialeigenschaften und Leistungstests.

### 2. Vorserie

Dies ist eine Beschreibung der Produktverifikationsprozesse, typischerweise Maß-, Material- und Leistungstests, die im Rahmen von APQP und PPAP verwendet werden, um zu validieren, dass das Produkt die Entwurfsabsicht erfüllt.

### 3. Produktion

Diese Kontrollpläne geben einen Überblick über die erforderlichen Kontrollen des Produkts und des Prozesses während der normalen Produktion, um sicherzustellen, dass das Produkt durch die Kontrolle der Variationsquellen (Produkt und Prozess) konform ist.

Eine Standard-Kontrollplanvorlage ist in Abbildung 43 dargestellt. Es können Alternativen verwendet werden, sofern sie mindestens dieselben Informationen enthalten.



Im Folgenden wird beschrieben, was in jedem Teil des Kontrollplans erforderlich ist:

1) Prototyp / Vorserie / Produktion

Kreuzen Sie das Kästchen an, um den Kontrollplantyp anzugeben.

2) Kontrollplannummer

Jeder Kontrollplan sollte eine eindeutige Identifikationsnummer haben.

3) Teilenummer / Letzter Änderungsstand

Geben Sie die Teilenummer des zu steuernden Systems, Subsystems oder der jeweiligen Komponente sowie den Änderungsstand und/oder das Ausgabedatum der Zeichnung ein.

4) Teilname / Beschreibung

Geben Sie den Namen und die Beschreibung des jeweiligen Produktes ein, z. B. Turbine IPT Schaufel, Modul 1 Montage, etc.

5) Organisation / Werk

Geben Sie den Namen des Unternehmens und die entsprechende Abteilung / das Werk ein, in dem die Produktion stattfindet.

6) Organisationscode (Lieferantencode)

Geben Sie die Identifikationsnummer ein, z. B. DUNS, Kundenlieferantencode, wie vom Kunden gewünscht (falls zutreffend).

7) Hauptansprechpartner / Telefon und andere Kontaktinformationen

Geben Sie den Namen, die Telefonnummer und weitere Kontaktinformationen ein, z. B. E-Mail des für den Kontrollplan zuständigen Hauptansprechpartners.

8) Kernteam

Die Namen, Telefonnummern und andere Kontaktinformationen wie E-Mail-Adressen usw. für das Team, das den Kontrollplan erstellt. Es wird empfohlen, diese Liste dem Kontrollplan beizufügen und auf dem neuesten Stand zu halten.

9) Organisation / Werksgenehmigung / Datum

Dies ist ein Beleg dafür, dass das verantwortliche Produktionswerk den Kontrollplan genehmigt hat.

10) Datum (Original)

Das Datum, an dem der ursprüngliche Kontrollplan erstellt (veröffentlicht) wurde

11) Datum (Überarbeitung)

Dies ist das Datum der letzten Überarbeitung des Kontrollplans.

12) Technische Freigabe vom Kunden / Datum

Einholen der technischen Freigabe vom Kunden für den Kontrollplan (letzte Überarbeitung), falls vom Kunden gewünscht.

13) Kundenqualitätsprüfung / Datum

Holen Sie die Genehmigung des zuständigen Qualitätsbeauftragten des Kunden für die letzte Revision ein, wenn dies vom Kunden gewünscht wird.

14) Andere Genehmigung / Datum

Weitere Genehmigungen einholen (falls erforderlich).

15) Teil- / Prozessnummer

Diese Position wird in der Regel aus dem Prozessablaufplan (oder der PFMEA aus dem Prozessablaufplan) entnommen. Wenn mehrere Teilenummern vorhanden sind (Montagevorgänge), listen Sie die einzelnen Teilenummern und ihre Prozesse entsprechend auf.

16) Prozessname / Arbeitsgangbeschreibung

Alle Schritte bei der Herstellung eines Systems, Subsystems oder einer Komponente sind im Prozessflussdiagramm beschrieben (und auch in der PFMEA aus derselben Quelle). Identifizieren Sie den Prozess-/Arbeitsgangnamen aus PFD oder PFMEA, der die durchzuführende Aktivität am besten beschreibt.

17) Maschine, Gerät, Vorrichtung, Werkzeuge für die Fertigung

Für jeden beschriebenen Arbeitsgang sind die erforderlichen Bearbeitungseinrichtungen, wie z. B. Maschine, Vorrichtung, Gerät oder andere Werkzeuge für die Herstellung, anzugeben.

**Merkmale**

Die Merkmale, Maße oder Eigenschaften eines Prozesses oder seiner Ergebnisse (Produkt), für den Variablen- oder Attributdaten gesammelt werden können.

18) Nummer

Vergeben Sie eine Querverweisnummer für alle dazugehörigen Dokumente, wie z. B. Prozessflussbild, nummerierte Zeichnung, FMEA und andere visuelle Standards.

19) Produkt

Produktmerkmale sind die Merkmale oder Eigenschaften eines Teils, einer Komponente oder einer Baugruppe, die in Zeichnungen oder anderen primären technischen Informationen beschrieben sind. Diese Informationen können der PFMEA entnommen werden (sofern sie AS13004-konform sind).

Das Kernteam sollte die spezifischen Produktmerkmale identifizieren, die eine Zusammenstellung wichtiger Produktmerkmale aus allen Quellen (DFMEA, PFMEA, Customer Inputs, etc.) darstellen. Alle spezifischen Merkmale müssen im Kontrollplan aufgeführt sein.

Darüber hinaus muss der Kontrollplan alle anderen Produkteigenschaften und die zugehörigen Prozessmerkmale enthalten, die während der normalen Arbeitsgänge kontrolliert werden müssen.

## 20) Prozess

Prozessmerkmale sind die Prozessvariablen (Eingangsvariablen), die eine Ursache-Wirkungs- Beziehung zum identifizierten Produktmerkmal haben.

Ein Prozessmerkmal kann nur zum Zeitpunkt seines Auftretens gemessen werden. Das Kernteam sollte Prozessmerkmale identifizieren, bei denen die Variation kontrolliert werden muss, um die Produktvariation zu minimieren. Für jedes aufgelistete Produktmerkmal kann es mehr als ein Prozessmerkmal geben.

Bei einigen Prozessen kann ein Prozessmerkmal mehrere Produkteigenschaften beeinflussen.

## 21) Spezielle Merkmalsklassifizierung

Verwenden Sie die vom Kunden gewünschte Klassifizierung, um die Art des Sondermerkmals zu bestimmen, oder lassen Sie dieses Feld bei nicht gekennzeichneten Merkmalen leer.

## **Methoden (umfasst die Punkte 22 - 25)**

Ein systematischer Plan, der Verfahren und andere Werkzeuge zur Steuerung eines Prozesses verwendet.

## 22) Produkt- / Prozessspezifikation / Toleranz

Die Spezifikationsanforderungen finden Sie in der Zeichnung oder in anderen Dokumenten wie PFMEA, Montageunterlagen, etc.

## 23) Bewertung / Messtechnik

Diese Spalte identifiziert das verwendete Messsystem. Dies kann Messgeräte, Vorrichtungen, Werkzeuge und/oder Testgeräte umfassen, die zum Messen des Teils oder Prozesses erforderlich sind.

Die Messsystemanalyse (MSA) muss für alle Messsysteme und Attributprüfungen (einschließlich visueller Inspektion) durchgeführt werden, die zur Überprüfung der Produktkonformität dienen. Die MSA-Abnahmekriterien sind in AS13003 festgelegt.

## 24) Stichprobengröße & (25) Häufigkeit

Wenn Stichproben zulässig sind, geben Sie die entsprechende Stichprobengröße und -häufigkeit an.

## 26) Kontrollmethode

Dies ist eines der wichtigsten Elemente für einen effektiven Kontrollplan. Diese Spalte enthält eine kurze Beschreibung, wie der Arbeitsgang kontrolliert wird, einschließlich eines Verweises auf detaillierte Verfahren / Anweisungen, falls zutreffend.

Die verwendete Kontrollmethode sollte auf der Risikobewertung basieren, die bei der Erstellung der PFMEA durchgeführt wurde (als Minimum).

Typische Kontrollmethoden können SPC, Inspektion, Attributdaten, Fehlerprüfung und Stichprobenpläne sein.

Die Kontrollmethode sollte fortlaufend auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden.

Änderungen der Produkt- und Prozessfähigkeit sollten zu einer Neubewertung der Kontrollmethode führen.

## 27) Reaktionsplan

Der Reaktionsplan legt die notwendigen Korrekturmaßnahmen fest, um zu vermeiden, dass es zu Abweichungen kommt oder dass der Arbeitsablauf „außer Kontrolle“ gerät. Die Maßnahmen sollten in der Regel die Aufgabe der Personen sein, die dem Prozess am nächsten stehen (d. h.

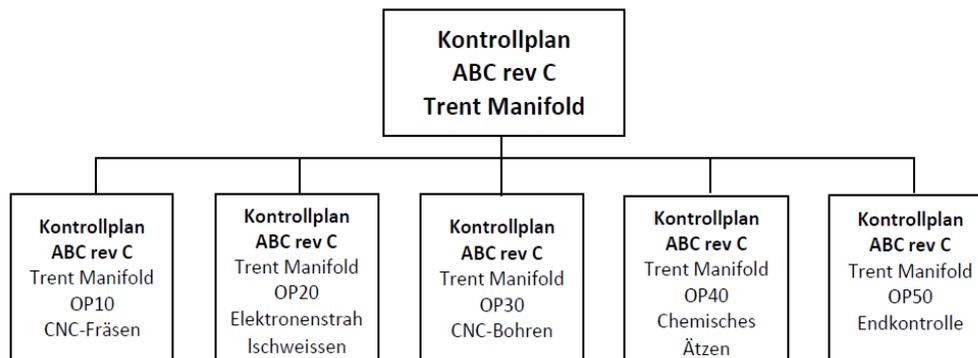
Bediener, Teamleiter, technischer Support) und im Reaktionsplan eindeutig identifiziert werden. Alle Maßnahmen müssen dokumentiert werden.

Verdächtige und fehlerhafte Produkte müssen eindeutig identifiziert und „unter Quarantäne“ gestellt werden. Die Disposition muss von der im Reaktionsplan benannten verantwortlichen Person vorgenommen werden.

Diese Spalte kann sich auch auf eine bestimmte Reaktionsplannummer beziehen und die für den Reaktionsplan verantwortliche Person identifizieren.

Der Kontrollplan sollte passend zu einzelnen Prozessen erstellt werden. Der Kontrollplan sollte in dem Bereich, in dem die Produktionstätigkeit stattfindet, aushängen (oder verfügbar gemacht werden), damit er vom Produktionsteam genutzt werden kann. Daher sollte der Kontrollplan nach Vorgangsnummer gegliedert sein, so dass nur die entsprechenden Seiten im jeweiligen Arbeitsbereich angezeigt werden (siehe Abbildung 45).

Sie sollten parallel zu den Arbeits- / Bedieneranweisungen genutzt werden und stellen eine Kurzanleitung für den Bediener dar.

**Abbildung 45: Aufbau des Kontrollplans**

Der Kontrollplan sollte beschreiben, was der Bediener während der Produktion tun muss. Eine Möglichkeit besteht daher darin, nicht alle Einzelmerkmale aufzulisten, wenn sie in einem einzigen CMM-Programm gemessen werden.

Abbildung 46 zeigt, wie die Dimensionsmerkmale bei einem CNC-Bohrvorgang in einer einzigen Zeile zusammengefasst wurden, in der die CMM alle 72 Dimensionsmerkmale prüft, die bei diesem Vorgang erstellt wurden.

Sie zeigt auch, wie das Maß Nr. 1 vom Bediener als Erstprüfung gemessen werden muss. Diese wird gesondert aufgeführt.

Abhängig von der Anzahl der in einem Arbeitsgang geprüften Merkmale kann das Team entscheiden, alle Merkmale im Kontrollplan aufzulisten. Es ist wichtig, dass der Kontrollplan ein leicht lesbares, einfaches Dokument bleibt.

Wenn die bei einem Vorgang erstellten Merkmale erst bei einem späteren Prozessschritt geprüft werden, werden sie nicht dort berücksichtigt, wo sie erstellt wurden, sondern bei dem Vorgang, bei dem sie geprüft werden.

Normalerweise sollte ein Produktionslenkungsplan für einen einzelnen Arbeitsschritt nicht länger als eine Seite sein.



Der Kontrollplan enthält viele Informationen, die auch in der jeweiligen Teilenummer-Prozess-FMEA enthalten sind. Viele FMEA-Softwareprodukte sind in der Lage, den Kontrollplan direkt aus der Prozess-FMEA heraus automatisch zu erstellen, ohne dass zusätzliche Eingriffe erforderlich sind.

Abbildung 47 zeigt die typischen Informationen in unserem Beispiel für den Produktionslenkungsplan, die direkt aus der Prozess-FMEA abgeleitet werden können.

Abbildung 47: Kontrollplandaten aus Prozess-FMEA (roter Text)

Kontrollplan											
? Vorserie					? Produktion						
1 ? Prototyp		Kontrollplannummer : 123B456			Kontaktperson/Telefon : Joe Hicks 247835			Datum (Original) 24/02/15		Datum (Überarbeitung) : 12/09/17	
Teilnummer & letzte Änderung : ABC rev D		Kernteam :			Technische Freigabe vom Kunden/Datum (falls erforderlich) k. A.						
Teilbezeichnung/Beschreibung : 65867676H Mainfield		Organisation/Werkgenehmigung/Datum T. Bell 24/02/15			Qualitätsfreigabe vom Kunden k. A.						
Organisation/Werk : Bristol HY		Organisation/code : 126578			Sonstige Freigaben/Datum (falls erforderlich) k. A.						
Teil- / Prozessnummer	Prozessname/Arbeitsgangbeschriftung	Maschine/Vorrichtung/Gerät für Produktion	Merkmale			Methoden			Reaktionsplan		
			Nr.	Produkt	Prozess	Bez. Merkmale	Produkt/Prozessspezifikation/Toleranzen	Bewertung Messverfahren		Größe	Häufigkeit
10	CNC-Bohren	Hermle Modell Nr. 3762 mit Z-Achsensteuerung dh672	Vorrichtungsprüfung	X	X	Keine Anzeichen von Beschädigungen/Verschleiß	Keine Anzeichen von Beschädigungen/Verschleiß	100%	Jeder Ladevorgang	Prüfplan für Vorrichtungen	Prozess stoppen und Vorrichtung reparieren oder Alternative verwenden.
			Teilebeschädigung - vor Bearbeitung	X		Keine Schäden außerhalb der in Spec 878 definierten Grenzen	Keine Schäden außerhalb der in Spec 878 definierten Grenzen	100%	Jedes Teil	Attribut-SPC- Diagramm	Prozess stoppen und korrekte Ursache identifizieren
			Abmessungen 1-72	X		Verschiedene	Verschiedene	100%	Jedes Teil	Pre-Control- Karten	Prozess stoppen und spezielle Ursache korrigieren
			Maß Nr. 1	X	X	10 mm +/- 1 mm	Bohrungs- mess- schraube CVR07 oder BG09	Erstes Teil	1 pro Charge	Einrichtungsblatt	Prozess anpassen und sicherstellen, dass das Merkmal im mittleren Drittel der Toleranz liegt
			Teilbeschädigung- Nach Bearbeitung	X		Keine Schäden außerhalb der in Spec 878 definierten Grenzen	Keine Schäden außerhalb der in Spec 878 definierten Grenzen	100%	Jedes Teil	Attribut-SPC- Diagramm	Prozess stoppen und korrekte Ursache identifizieren

**Table 10: Einige Belange bei der Verwendung von Kontrollplänen**

**Der Kontrollplan ist am Arbeitsplatz nicht verfügbar.**

Der Kontrollplan soll eine „Kurzanleitung“ für den Bediener sein, um genau zu sehen, welche Kontrollen bei der Herstellung / Montage einer bestimmten Teilenummer durchgeführt werden müssen. Zusammen mit den Arbeitsanweisungen sind dies daher wichtige Produktionsreferenzdokumente, auf die bei jeder Herstellung / Montage eines bestimmten Teils Bezug genommen werden sollte.

**Der Kontrollplan ist zu komplex.**

Der Kontrollplan muss von überschaubarer Größe sein, damit die Bedienperson klar erkennen kann, was zu tun ist. Er kann für weitere Einzelheiten auf andere Dokumente, z. B. Arbeitsanweisungen, verweisen.

Er sollte nicht alle zu überprüfenden Merkmale auflisten, beispielsweise dann, wenn sie im Reifegradmodell (CMM) gemessen werden. Dies kann auf einer einzelnen Linie innerhalb des Kontrollplans abgedeckt werden.

Meist wird der Kontrollplan so formatiert, dass er auf einen einzelnen Arbeitsablauf abgestimmt ist, z. B. OP10, OP20 etc. In der Regel sollte der Kontrollplan für einen einzelnen Vorgang nicht mehr als eine Seite umfassen.

**Der Kontrollplan ist nicht mit der PFMEA verknüpft und wird nicht regelmäßig aktualisiert.**

Der Kontrollplan ist eines der Dokumente, die festlegen, was als innerhalb der PFMEA ermittelt zu kontrollieren ist. Es muss eine klare Verbindung zwischen der PFMEA und dem Kontrollplan geben, damit gewährleistet ist, dass die ermittelten Aspekte in die Produktionskontrollen übertragen wurden.

Änderungen am Kontrollplan sollten aus einer Änderung an der PFMEA resultieren. Wenn dem Kunden beispielsweise ein nicht normgerechtes Teil geliefert wurde, und der Produktionsbereich hat eine Containment Check (Eindämmungsprüfung) implementiert, dann muss diese aus dem PFMEA-Update abgeleitet und in den Kontrollplan eingeflossen sein. Sobald die Untersuchung abgeschlossen ist und die Eindämmungsprüfung entfernt ist, muss diese auch aus der Überprüfung / Änderung der PFMEA abgeleitet werden.

### Weiterführende Literatur:

„AS13004 Process FMEA and Control Plan for Aerospace“, AESQ, 2017

„Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan“, 2nd Edition, AIAG, 2008

### Schlüsselfragen zum Kontrollplan:

1. Wurden die Kontrollpläne anhand der in der PFMEA enthaltenen Informationen entwickelt?
2. Deckt der Kontrollplan alle Produkt- und Prozessprüfungen ab, die während der Produktion / Montage erforderlich sind, um sicherzustellen, dass ein konformes Produkt hergestellt wird?
3. Wurde die richtige Kontrollplanvorlage verwendet?
4. Stehen dem Bediener die relevanten Elemente des Kontrollplans am Arbeitsplatz zur Verfügung?
5. Sind die wesentlichen Merkmale (KCs) im Kontrollplan aufgeführt?
6. Gibt es klare Anweisungen, wie vorzugehen ist, wenn vom Bediener ein fehlerhaftes Produkt oder außer Kontrolle geratene Bedingungen festgestellt werden?
7. Sind die in der PFMEA ermittelten, nicht produktspezifischen Kontrollen in den entsprechenden Wartungsplänen, Werkzeugwartungen und Anlagenwartungsplänen enthalten?

Siehe auch Prüfliste zur Konformitätsbewertung in Anhang D.



## Anhang A: AS13004 PFMEA Bewertungsrichtlinien

### A.1 AS13004 Richtlinien für die Bedeutungsbewertung in der PFMEA

Auswirkung	Schweregrad der Auswirkung auf das Produkt (Kundeneffekt)	Bewertung	Auswirkung	Schweregrad der Auswirkung auf den Prozess (Fertigungs- / Montageeffekt)
Nichteinhaltung von Sicherheits- und/oder behördlichen Anforderungen	Fehlermöglichkeit beeinflusst den sicheren Betrieb und/oder die Nichteinhaltung von Vorschriften <b>ohne</b> Vorwarnung	10	Nichteinhaltung von Sicherheits- und/oder behördlichen Anforderungen	Gefährdet Bediener, Maschine oder Montage <b>ohne</b> Vorwarnung
	Fehlermöglichkeit beeinflusst den sicheren Betrieb und/oder die Nichteinhaltung von Vorschriften <b>mit</b> Vorwarnung	9		Gefährdet Bediener, Maschine oder Montage <b>mit</b> Vorwarnung
Verlust oder Verschlechterung der Primärfunktion	Verlust der Primärfunktion (Produkt nicht funktionsfähig, beeinträchtigt nicht den sicheren Betrieb)	8	Größere Störung	100% des Produkts muss möglicherweise verschrottet werden. Montage bzw. Auslieferung gestoppt
	Verschlechterung der Primärfunktion (Produkt nicht funktionsfähig, aber mit verminderter Leistung)	7	Signifikante Störung	Ein Teil der Produktion muss möglicherweise verschrottet werden. Abweichung vom Primärprozess; verringerte Liniengeschwindigkeit oder zusätzliche Arbeitskräfte
Verlust oder Verschlechterung der Sekundärfunktion	Verlust der Sekundärfunktion (Produkt funktionsfähig, aber optisch beeinträchtigt, Komfortfunktionen nicht funktionsfähig, Kunde unzufrieden)	6	Mäßige Störung	100% der Produktion muss eventuell nachbearbeitet und akzeptiert werden.
	Verschlechterung der Sekundärfunktion (Produkt funktionsfähig, aber optisch beeinträchtigt, Komfortfunktionen funktionsfähig auf reduziertem Niveau, Kunde unzufrieden)	5		Eventuell muss ein Teil der Produktion nachgearbeitet und akzeptiert werden
Ärgernis	Aussehen, Passform und Oberflächenausführung entsprechen nicht den Anforderungen, Defekt wurde von den meisten Kunden bemerkt (>75%)	4	Mäßige Störung	100% der Produktion muss eventuell vor der Verarbeitung in der Station nachbearbeitet werden
	Aussehen, Passform und Oberflächenausführung entsprechen nicht den Anforderungen, Defekt wurde von etwa der Hälfte der Kunden bemerkt (50%)	3		Eventuell muss ein Teil der Produktion vor der Verarbeitung an der Station nachgearbeitet werden.
	Aussehen, Passform und Oberflächenausführung entsprechen nicht den Anforderungen, Defekt wurde von anspruchsvollen Kunden bemerkt (<25%)	2		Leichte Unannehmlichkeiten für Prozess, Betrieb oder Bediener
Keine Auswirkung	Keine erkennbare Auswirkung	1	Keine Auswirkung	Keine erkennbare Auswirkung

A.2 AS13004 Richtlinien für die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit in der PFMEA

Bewertung	Beschreibung	Prozess PPM	Wahrscheinlichkeit der Ursache (AIAG Referenz)	Zeitbasiertes Beispiel	Wahrscheinlichkeit der Ursache		Zeitbasiertes Beispiel
					Ursache	Kleinserienfertigung	
10	Sehr hoch: Dauerhafter Ausfall (Ausfälle sind fast unvermeidlich)	500.000 PPM	1 pro 2	≥ 1 pro Vorkommen pro Schicht	100% der Produktion	≥ 1 pro Vorkommen pro Schicht	
9	Sehr hoch: Dauerhafter Ausfall (Fehler treten sehr oft auf)	50.000 PPM	1 pro 20	≥ 1 pro Vorkommen pro Tag	50% der Produktion	≥ 1 pro Vorkommen pro Tag	
8	Hoch: Häufige Ausfälle (wiederholte Ausfälle)	20.000 PPM	1 pro 50	≥ 1 pro 2-3 Tage	20% der Produktion	≥ 1 pro 2-3 Tage	
7	Hoch: Häufige Ausfälle (Ausfälle treten häufig auf)	10.000 PPM	1 pro 100	≥ 1 pro Woche	10% der Produktion	≥ 1 pro Woche	
6	Relativ hoch: Gelegentliche Ausfälle	5000 PPM	1 pro 200	≥ 1 pro 1 Wochen	5% der Produktion	1 pro Monat	
5	Mäßig: Gelegentliche Ausfälle (Kleinerer Umfang)	1000 PPM	1 pro 1000	≥ 1 pro Quartal	0.5% der Produktion	2 pro Jahr	
4	Relativ niedrig: Seltene	100 PPM	1 pro 10.000	≥ 1 pro Halbjahr	0.1% der Produktion	1 pro Jahr	
3	Niedrig: Relativ wenige	10 PPM	1 pro 100.000	≥ 1 pro Jahr	0.05% der Produktion	1 pro 5 Jahre	
2	Niedrig: Ausfälle sind selten (einzelne Vorfälle)	1 PPM	1 pro 1.000.000	< 1 pro Jahr	0.01% der Produktion	1 pro 10 Jahre	
1	Unwahrscheinlich: Fehlervermeidung durch vorbeugende Kontrolle	Null	Null	Nie	Weniger als 0,01% der Produktion	<1 pro 10 Jahre	

A.3 AS13004 Richtlinien für die Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit in der PFMEA

Bewertung	Wahrscheinlichkeit der Erkennung durch Prozesskontrolle – Kategorie	Wahrscheinlichkeit der Erkennung durch Prozesskontrolle - Kriterien
10	Absolute Ungewissheit	Keine aktuelle Prozesskontrolle; nicht erkannt oder Compliance-Analyse kann nicht durchgeführt werden
9	Schwer zu erkennen	Defekt (Fehlermöglichkeit) bzw. Fehler (Ursache) ist nicht leicht zu erkennen (z. B. Stichproben)
8	Fehlererkennung nach Bearbeitung	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) nach Bearbeitung durch Bediener mittels visueller/taktile/auditierbarer Mittel ohne Grenzmuster
7	Fehlererkennung an Quelle	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) an der Station durch Bediener mittels visueller/taktile/akustischer Mittel oder nach Bearbeitung durch Attributenprüfung (gut/nicht gut, manuelle
6	Fehlererkennung nach Bearbeitung	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) nach Bearbeitung durch Bediener mittels Messlehre oder an der Station durch Bediener mittels Attributenprüfung (gut/nicht gut, manuelle Drehmomentkontrolle/Knickschlüssel, etc.) mit
5	Fehlererkennung an Quelle	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) oder Fehler (Ursache) an der Station durch Bediener mittels Messlehre oder durch automatische Kontrollen, die abweichende Teile erkennen und den Bediener benachrichtigen (Licht, Summer usw.). Messungen bei Einrichtung und Erststückkontrolle (nur für
4	Fehlererkennung nach Bearbeitung	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) nach Bearbeitung durch automatisierte Kontrollen, die abweichende Teile erkennen und sperren, um deren Weiterverarbeitung zu verhindern.
3	Fehlererkennung an Quelle	Erkennung von Defekten (Fehlermöglichkeit) an der Station durch automatisierte Kontrollen, die abweichende Teile erkennen und in der Station automatisch sperren, um deren Weiterverarbeitung zu verhindern.
2	Fehlererkennung bzw. Fehlervermeidung	Erkennung von Fehlern (Ursachen) an der Station durch automatisierte Kontrollen, die Fehler erkennen und verhindern, dass abweichende Teile
1	Erkennung nicht anwendbar	Vermeidung von Fehlern (Ursachen) durch Vorrichtungsdesign, Maschinendesign oder Bauteildesign



## Anhang B: Probenreferenz PFMEAs (Auszüge)

### Anhang B.1 CNC-Bohrung – Lochdurchmesser

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) Bohrl Lochdurchmesser												
Prozessschritte	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen (Beispiele)	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen (Beispiele)	RPZ		
OP 10 CNC- Bearbeitung Bohren	Lochdurchmesser	Zu groß				Falsches Werkzeug (Bohrer) verwendet - überdimensioniert	Werkzeugspan-Detektor in CNC-Maschine Überprüfung der Werkzeugvoreinstellung		Variable Messkontrolle des Lochdurchmessers (CMM oder manuelle Messung) Attributenprüfung (go / no go) nicht empfohlen			
						Vom Lieferanten gelieferter Bohrer oberhalb der oberen Grenze (Durchmesser)	Überprüfung der Werkzeugvoreinstellung					
						CNC-Spindelaustrichtung außerhalb der Spezifikation	Kontrolle der Laserausrichtung als Teil des präventiven Wartungsprogramms. Prüfung der Kugelstange als Teil des Asset Care Plans.					
						Das Teil kann sich in der Aufspannvorrichtung bewegen	In die Aufspannvorrichtung eingebautes Luftleck-Meldesystem zur Erkennung der Klemmung und Teileposition.					
								Späneaufnahme am Werkzeug	Überprüfung der Kühlmittleinstellung (Position und Druck). Fragmentierung von Spänen, um ein Einrollen zu verhindern.			
								Falsches Werkzeug (Bohrer) verwendet - unterdimensioniert	Werkzeugspan-Detektor in CNC-Maschine		Variable Messkontrolle des Lochdurchmessers (CMM oder manuelle Messung) Attributenprüfung (go / no go) nicht empfohlen	
								Vom Lieferanten gelieferter Bohrer unterhalb der unteren Grenze (Durchmesser)	Überprüfung der Werkzeugvoreinstellung			
								Werkzeugverschleiß	Die im CNC-Programm definierte Werkzeugstandzeit verhindert, dass das Werkzeug die nutzbare Standzeit überschreitet.			

**Anhang B.2 Manuelle Montage – Dichtung montieren**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) Dichtungsanordnung											
Prozessschritte	Anforderungen	Fehlermöglich- lichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen (Beispiele)	Auftreten	Entdeckungs- maßnahmen (Beispiele)	Entdeckung	RPZ
Montagevorgang 1100  Montage der Öldichtung	Dichtung 345X richtig ausgerichtet (glatte Seite nach unten) in die vertiefte Bohrung (A) einsetzen	Keine Dichtung montiert				Betrieb fehlgeschlagen	Die Teile werden dem Monteur in Bausätzen und in der richtigen Menge präsentiert, um das Zählen der Teile zu erleichtern.		Sichtprüfung während des Betriebs durch den Monteur und abschließender Triebwerksabnah- metest am Ende der Linie (würde als Ölleckage angezeigt)		
		Dichtung verkehrt herum montiert				Die Teilekonstruktion ermöglicht die Montage des Teils in beide Richtungen	Das Teil ist gekennzeichnet, um die richtige Einbaulage anzuzeigen				
		Falsche Dichtung montiert				Durch die Logistikfunktion falsch montierte Teile	Der Bausatz beinhaltet eine Überprüfung des Sichtsystems vor dem Drucken des Etiketts, um sicherzustellen, dass alle Teile im Bausatz vorhanden sind. Vor der Montage überprüft der Monteur, dass der Bausatz versiegelt und ungeöffnet angekommen ist.				
						Vom Lieferanten falsch gekennzeichnete Teile	Keine				
	Unterlegscheibe über die Dichtung montieren (beliebige Seite nach oben) und die Mittenlöcher in Dichtung und Scheibe aufeinander ausrichten	Keine Unterlegscheibe montiert				Betrieb fehlgeschlagen	Die Teile werden dem Monteur in Bausätzen und in der richtigen Menge präsentiert, um das Zählen der Teile zu erleichtern.		Sichtprüfung während des Betriebs durch den Monteur und abschließender Triebwerksabnah- metest am Ende der Linie (würde als Ölleckage angezeigt)		
		Falsche Unterlegscheibe montiert				Vom Monteur wurde ein falsches Teil aus dem Bausatz ausgewählt	Mit einer Arbeitsablaufnummer gekennzeichnete Bausatzkästen sind zur Unterstützung des Monteurs in Verfahrensschritte gruppiert.				
	M12-Schraube (887D) durch das Loch in der Scheibe und Dichtung stecken und handfest festziehen.	Keine Schraube montiert				Betrieb fehlgeschlagen	Die Teile werden dem Monteur in Bausätzen und in der richtigen Menge präsentiert, um das Zählen der Teile zu erleichtern.		Sichtprüfung während des Betriebs durch den Monteur und abschließender Triebwerksabnah- metest am Ende der Linie (würde als Ölleckage angezeigt)		
		Falsche Schraube montiert				Vom Monteur wurde ein falsches Teil aus dem Bausatz ausgewählt	Mit einer Arbeitsablaufnummer gekennzeichnete Bausatzkästen sind zur Unterstützung des Monteurs in Verfahrensschritte gruppiert.				
		Schraube nicht gesichert				Unzureichendes Festziehen der Schraube von Hand in der Montage	Keine				
		Schrauben mit 25 Nm mit einem handbetätigten Drehmomentsc- hlüssel festziehen	Zu wenig Anzugsdreh- moment				Drehmomentschlüssel falsch eingestellt	Keine			Keine
	Überdrehmoment					Vorgang nicht abgeschlossen	Keine				
						Drehmomentschlüssel falsch eingestellt	Keine				

**Anhang B.3 CNC-Bohrung – Bohrtiefe**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) Bohrungstiefe												
Prozessschritte	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen (Beispiele)	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen (Beispiele)	Entdeckung	RPZ	
OP 10 CNC-Bearbeitung Bohren	Bohrungstiefe	Zu tief				Werkzeugsatz zu lang	Vorprüfung der Werkzeugeinstellung		Variable Messkontrolle des Lochdurchmessers (CMM oder manuelle Messung) Attributenprüfung (go / no go) nicht empfohlen			
						Falsche Maschinenversätze angewendet	Das Programm ist gesperrt, um zu verhindern, dass nicht genehmigte Änderungen vorgenommen werden. Alle Programme werden auf dem Zentralserver gespeichert und auf die Maschine heruntergeladen.					
						Außerhalb der Position in der Aufspannvorrichtung gehaltenes Teil	An der Aufspannvorrichtung verwendete Luftleck-Meldegeräte, um die korrekte Position zu gewährleisten.					
						Falsches Werkzeug verwendet (zu lang)	Werkzeugsan-Detektor in der CNC-Maschine, um sicherzustellen, dass das richtige Werkzeug aufgespannt ist.					
		Zu flach					Werkzeuflänge zu kurz eingestellt	Vorprüfung der Werkzeugeinstellung		Variable Messkontrolle des Lochdurchmessers (CMM oder manuelle Messung) Attributenprüfung (go / no go) nicht empfohlen		
						Werkzeug verschlissen / beschädigt	Vorprüfung der Werkzeugeinstellung. Werkzeuglaserprüfung im Karussell.					
						Falsche Maschinenversätze angewendet	Das Programm ist gesperrt, um zu verhindern, dass nicht genehmigte Änderungen vorgenommen werden. Alle Programme werden auf dem Zentralserver gespeichert und auf die Maschine heruntergeladen.					
						Außerhalb der Position in der Aufspannvorrichtung gehaltenes Teil	An der Aufspannvorrichtung verwendete Luftleck-Meldegeräte, um die korrekte Position zu gewährleisten.					
							Falsches Werkzeug verwendet (zu kurz)	Werkzeugsan-Detektor in der CNC-Maschine, um sicherzustellen, dass das richtige Werkzeug aufgespannt				

### Appendix B.4 Manuelle Drehmomentbefestigung

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) Manuelle Drehmomentbefestigung												
Prozessschritte	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen (Beispiele)	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen (Beispiele)	RPZ		
OP 300 Montage des Außenverteilers an der Nabe	10 Stck. M10-Schrauben (Teilenummer xyz) in einem Winkel von 120 Grad in die Schraubenlöcher (1, 2 bis 10) einsetzen und mit 50 Nm festziehen.	Nicht alle Schrauben montiert				Betrieb fehlgeschlagen	Das Teil aus den Bausatzkästen bietet dem Monteur die richtige Anzahl von Schrauben		Sichtprüfung nach Betriebsende durch den Monteur.			
		Überdrehmoment					Werkzeug außerhalb der Kalibrierung (mit Fehler)	Zeitplan Werkzeugkalibrierung		Keine		
							Falsches Werkzeug verwendet	Barcode-Überprüfung für Bedienerführung und korrekte Werkzeugbestückung		Keine		
							Werkzeug ist beschädigt	Kontrolle durch den Monteur vor der Inbetriebnahme		Keine		
							Vorgang nicht abgeschlossen	Keine		Keine		
		Unterdrehmoment						Werkzeug außerhalb der Kalibrierung (mit Fehler)	Zeitplan Werkzeugkalibrierung		Keine	
								Falsches Werkzeug verwendet	Barcode-Überprüfung für Bedienerführung und korrekte Werkzeugbestückung		Keine	
								Werkzeug falsch eingestellt	Keine		Keine	
								Betrieb fehlgeschlagen	Keine		Sichtprüfung durch den Monteur während des Betriebs	
								Keine Drehmomente angewandt				
		Winkel zu groß										
		Winkel zu klein										
		Schraube beschädigt										
Gewinde beschädigt												

**Appendix B.5 Manuelles Spritzlackieren**

Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) Manuelles Spritzlackieren																
Prozessschritte	Anforderungen	Fehlermöglichkeit	Mögliche Fehlerfolge(n)	Bedeutung	Einstufung	Mögliche Fehlerursache(n)	Präventionsmaßnahmen (Beispiele)	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen (Beispiele)	RPZ						
OP 700 Manuelles Spritzlackieren	Haftung der Lackbeschichtung	Delaminierung der Lackschicht				Oberflächenkontamination	Chemische Ätzreinigung vor dem Spritzlackieren		Sichtkontrolle im Prozess							
						Der Lackauftrag ist zu dick (außerhalb der Lackspezifikation)	Keine		Post-Prozess-Wirbelstrom							
						Farbe falsch gemischt (Verhältnis und Mischung)	Ein Teststück vorlackieren und auf Verhältnis und Mischung prüfen									
						Verfallsdatum des Lacks abgelaufen	Haltbarkeitskontrolle inklusive Barcodesegerät									
						Unzureichende Einwirkzeit der Farbe	Aufzeichnungen über Prozesszeiten geführt.									
						Falsche Umgebungstemperatur /Anwendungstemperatur – außerhalb des Bereichs von 19 ° C bis 25 ° C	Umgebungstemperaturregelungen mit Alarm stellen sicher, dass der Prozess nicht außerhalb des Temperaturbereichs erfolgen kann.								Sichtprüfung nach dem Prozess	
						Übermäßige Umgebungstemperatur /Anwendungstemperatur (> 45 %)							Luftfeuchtigkeitsregelung mit akustischen / optischen Alarmen. Der Prozess ist bei ausgelöstem Alarm gesperrt.			



## Anhang C: Begriffe und Definitionen

**PRODUKTIONSQUALITÄTSMANAGEMENT (APQP):** Definiert, welche Aktivitäten zur Entwicklung neuer Produkte und Prozesse erforderlich sind, um sicherzustellen, dass die Kundenqualitäts-, Kosten- und Lieferziele erreicht werden können.

Die APQP umfasst alle Schlüsselinstrumente zur Fehlervermeidung, die in diesem Buch beschrieben werden. Die Ergebnisse (Nachweise) des APQP-Abschlusses werden im Rahmen des Produktionsteilabnahmeverfahrens (Production Part Approval Process, PPAP) erfasst und dienen der Bewertung der Wirksamkeit der APQP-Aktivität.

AS9145 definiert die APQP- und PPAP-Anforderungen für die Luftfahrtindustrie.

AIAG: Die Automotive Industry Action Group (AIAG) wurde von der Automobilindustrie gegründet, um harmonisierte Qualitätsstandards und Leitfäden für die Automobilindustrie festzulegen.

Ihre Guidance Manuals on Defect Prevention Tools (in etwa: Leitfäden zu Fehlerverhütungsmitteln) wie APQP, PPAP, FMEA, Kontrollpläne, Messsystemanalyse (MSA) und statistische Prozesslenkung gelten auch nach fast 30 Jahren seit ihrer ursprünglichen Veröffentlichung als wegweisend.

**GRENZMUSTER:** Dies ist eine physikalische Probe eines Teils, das ein Beispiel für einen Attributfehler hat, der an der Grenze der Akzeptanz oder Nichtkonformität liegt. Es ist eine nützliche Hilfe für Inspektoren, um Teile als gut oder schlecht zu beurteilen.

**MERKMALSMATRIX:** Eine analytische Technik zur Darstellung der Beziehung zwischen Produkteigenschaften, Inspektionen, Produkttransformationen und der Arbeitsvorgangsfolge.

**KONZESSION:** Ein Verfahren zur Genehmigung der Verwendung eines Produkts mit geringfügigen Abweichungen, die als sicherheits- und leistungsneutral bewertet wurden.

**PRODUKTIONSLENKUNGSPLAN / KONTROLLPLAN:** Eine dokumentierte Beschreibung, welche die Schritte des Herstellungsprozesses mit den wichtigsten Inspektions- und Kontrollaktivitäten verknüpft. Ziel eines Produktionslenkungs- bzw. Kontrollplans ist es, die Konstruktionsmerkmale und die Prozessvariablen zur Sicherstellung der Produktqualität zu kontrollieren.

**KRITISCHE ELEMENTE (CRITICAL ITEMS, CI):** Diejenigen Elemente (z. B. Funktionen, Teile, Software, Merkmale, Prozesse), die einen wesentlichen Einfluss auf die Bereitstellung und Nutzung der Produkte und Dienstleistungen haben; einschließlich Sicherheit, Leistung, Form, Passform, Funktion, Herstellbarkeit, Lebensdauer etc., die spezifische Maßnahmen erfordern, um sicherzustellen, dass sie angemessen geführt / gehandhabt werden. Beispiele sind sicherheitskritische Elemente, bruchkritische Elemente, missionskritische Elemente, Schlüsselmerkmale etc. (siehe AS9100).

**KUNDE:** Eine Person oder Organisation, die ein Produkt oder eine Dienstleistung erhalten könnte oder erhält, welche(s) für diese Person oder Organisation bestimmt ist oder von dieser verlangt wird (siehe ISO 9000).

**INSTRUMENTARIUM ZUR FEHLERVERMEIDUNG:** Dies sind die Qualitäts(management)werkzeuge, die entwickelt wurden, um das Potenzial für Abweichungen (Nichtkonformität) zu verhindern. Dazu gehören als

Mindestanforderung Design-FMEA, Prozess-FMEA, Kontrollplan, Messsystemanalyse, Prozessfähigkeitsanalyse, Fehlervermeidung und statistische Prozesslenkung (SPC).

Typischerweise sind dies alle Anforderungen der Produktionsqualitätsvorausplanung (Advanced Product Quality Planning, APQP) und des Produktionsteilabnahmeverfahrens (Production Part Approval Process, PPAP), obwohl sie auch bei retrospektiver Anwendung Vorteile bringen können.

**KONSTRUKTIONSMERKMALE:** Diejenigen dimensional, visuellen, funktionalen, mechanischen und materiellen Merkmale oder Eigenschaften, die das Design des Artikels beschreiben und ausmachen, wie es durch die Zeichnung oder die Anforderungen der digitalen Produktdefinition festgelegt ist.

*HINWEIS: In AS13004 wird unter „Konstruktionsmerkmal“ auch „Produktmerkmal“ verstanden.*

**KONSTRUKTIONSUBTERLAGEN:** Die Aufzeichnungen der technischen Definition/Spezifikation, die das Produkt (System, Teil, Komponente oder Baugruppe) vollständig definieren, einschließlich physischer oder elektronischer/digitaler Zeichnungen, elektronischer/digitaler Modelle, Software oder anderer zugehöriger Informationen. Dazu gehören Aufzeichnungen über autorisierte technische Änderungen, die noch nicht in die freigegebene technische Definition/Spezifikation aufgenommen wurden.

**DESIGN-RISIKOANALYSE:** Analytische Techniken, die von der entwicklungsverantwortlichen Organisation verwendet werden, um, soweit möglich, potenzielle Fehlerarten in Bezug auf die Produktleistung (d. h. Passform, Form und Funktion), Haltbarkeit, Herstellbarkeit und Kosten zu identifizieren. Eine Design-FMEA ist ein Mittel, das eine Design-Risikoanalyse ermöglicht.

**DESIGNVERIFIZIERUNGSPLAN:** Dies ist eine Zusammenfassung der erforderlichen Präventiv- und Detektionskontrollen innerhalb des Designprozesses, um sicherzustellen, dass das vorgeschlagene Design den funktionalen Anforderungen des Kunden entspricht. Er wird aus der Design-FMEA abgeleitet, wie auch der Kontrollplan aus der PFMEA.

**ERKENNUNGSKONTROLLE:** Kontrolle zur Erkennung der Ursache des Fehlerzustands oder des tatsächlichen Fehlerzustands nach dessen Auftreten.

**FEHLERMÖGLICHKEITS- UND EINFLUSSANALYSE (FMEA):** Eine analytische Methode zur Risikoanalyse durch Klassifizierung und Dokumentation potenzieller Fehlermodi in einem System, Design oder Prozess. Die Analyse beinhaltet:

- Identifikation von potenziellen Fehlern und deren Auswirkungen
- Rangfolge der Faktoren (z. B. Schwere, Häufigkeit des Auftretens, Erkennbarkeit der potenziellen Ausfälle)
- Identifizierung und Ergebnisse von Maßnahmen zur Risikominderung oder -beseitigung

Die FMEA unterstützt bei der Ermittlung von CIs und Hauptmerkmalen (Key Characteristics), hilft bei der Priorisierung von Maßnahmenplänen zur Risikominderung und dient als Repository für Lessons Learned (gewonnene Erfahrungen). Dazu können gehören: System-FMEA, Schnittstellen-FMEA, Konstruktions-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (DFMEA) sowie Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (PFMEA).

**INSPEKTIONSPLAN / PRÜFPLAN:** Eine detaillierte Beschreibung der Inspektions- und Prüftätigkeiten (z. B. Toleranzen, Methoden, Lehren) für Merkmale oder Attribute, die während bestimmter Produktionsvorgänge durchzuführen sind. Erfüllt den gleichen Zweck wie ein Kontrollplan.

**HAUPTMERKMAL (KEY CHARACTERISTIC, KC):** Ein Attribut oder Merkmal, dessen Variation einen wesentlichen Einfluss auf die Passform, Form, Funktion, Leistung, Lebensdauer oder Herstellbarkeit des Produkts hat, das spezifische Maßnahmen zur Steuerung/Kontrolle der Variation erfordert (siehe AS9100).

Diese Definition ist im Folgenden näher erläutert:

- Produkt- oder System-KCs sind diejenigen ausgewählten geometrischen Eigenschaften, Materialeigenschaften, funktionellen und/oder kosmetischen Merkmale, die messbar sind und deren Variationskontrolle zur Erfüllung der Kundenanforderungen und zur Steigerung der Kundenzufriedenheit erforderlich ist.
- Prozess-KCs sind die ausgewählten messbaren Merkmale eines Prozesses, deren Kontrolle für die Steuerung der Variation von Produkt- oder System-KCs unerlässlich ist.
- Ersatz-KCs können identifiziert werden, wenn ein vom Kunden definiertes KC innerhalb der Produktions-/Wartungseinrichtung nicht leicht messbar ist und andere Merkmale kontrolliert werden müssen, um die Konformität zu gewährleisten.

*HINWEIS: Das Designergebnis (Design-Output) kann die Identifizierung von CIs beinhalten, die spezifische Maßnahmen erfordern, um sicherzustellen, dass sie angemessen geführt werden. Einige CIs werden weiter als KCs klassifiziert, da ihre Variation kontrolliert werden muss.*

**ORGANISATION:** Person oder Personengruppe, die eigene Funktionen mit Verantwortlichkeiten, Befugnissen und Beziehungen zur Erreichung ihrer Ziele hat (siehe ISO 9000).

**PRÄVENTIVKONTROLLE:** Die Präventivkontrolle beschreibt, wie eine Fehlerursache und/oder ein Fehlerzustand verhindert wird oder wie die Häufigkeit des Auftretens reduziert wird. Sie wird als Input für die Rangfolge des Auftretens verwendet, wenn sie als Teil des Prozesses integriert wird.

**PROZESS:** Eine Kombination aus Menschen, Material, Maschinen, Werkzeugen, Umgebung und Methoden, die ein Produkt herstellen oder eine Dienstleistung erstellen.

**PROZESSMERKMALE:** Prozessvariablen, die in einem Ursache-Wirkungs-Verhältnis zu Konstruktionsmerkmalen stehen. Prozessmerkmale bzw. Prozesseigenschaften können nur zum Zeitpunkt ihres Auftretens gemessen werden.

**PROZESSFLUSSDIAGRAMM (PFD):** Eine Darstellung der sequentiellen Schritte des Prozesses, die alle Vorgänge vom Eingang des Materials über die Lagerung, Verpackung und den Versand umfasst.

**PRODUKT:** Jede beabsichtigte Leistung, die sich aus dem Produktrealisierungsprozess ergibt, der im Rahmen dieses Standards fertige Detailteile, Unterbaugruppen, Baugruppen, Schmiedeteile und Gussteile umfasst (siehe AS9102).

**NICHT KONFORMES PRODUKT:** Jedes Produkt, das von einem internen/externen Lieferanten oder Unterlieferanten freigegeben wird und sich später als nicht vertragskonform und/oder produktspezifikationsfehlerhaft erweist (siehe AS9131).

**PRODUKTIONSTEILABNAHMEVERFAHREN (PPAP):** Dies ist im Wesentlichen ein Evidenz-Paket der wichtigsten APQP-Aktivitäten, das von der Organisation und gegebenenfalls dem Kunden ausgewertet werden kann, um nachzuweisen, dass die erforderlichen Aktivitäten erfolgreich abgeschlossen wurden.

Das PPAP erfordert typischerweise die Aufnahme folgender Dokumente: Design-FMEA, Prozessflussdiagramm, Merkmalsmatrix, Prozess-FMEA, Kontrollplan, Messsystemanalyse, erste Fähigkeitsstudien, Prüfbericht.

AS9145 definiert die APQP- und PPAP-Anforderungen für die Luftfahrtindustrie.

**REAKTIONSPLAN:** Ein Plan, der Maßnahmen festlegt, die erforderlich sind, um zu vermeiden, dass ein fehlerhaftes Produkt hergestellt wird, dass der Betrieb außer Kontrolle gerät und der Containment-Pläne umfasst, die bei Feststellung eines fehlerhaften Produkts abgerufen werden können.

**REFERENZ-PFMEA:** Dies sind PFMEAs, welche die prozessspezifischen Elemente einer Prozess-FMEA erfassen, die unabhängig vom zu bewertenden Teil üblich sind. Sie beinhalten typische Definitionen für verwandte Fehlerzustände, deren mögliche Ursachen sowie typische Präventiv- und Erkennungskontrollen.

Sie ermöglichen es dem Team, zeitnah eine „Shell-FMEA“ bereitzustellen, um die teilespezifische Ebene zu erstellen.

**RISIKOPRIORITÄTZAHL (RPZ):** Das Produkt der B-, A- und E-Bewertungszahlen (Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit). Es wird für jeden einzelnen Fehlermodus und jede Ursachenkombination errechnet.

Beispielrechnung:

Bedeutung (7) x Auftretenswahrscheinlichkeit (3) x Entdeckungswahrscheinlichkeit (5)  
= RPZ 105

**SHELL-PFMEA:** Dies ist einer der wichtigsten Schritte bei der Erstellung der teilespezifischen PFMEA. Hier wurden die Referenz-PFMEAs zusammengestellt, um den Anforderungen der spezifischen Teilenummer, d. h. aller Merkmale in der Prozessschrittfolge, zu entsprechen. Die einzigen Spalten, die in einer Shell PFMEA nicht vollständig ausgefüllt sind, sind Potential Effects (mögliche Auswirkungen), Severity Score (Schweregrad), Occurrence Score (Häufigkeit des Auftretens), Detection Score (Erkennung) und RPZ.

Das Team muss möglicherweise zusätzliche Details hinzufügen, wenn sie nicht in die Referenz-PFMEA aufgenommen wurden (oder bestimmte Details herausnehmen, die nicht anwendbar sind).

**LIEFERANT:** Ein Unternehmen oder eine Organisation, welche(s) ein Produkt oder eine Dienstleistung anbietet (siehe ISO 9000).

**ARBEITSANWEISUNG (AA):** Beschreibt, wie die Vorgänge eines bestimmten Prozesses durchgeführt werden.

Arbeitsanweisungen können „Vorgangsbaufliste“, „Router“, „Traveller“ oder „Shop Order“ beinhalten.

**EINHEITEN-FMEA:** AS13004 definiert dies als eine Liste „wiederverwendbarer Schadensbilder“, wie in Anhang A dieses Handbuchs angegeben. Sie werden auch als „Library“-Fehlerzustände bezeichnet.



## Anhang D: AS13004 Bewertungsprüfliste

Prüfliste Nr.	Kategorie	Klauselverweis	Frage	Konform		Anmerkungen
				Ja	Nein	
1	4.1 Übersicht Prozessrisikoidentifikation, -bewertung, -minderung und -prävention	4.1.1	Wurden die in diesem Standard definierten Mittel und Methoden in einem funktionsübergreifenden Team eingesetzt?			
2		4.1.2	Hat die Designorganisation eine Design-Risikoanalyse durchgeführt, die Risiken identifiziert, die mit dem sicheren und einwandfreien Betrieb des Produkts verbunden sind?			
3	4.2 Anwendbarkeit	4.2.1	Wurde AS13004 auf alle New Product Introduction-Programme angewendet?			
4		4.2.2	Wurde AS13004 auf Produkte und/oder Dienstleistungen angewendet, die derzeit in der Produktion verwendet werden, nachdem der Herstellungsprozess geändert, an einen neuen Standort verlegt oder eine Verbesserung angestrebt wurde?			
5		4.2.3	Wird AS13004, nachdem es aufgerufen ist, während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts angewendet, wobei das Prozessrisiko kontinuierlich überprüft wird und häufig Minderungsmaßnahmen festgelegt und ausgeführt werden?			
6		4.2.4	Wurde AS13004 an alle Lieferanten weitergegeben, die Produkte und Dienstleistungen herstellen und/oder liefern?			
7	4.3 Ausbildung und Kompetenz	4.3.1	Sind Kompetenz- und Trainingsanforderungen definiert, um die effektive Umsetzung der in AS13004 definierten Instrumente und Methoden zu unterstützen? Wurden diese von dem funktionsübergreifenden Team erfüllt, das die Implementierung leitet?			
8	4.4 Anforderungen an das Qualitätssicherungssystem	4.4.1	Verfügt die Organisation über einen dokumentierten und vollständig implementierten Prozess innerhalb ihres eigenen Qualitätssystems, der den Anforderungen von AS13004 entspricht?			
9	4.5 Allgemeine Anforderungen	4.5.1	Sind die Nummern von PFD, PFMEA und Kontrollplans singular, sofern nicht mit dem Kunden anders vereinbart? <i>Falls PFD, PFMEA und Kontrollpläne für die Prozessfamilie verwendet werden, werden bauteilspezifische Probleme identifiziert?</i>			
10		4.5.2	Wurde innerhalb des Qualitätssicherungssystems der Organisation ein Mechanismus definiert, der sicherstellt, dass die PFDs, PFMEAs und Kontrollpläne regelmäßig überprüft und aktualisiert werden, um Produkt-, Prozess- und Prüfänderungen sowie neue Erkenntnisse aus der Produktion zu erfassen?			
11		4.5.3	Wurden PFD, PFMEA und Kontrollplan miteinander verknüpft, um eine gute Lesbarkeit zu gewährleisten?			
12		4.5.4	Wird für alle nach AS13004 erstellten Dokumente die Vorgangsnummerierung und die Reihenfolge konsistent			

Prüfliste Nr.	Kategorie	Klauselverweis	Frage	Konform		Anmerkungen
				Ja	Nein	
13	4.6 Prozessflussdiagramm (PFD)	4.6.1	Wurden, soweit verfügbar, alle ermittelten Eingaben für das PFD einbezogen?			
14		4.6.2	Enthält das PFD Details aller Vorgänge in sequentieller Reihenfolge vom Eingang der Materialien über die Lagerung bis zum Versand der Fertigprodukte?			
15		4.6.3	Liefert das PFD eine klare und vollständige Beschreibung des Prozesses, der für den Erhalt, die Fertigung, Inspektion, Prüfung, den Schutz, die Lagerung und den Versand eines konformen Produkts erforderlich ist?			
16		4.6.4	Erfüllt der Inhalt des PFD die Anforderungen von AS13004? Falls nicht, wurde dies mit dem Kunden so vereinbart?			
17	4.7 Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (PFMEA)	4.7.1	Wurden, soweit verfügbar, alle identifizierten Inputs für die PFMEA aufgenommen? Falls nicht, gibt es einen Plan, die PFMEA erneut aufzurufen, sobald weitere Informationen verfügbar sind?			
18		4.7.4	Enthält die PFMEA alle im PFD identifizierten Vorgänge?			
19		4.7.5	Wurden die B-, A- und E-Bewertungszahlen (Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit) der PFMEA überprüft, aktualisiert und neu priorisiert, nachdem das Produkt oder der Prozess geändert, Nichtkonformitäten festgestellt oder neue Kontrollen eingeführt bzw. vorhandene Kontrollen geändert wurden?			
20		4.7.6.1	Erfüllt der Inhalt der PFMEA die Anforderungen von AS13004? Falls nicht, wurde dies mit dem Kunden so vereinbart?			
21		4.7.6.2	Wurden die durch die PFMEA identifizierten Risiken anhand der B-, A- und E-Bewertungskriterien nach AS13004 bewertet? Falls ein alternatives Bewertungskriterium verwendet wurde, wurde dies im Voraus mit dem Kunden vereinbart?			
22		4.7.7.1	Berücksichtigen die in der PFMEA identifizierten Fehlermodi alle möglichen Wege, auf denen das Produkt die Anforderungen oder die beabsichtigte Funktion nicht erfüllen könnte?			
23		4.7.7.2	Sind alle Produkt- und Prozessmerkmale und KCs, die einem potenziellen Fehlermodus zugeordnet sind, in der PFMEA dokumentiert?			
24		4.7.7.3	Sind alle Fehlermodi in der PFMEA in Bezug auf die Konstruktionsunterlagen dokumentiert?			
25		4.7.7.4	Sind alle in der PFMEA dokumentierten Fehlermodi auf den Prozessschritt abgestimmt, in dem sie verursacht werden?			

Prüfliste Nr.	Kategorie	Klauselverweis	Frage	Konform		Anmerkungen
				Ja	Nein	
26		4.7.8.1	Wurden die Auswirkungen für jeden potenziellen Ausfallmodus innerhalb der PFMEA identifiziert und dokumentiert? Beschreiben sie, soweit bekannt, die Auswirkungen auf die Produkt- oder Systemleistung im Hinblick auf das, was der Kunde bemerken oder erfahren könnte, und identifizieren sie eindeutig, ob die Auswirkungen eines Fehlerzustandes die Nichteinhaltung von Vorschriften beinhalten?			
27	4.7 Prozess- Fehlermöglichkeits- und Einfluss- Analyse (PFMEA)	4.7.9.1	Wurden alle ermittelten potenziellen Auswirkungen eines Fehlers nach Schweregrad eingestuft? Wurde dort, wo mehrere Fehlerauswirkungen identifiziert wurden, die höchste Gewichtung als Schweregrad verwendet?			
28		4.7.9.2	Wurden alle ermittelten potenziellen Auswirkungen eines Fehlers unabhängig von der Rangfolge des Auftretens und der Erkennung nach Schweregrad eingestuft?			
29		4.7.10.1	Wurde die mögliche Ursache in der PFMEA für jeden potenziellen Ausfallmodus ermittelt und dokumentiert? Wurden dort, wo mehrere Ursachen identifiziert wurden, diese auf separaten Zeilen in der PFMEA dokumentiert?			
30		4.7.11.1	Wurden bei der Entwicklung der PFMEA Präventions- und Detektionskontrollen erfasst und dokumentiert?			
31		4.7.12.1	Wurde die Fehlerursache nach Auftretenswahrscheinlichkeit eingestuft?			
32		4.7.12.2	Wurde die Fehlerursache unabhängig von der Schweregradbewertung und der Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Auftretenswahrscheinlichkeit eingestuft?			
33		4.7.13.1	Wurde die Wahrscheinlichkeit der Erkennung des Fehlers unter Berücksichtigung der im Prozess vorhandenen Erkennungskontrollen eingestuft?			
34		4.7.13.2	Wurde die Wahrscheinlichkeit der Erkennung des Fehlers unabhängig von der Schweregrad- und Häufigkeitsbewertung eingestuft?			
35		4.7.14.1	Wurde für jeden einzelnen Ausfallmodus eine RPN errechnet und eine Ursachenkombination identifiziert?			
36		4.7.14.2	Wurde auf der Grundlage der RPN eine priorisierte Liste von Maßnahmen zur Risikovermeidung und/oder -minderung definiert?			
37		4.7.15.1	Wurde die priorisierte Liste der Maßnahmen zur Risikovermeidung und/oder -minderung im PFMEA-Dokument dokumentiert?			

38		4.7.15.2	Wurden die Eigentümer und die angestrebten Fertigstellungstermine für die priorisierte Liste der Maßnahmen zur Risikovermeidung und/oder -minderung definiert und im PFMEA-Dokument dokumentiert?			
39		4.7.16.1	Wurden Prozess-KCs als Output aus der PFMEA in Einklang mit der Kundenanforderung und/oder den Organisationsrichtlinien identifiziert?			
40		4.7.16.2	Sind sowohl Produkt- als auch Prozess-KCs im PFMEA-Dokument erfasst?			

Prüfliste Nr.	Kategorie	Klauselverweis	Frage	Konform		Anmerkungen
				Ja	Nein	
41	4.8 Kontrollplan	4.8.1	Wurden, soweit verfügbar, alle identifizierten Inputs für den Kontrollplan einbezogen? Wenn nicht, gibt es einen Plan, auf den Kontrollplan zurückzukommen, sobald weitere Informationen verfügbar sind?			
42		4.8.2	Ist der Kontrollplan auf das PFD ausgerichtet und listet er die Kontrollen auf, die in der PFMEA identifiziert wurden?			
43		4.8.3	Wurde der Kontrollplan so früh wie möglich in der Prozessentwicklung erstellt und angewendet?			
44		4.8.4 / 4.8.5	Entspricht der Kontrollplan den in AS13004 definierten Mindestanforderungen?			
45		4.8.6	Sind alle im Kontrollplan identifizierten und dokumentierten Kontrollen in einer Arbeitsanweisung und/oder einem Inspektionsplan erfasst worden?			
46		4.8.7	Ist der Inhalt des Kontrollplans auf die Anforderungen von AS13004 ausgerichtet? Falls nicht, wurde dies mit dem Kunden vereinbart?			





© 2019 Rolls-Royce plc

Die Informationen in diesem Dokument sind das Eigentum von Rolls-Royce plc; ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung von Rolls-Royce plc dürfen sie weder vervielfältigt oder an Dritte weitergegeben noch zu anderen Zwecken verwendet werden als zu solchen, für die sie geliefert werden.

Diese Informationen sind auf der Grundlage der neuesten Informationen, die Rolls-Royce plc zur Verfügung stehen, in gutem Glauben gegeben. Auf sie wird weder eine Garantie noch irgendeine andere Gewährleistung gegeben, und sie dürfen weder für vertragliche noch für irgendwelche anderen Verpflichtungen dienen, die Rolls-Royce plc oder eine seiner Tochtergesellschaften oder Beteiligungsunternehmen binden.

[www.rolls-royce.com](http://www.rolls-royce.com)

Version 1.0, Juli 2019