

Zum anderen kommen mechanische Methoden, z. B.:

- Strahlen
- Bürsten
- Schleifen
- Dampfstrahlen zur Anwendung.

Wurde mechanisch vorgereinigt, so ist darauf zu achten, dass die Oberflächenfehler dabei verschlossen werden können und somit bei der anschließenden Eindringprüfung nicht zu Anzeige kommen können. Daher ist je nach dem Grad der erzeugten Oberflächenverdichtung ein entsprechender Ätz bzw. Wärmebehandlungsprozess erforderlich.

Nach der Vorreinigung müssen die Bauteile vor Aufbringung des Eindringmittels getrocknet werden.

#### Eindringvorgang

Das Eindringmittel wird durch Sprühen, Streichen, Übergießen oder Tauchen, so auf die Prüffläche aufgebracht, so dass eine vollständige Benetzung erfolgt. Die vollständige Benetzung wird nach der vorgeschriebenen Eindringdauer mit UV-Lampen geprüft.

#### Zwischenreinigung

Bei der Zwischenreinigung kommt es darauf an, ob ein direkt abwaschbares oder ein nachemulgierbares Eindringmittelsystem benutzt wird. Während das abwaschbare Eindringmittelsystem nach Verstreichen der Eindringzeit direkt mit Wasser von der Oberfläche abgewaschen wird, muss bei Verwendung eines nachemulgierbaren Systems das auf der Prüffläche restlich befindliche Eindringmittel mit einem Emulgator behandelt werden, bevor es sich mit Wasser entfernen lässt. Hier werden noch mal lipophile Emulgatoren unterschieden, die sich mit Eindringmittel vermischen, und hydrophile Emulgatoren, die im Eindringmittel nicht löslich sind.

### Trocknung

Verwendung von „zwangsbewegter Luft“ über Ofen, Föhn und Pressluft.

### Aufbringen des Entwicklers

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten eine gleichmäßige Entwicklerschicht auf das Werkstück aufzubringen.

- Naßentwickler auf Lösemittelbasis können mit Aerosoldosen, Becherpistole, Pumpen-Sprühsystemen aufgebracht werden.
- Trockenentwickler können mit Wirbel- oder Sinterkammer oder elektrostatisch aufgebracht werden.
- Naßentwickler auf Wasserbasis wurden in der Vergangenheit ausschließlich im Tauchverfahren eingesetzt. Inzwischen kann bei dem Farbeindringverfahren der Naßentwickler auf Wasserbasis durch Sprühen aufgebracht werden, wofür eine Niederdrucksprüheinheit eingesetzt werden kann.

### Nachreinigung

Zur Entfernung von Entwicklerschichten bzw. noch vorhandener Eindringmittelreste werden abhängig vom verwendeten Entwicklersystem Pressluft, Wasser oder Lösemittel eingesetzt. Zusätzlich werden im Bedarfsfall Korrosionsschutzmittel verwendet.

## **3.6.10. Entwicklung und Auswertung/Anzeige**

### Entwicklung

Wenn die Bauteile nach der Standardprozedur behandelt wurden, sind die Fehlstellen eigentlich vollständig mit Eindringmittel gefüllt. Bei Betrachtung der Teile kann aber einen Teil der Fehlstellen, nämlich die sehr feinen, immer noch nicht erkannt werden. Um diese feinen Stellen sichtbar zu machen, wird saugfähiges weißes Pulver auf die Oberfläche aufgebracht, das das Eindringmittel wieder teilweise aus den Fehlstellen heraus saugt. Aufgrund der großen Saugfähigkeit des Entwicklerpulvers zeigt sich nun die entwickelte Stelle bedeutend breiter, als die eigentliche Fehlstelle. Somit wird die Feststellung der Fehlstellen möglich.

Damit sich die Anzeigen auch richtig ausbilden können, ist eine Entwicklungszeit von mindestens 10 Minuten einzuhalten. Sie darf aber 4 Stunden nicht überschreiten, bevor ausgewertet wird.

### Auswertung/Anzeige

Eine Anzeige ist nur dann ein Fehler, wenn sie über die Zulässigkeitsgrenze des Abnahmestandards hinausgeht. Im anderen Fall bleibt es bei einer Anzeige. Ein Fehler beeinflusst grundsätzlich die Lebensdauer eines Bauteils, eine Anzeige tut das nicht. Grundsätzlich ist zunächst alles, was sich farbig gegenüber dem Hintergrund abhebt, als Anzeige zu werten. Hierbei sind Unterscheidungen zu machen.

Alle Anzeigen, deren Ursache nicht in metallurgischen, sondern in geometrischen Materialtrennungen zu suchen ist, werden unbedeutende Anzeigen genannt. Dazu gehören z.B. Anzeigen von Kerben oder Verbindungsstellen zweier Teile.

Etwas anderes ist es mit den bedeutenden Anzeigen. Hier muss genau nach Abnahmevorschrift verfahren werden. Dabei sind folgende zwei Arten zu unterscheiden:

#### **Typ I Anzeigen:**

sind solche, bei denen das Verhältnis von Länge zu Breite kleiner als 3:1 ist, d.h. man bezeichnet das als punktförmig.

#### **Typ II Anzeigen:**

sind solche, bei denen das Verhältnis von Länge zu Breite größer als 3:1 ist und das bezeichnet man als linear.

Zusätzlich wird dann die Anordnung der Anzeigen in verschiedene Klassen vorgenommen:

<b>Klasse A</b>	Einzelanzeigen
<b>Klasse B</b>	Mehrfachanzeigen ungerichtet
<b>Klasse C</b>	Mehrfachanzeigen ausgerichtet
<b>Klasse D</b>	Durchschneidung von Flächen (Kanten, Radien, Bohrungen, usw.)

Somit lässt sich eine einfache Beschreibung von Anzeigen anfertigen.

### **3.6.11. Prüfmittelsysteme**

Als Prüfmittelsystem wird die Kombination von Eindringmittel, Zwischenreiniger und Entwickler verstanden, die von einem Hersteller kommen müssen (Familie).

### **3.6.12. Eigenschaften der Prüfmittel**

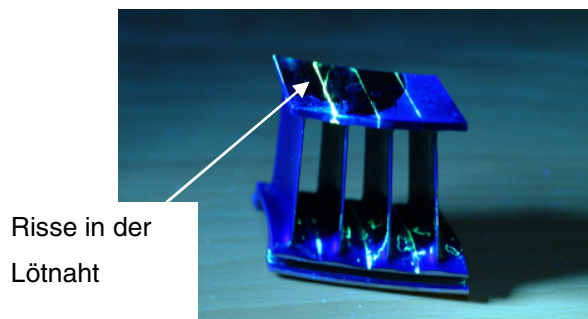
Die Wirksamkeit von Eindringmittel beruht in starkem Maße auf ihrer guten Benetzbarkeit und großen Oberflächenspannung bzw. Kapillarwirkung gegenüber dem zu prüfenden Werkstoff. Die Eindringmittel bestehen im wesentlichen aus einer Trägerflüssigkeit und einem roten bzw. fluoreszierenden Farbstoff. Weiter enthalten sie chemische Zusätze, die zur Verbesserung bestimmter, gewünschter Eigenschaften, genau aufeinander abgestimmt sind. Unabhängig vom Typ, kann an jedes gute Eindringmittel die gleiche allgemeine Forderung gestellt werden.

- Gute Benetzung
- Hohe Kapillarwirkung
- Leichte Abwaschbarkeit
- Geringe Verdunstungsrate
- Kurze Eindringzeit
- Schnelles Ausbluten aus den Fehlern
- Gutes Lösungsvermögen für den Farbstoff
- Hohe Leuchtkraft der Farben oder Fluoreszenz unter UV-Licht

- Keine korrodierende Wirkung auf den zu prüfenden Werkstoff
- Möglichst geruchlos
- Geringe toxische Wirkung auf den Anwender
- Hoher Flammpunkt
- Hohe chemische und physikalische Beständigkeit bei Lagerung
- Geringe Prüfmittelkosten

### 3.6.13. Anwendungen im Triebwerksbau

Die Eindringprüfung ist bei der MTU Aero Engines in München das am häufigsten verwendete ZfP-Verfahren. Beispielsweise werden die Leitschaufeln zu einem Leitschaufelsegment zusammengelötet. Diese Fügeverbindung wird mit Hilfe der Eindringprüfung kontrolliert.



**Abbildung 95: Gelötetes Leitschaufelsegment bei der Eindringprüfung [1]**

Um sich auf ein Eindringssystem/Prüfablauf festzulegen, sind eine Reihe von Faktoren, die sich auf den individuellen Prüfproblemen direkt ableiten, zu berücksichtigen. Dazu müssen nachfolgende Fragen beantwortet werden:

- Wie kritisch ist das Bauteil?
- Werkstoff?
- Welche Fehlergrößen müssen nachgewiesen werden?
- Form/ Abmessung der Bauteile?
- Oberflächenbeschaffenheit?
- Stückzahl/Taktzeit?
- Vorhandene Räumlichkeiten?
- Prüftemperatur?
- Umweltschutz/ Entsorgung der Prüfmittel?

In der Regel liegen unterschiedliche Prüfprobleme vor und es ist erforderlich Kompromisse zu machen, um die Prüfkosten durch die Begrenzung der eingesetzten Prüfmittelsysteme zu minimieren.

---

Quellenangaben:

MTU: Zusammenfassung der 6 ZfP-Verfahren.doc – ZfP-Verfahren, Eindringprüfung  
<http://www.dgzfp.de/KurseundPr%C3%BCfungen/PTEindringpr%C3%BCfung.aspx>

MTU Intranet

MTU: Eindringprüfung FPI Fluorescent Penetrant Inspection.ppt

[1] MTU Bilderarchiv - Eindringprüfung

### **3.7. Shearografie**

#### **3.7.1. Geschichte**

Das Prinzip der Shearografie wurde erstmals Anfang der 70er Jahre von Y.Y. Hung beschrieben. Es handelt sich um ein sogenanntes relatives Messverfahren, bei dem das Ergebnisbild den Unterschied zwischen zwei zeitlich versetzten Oberflächenzuständen des aufgenommenen Objektes darstellt.

Bereits Ende der 70er Jahre wurden die ersten Anlagen in der Industrie, zur Prüfung von Reifen, eingesetzt. Die Anwendung war jedoch nur mit beträchtlichen Aufwand und speziellen Einrichtungen möglich. In den letzten Jahren hat sich nun durch intensive Entwicklungsarbeit und Nutzung moderner Technologie ein leistungsfähiges, wirtschaftliches und industrietaugliches Verfahren entwickelt.

#### Entwicklung der digitalen Shearografie

Am Anfang diente chemisches, später zusätzliche oder ersatzweise elektrostatisches Filmmaterial, als lichtempfindliches Aufnahmematerial. Durch die Entwicklung von CCD-Kameras wurden die teuren Filme ab dem Ende der 80er Jahre nach und nach verdrängt. Diese Entwicklung führte zur filmlosen „digitalen Shearografie“, welche auf der sogenannten Speckle-Interferometrie, ein populärer Sammelbegriff ist „ESPI“ (Electriconic Speckle Pattern Interferometry), basiert. Somit wurden Fotoplaten oder Filme überflüssig und eine Werkstoffprüfung ohne Verbrauchsmedium möglich. Zudem können die Messungen ohne Schwierigkeit beliebig oft und jederzeit „auf Knopfdruck“ wiederholt werden.

### **3.7.2. Grundlagen**

Shearografie beinhaltet das englische Wort „to shear“, welches „scheren“ heißt.

Es ist ein laseroptisches Verfahren, welches zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt wird. Mit einem optischen Hilfsmittel wird das Bild eines Prüfkörpers verdoppelt und zugleich versetzt überlagert, was den Eindruck einer Scherung erzeugt. Deshalb ist in der deutschsprachigen Literatur auch gelegentlich der Begriff „Sche-  
rografie“ zu finden.

Dieses Verfahren ermöglicht die Aufdeckung von Fehlern, die äußerlich nicht sichtbar sind, d.h. die unter der Oberfläche liegen. Die Prüfung erfolgt berührungslos, ganzflächig, ist materialunabhängig, resistent gegen Störanfälligkeiten und erfolgt unter hohen Messgeschwindigkeiten. Zudem kann dieses ZfP-Verfahren bei Untersuchungen von Konzentrationsänderungen in Flüssigkeiten und Gasen eingesetzt werden. Somit ist verständlich, dass im Zuge des Prüfkosten- und Zeitdruckes das Interesse an diesem Verfahren zunimmt und aufgrund dessen die Integration in Produktionsprozesse ansteigt.

Mit Hilfe der Shearografie ist es möglich Materialverformungen im dreistelligen Nanometerbereich zu messen.

Anwendung findet dieses Verfahren überwiegend bei der Prüfung bzw. Qualitätssicherung von Verbundwerkstoffen. Vorzugsweise dort, wo erst eine mechanische, thermische oder pneumatische Belastung des Produkts potenzielle und versteckte Fehlstellen aufdecken kann.

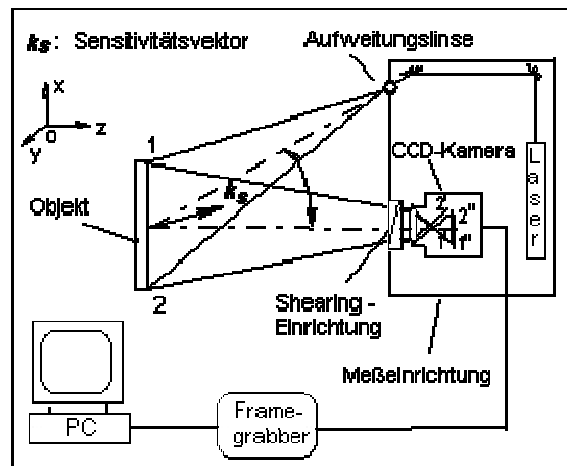
Wie genau diese Fehlerfindung möglich ist, wird nachfolgend beschrieben.

### 3.7.3. Verfahrensablauf

Bei der Shearografie wird der Prüfkörper mit einem aufgeweiteten Laserstrahl beleuchtet. Das diffus reflektierte Licht wird über ein Spiegelsystem einer CCD-Kamera zugeleitet. Durch eine geringfügige Drehung des vor der Kamera befindlichen Spiegels entstehen zwei seitlich gegeneinander verschobene (gescherte) und sich überlagernde Bilder, die interferieren und ein Speckle-Bild erzeugen. Dieses Bild wird im Rechner vom vorher

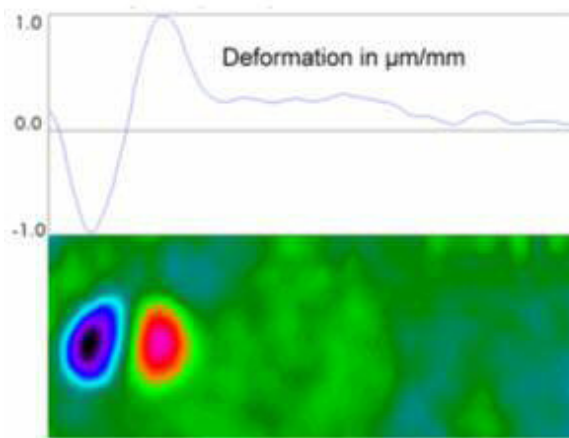
aufgenommenen Referenzbild subtrahiert. Die Differenz zeigt den Unterschied der beiden Bilder. Während der Prüfung mit einem Shearografie-System zur Detektion innerer Defekte an einem Werkstück muss dieser Prüfling einer mechanischen oder thermischen Belastung unterworfen werden, die eine geringfügige Verformung der Bauteiloberfläche bewirkt (das erste Bild bzw. Referenzbild ist das Bild ohne Belastung, das zweite Bild das mit Belastung).

Zu den thermischen Belastungen gehören die Wärmeeinleitung in das Prüfobjekt durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion. Zu den mechanischen Methoden zählen die Beanspruchung durch äußere Lasten wie Zug, Druck, Biegung und Torsion oder durch die Änderungen des Umgebungsdrucks mittels Vakuumkammern.



**Abbildung 96: Aufbau eines Shearografie-Systems**

Diese normalerweise homogene Verformungsverteilung in der Oberfläche wird dort eine verstärkte Verformung aufweisen, wo sich unter der Oberfläche ein innerer Defekt verbirgt. Somit ist eine Differenz zwischen dem sogenannten Referenzzustand 1 und dem Messzustand 2 ersichtlich. Diese Verformungsinhomogenitäten zum Ursprungszustand sind relativ und werden durch die Mes-



**Abbildung 97: Anzeige eines inneren Defekts in Form lokaler Verformungsinhomogenität [1]**

sung der Verformungsgradienten, d.h. die Differenz der beiden Zustände in gemessenen Scherungsrichtung und Scherungsabstand, ersichtlich. Bei der Shearografie findet ständig ein interferometrischer Vergleich von benachbarten Punkten statt – benachbart sind die Punkte, die durch den oben beschriebenen Versatz der beiden Bilder aufeinander abgebildet werden können -, und zwar für das gesamte Bild. Ändert sich der Abstand beider Punkte gleich viel oder gar nicht, kann keine differentielle Information gewonnen werden. Ändert sich hingegen die Lage eines Punktes zum benachbarten, so führt dieser Wegunterschied zu Phasenänderungen in den Lichtflecken (Speckles), die letztlich zu Interferenzen führen und als Streifenmuster sichtbar werden. Somit macht die Shearografie im Inneren verborgene Fehler an der Oberfläche sichtbar und liefert Informationen über das Verhalten unter Last bzw. im Normalzustand anderweitig unauffindbare Fehler. Aufgrund dieser Erkenntnis, ergibt sich ein weiterer Vorteil, nämlich, dass das Verhalten bzw. die Relevanz von Fehlstellen in Funktion der Bauteilbeanspruchung untersucht werden kann.

Die Ergebnisse bezüglich der Verformungsinhomogenitäten werden mit klaren Angaben der Defektgröße und -position ermittelt.

### Untersuchungsbedingungen

Bei der Prozessdurchführung ist zu beachten, dass sich zwischen den beiden Zuständen des untersuchten Objekts die Oberflächenbeschaffenheit nicht verändert,

d.h. ein Gegenstand kann verfolgt bzw. durchgehend untersucht, nicht aber bedeckt, oberflächenbehandelt oder gar entfernt werden.

Der Scherabstand und die Scherrichtung sind die entscheidenden Parameter für die Messempfindlichkeit.

### **3.7.4. Vor- und Nachteile der Shearografie**

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Echtzeitprüfung, welche ganzflächige Prüfungsgeschwindigkeiten in einer Größenordnung vom Quadratmeter in wenigen Minuten ermöglicht. Die Shearografie misst hochpräzise berührungslos nahezu alle Strukturen, dabei spielt es keine Rolle, ob die zu prüfenden Bereiche groß oder klein sind.

Bei komplexen Formen können bzw. werden Roboter eingesetzt, die den Prüfsensor samt Laserbeleuchtung schnell in optimaler Position zur untersuchenden Fläche bringen. Das Verfahren überzeugt mit flexibler Anpassungsfähigkeit an diversen Materialien und der Fähigkeit, trocken und an eingebauten Teilen zu Prüfen. Für Wartungsarbeiten an eingebauten Teilen werden portable Systeme eingesetzt, die auf der umschlossenen Prüffläche eine thermische, Schwingungs- oder Unterdruckbelastung direkt aufbringen.

Aufgrund der komplizierten Aufnahmetechnik (zwei leicht verschobene Bilder mit großem Überlappbereich) haben die shearografischen Verformungsbilder einen höheren Interpretationsbedarf als ESPI - Bilder oder Bilder aus der Thermografie.

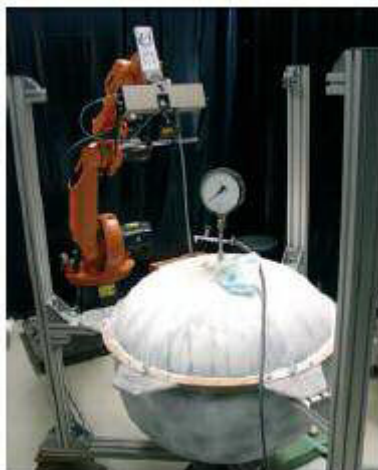
Die Konkurrenz zur Shearografie stellt die Thermografie dar, welche durch Messung von Temperaturunterschieden Fehlstellen unterhalb der Oberfläche entdeckt. Früher wurden an Dichtungsringen aufgeklebten Metallfilze mit Hilfe von Shearografie geprüft. Jedoch stellt die Thermografie für dieses Anwendungsgebiet das wirtschaftlichere Verfahren dar. Daraus lässt sich schließen, dass die Vorteile der Shearografie nur bei passendem Anwendungsgebiet voll genutzt werden können.

### 3.7.5. Anwendungen in der Luftfahrt

Bei der MTU Aero Engines in München wurde die Shearografie vollständig durch die Thermografie substituiert.

In der Luftfahrt findet die Shearografie am häufigsten Anwendung im Bereich der Faserverbundwerkstoffe z.B. der Rumpfbereich des A380 aus glasfaserverstärktem Aluminiumlaminat. Auch die Rotorblätter von Hubschraubern und Flugzeugen werden shearigrafiert.

Mit Hilfe dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens werden beispielsweise auch die CFK-Tanks von Airbus Flugzeugen geprüft. Hierzu wird der Tank durch Änderung des Tankinnendrucks belastet. Wie in Abbildung 98 und 99 zu erkennen, zeigt das Messergebnis eine Delaminationsstelle mit einem Durchmesser von ca. 8mm.



**Abbildung 98: CFK-Tank als Prüfobjekt [2]**



**Abbildung 99: Delaminationsstelle [3]**

---

Quellenangaben:

<http://www.ndt.net/article/dgzfp/pdf/zfp78-honlet.pdf>

<http://www.uni-online.de/artikel.php?id=4927>

<http://idw-online.de/pages/de/news203234>

Frauenhofer IPA: Shearografie zur Detektion von äußerl. nicht sichtbaren Fehlstellen

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.200790016/pdf>

<http://ndt.net/article/dgzfp04/papers/v19/v19.htm>

[1] <http://www.ndt.net/article/dgzfp/pdf/zfp78-honlet.pdf>

[2], [3] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.200790016/pdf>

## ***Sichtprüfung***

### **3.7.6. Grundlagen**

Die Sichtprüfung ist das älteste zerstörungsfreie Prüfverfahren. Sie ist sehr universell und mitunter einfach einsetzbar. Aufgabe der Sichtprüfung ist, visuell auffindbare Defekte, oder etwas allgemeiner ausgedrückt, Abweichungen von Vorgaben eines Gegenstandes - mit und ohne Hilfsmittel - zu erkennen und zu beschreiben.

Die Sichtprüfung wird in allen Bereichen, in denen Bauteile gehandhabt werden, angewendet: Fertigung, Instandhaltung, Montage, Schadensanalyse.

Voraussetzungen für die Durchführung der Sichtprüfung:

- In aller Regel sind keine speziellen Vorbereitungen notwendig.
- Die Oberfläche muss sich in einem solchen Zustand befinden, dass der zu führende Nachweis sicher erbracht werden kann. Dies kann spezielle Arbeitsfolgen, die das Bauteil vorab reinigen, notwendig machen.
- Die Beleuchtungsquelle soll den Betrachter weder blenden noch durch Reflexe stören.

Die visuelle Prüfung (Visual Testing VT) begleitet ein Produkt über den gesamten „Lebensweg“ und wird meistens durch andere Prüfungen ergänzt z. B. Tasten, Fühlen.

### **3.7.7. Allgemeine und spezielle Sichtprüfung**

#### Allgemeine Sichtprüfung

Bei der allgemeinen Sichtprüfung handelt es sich um eine Prüfaufgabe, welche einen groben (allgemeinen) Überblick verschafft.

Beispiele solcher Prüfaufgaben sind Identifikation, Überprüfung der Vollständigkeit, Sauberkeit, Anordnung, Kennzeichnung, Form, Herstellungsverfahren (einfache äußere Merkmale), Werkstoff (anhand z.B. Farbe oder Magnet), Bauart, Ausführung, Anzahl der Einzelteile, etc.

Die allgemeine Sichtprüfung wird z.B. bei der Wareneingangsprüfung angewendet.

### Spezielle Sichtprüfung

Bei der speziellen Sichtprüfung handelt sich um eine Prüfaufgabe, bei der man gezielt bestimmte Eigenschaften des Prüfgegenstandes erfassen und bewerten möchte. Es werden in der Regel besondere Anforderungen an Beleuchtungs- und Betrachtungsbedingungen bzw. an Hilfsmittel gestellt.

Zu der speziellen Sichtprüfung gehören als Prüfaufgabe:

- Prüfung auf Gestaltabweichung  
z.B. Ebenheit, Verdrehung, Geradheit, Rundheit, Profil, Kontur, Versatz, etc.
- Oberflächengestaltabweichungen  
z.B. Welligkeit, Rauheit, (Rillen, Riefen, Schuppen)
- Prüfung auf Lageabweichung  
Bei zwei oder mehreren Teilen: Abweichungen bezüglich Parallelität, Rechtwinkligkeit bzw. Winkligkeit, Position, Symmetrie, Konzentrität, Plan- bzw. Rundlauf.
- Prüfung auf Defekte (Fehlerprüfung)  
z.B. Risse, Poren, Schlackeneinschlüsse, Einbrandkerben, Lunker, etc
- Schadensprüfung (Prüfung an gelaufenen Teilen auf Beschädigung, Korrosion, Fretting usw.)  
z.B. nach Unfällen auf Gewalt- oder Dauerbrüchen

### **3.7.8. Arbeitstechnik der Sichtprüfung**

Die Aufgabe der Sichtprüfung ist, visuell auffindbare Defekte oder - etwas allgemeiner ausgedrückt - Abweichungen von Vorgaben eines Gegenstandes zu erkennen und zu beschreiben. Um diese Aufgabenstellung korrekt und gewissenhaft vornehmen zu können, sind einige Grundvoraussetzungen zu beachten.

Zu den Grundvoraussetzungen gehören:

#### Vorbereitung der Oberfläche

In vielen Fällen ist eine Vorbereitung der zu betrachtenden Bauteiloberfläche überhaupt nicht erforderlich. Manchmal muss sogar ausdrücklich auf jegliche Art der Vorbereitung verzichtet werden.

Grundsätzlich gilt: Die Oberfläche muss sich in einem solchen Zustand befinden, dass der zu führende Nachweis sicher erbracht werden kann.

#### Reinigung

<b>Mechanische Reinigung</b>	<b>Thermische Reinigung</b>	<b>Chemische Reinigung</b>
Bürsten	Im Ofen	Beizen
Schmirgeln	Mit offener Flamme	mit Lösungsmitteln
Schleifen	Mit Heißluft	
Feilen	Mit Tiefkalt-Behandlung	
Strahlen	Abdampfen m. Heißdampf	
Hochdruckwasserstrahlen		

Für alle Reinigungsmethoden/-techniken gilt folgender Grundsatz:

Durch die Anwendung darf das zu behandelnde Bauteil:

- a) nicht in seiner Gebrauchseigenschaft beeinträchtigt werden
- b) nicht so verändert werden, dass dadurch Aufgabenstellung/Prüfziel in irgendeiner Weise in Frage gestellt werden kann

### **3.7.9. Hilfsmittel**

Eine wesentliche Voraussetzung für das Ergebnis einer Sichtprüfung ist die visuelle Eignung des eingesetzten Personals. Darüber hinaus ist ein hohes Maß an Erfahrung im Umgang mit den nachfolgend beschriebenen Hilfsmitteln nötig. Neben der Sichtprüfung mit „unbewaffnetem“ Auge (eine normale Brille ist damit nicht gemeint) können folgende Hilfsmittel eingesetzt werden:

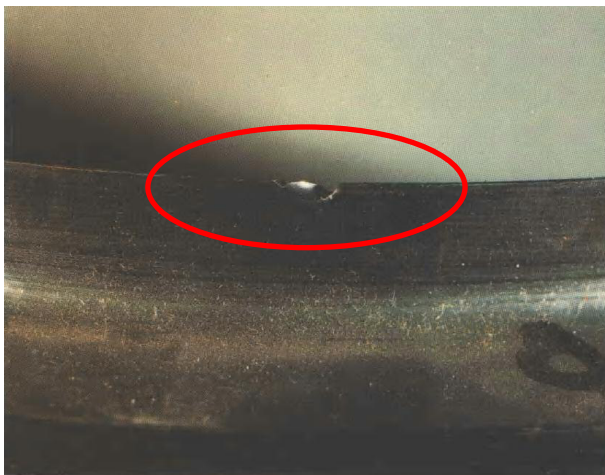
- Lupen und Lupenbrillen
- Mikroskope und ggf. Stereomikroskope
- Kontrollspiegel
- Profillehren
- Flexible Endoskope (Fiberskope)

Die beiden zu erst genannten Hilfsmittel sollen dazu dienen, dem menschlichen Auge auf Grund seiner Visusbegrenzung verborgen gebliebene Defekte bzw. Unregelmäßigkeiten mit Hilfe des Vergrößerungseffektes kenntlich zu machen. Bei den Lupen und Lupenbrillen sind Vergrößerungen bis max. 10-fach sinnvoll.

Die Kontrollspiegel dienen dem Zweck, Hohlräume geringer Ausdehnung, bei denen sich der Einsatz von Endoskopen nicht lohnt, und schwer zugängliche Objektbereiche zu inspizieren.

### 3.7.10. Anwendungen im Triebwerksbau

Bei der MTU Aero Engines in München wird die Sichtprüfung bei allen Bauteilen in der Warenannahme, zwischen den einzelnen Bearbeitungsprozessen und abschließend bei der Schlusskontrolle angewendet. Abbildung 100 - Kerbe und Abbildung 101 - Delle zeigen Fehler bzw. Beschädigungen, welche durch die Sichtprüfung als Ausschuss deklariert werden.



**Abbildung 100: Kerbe als Sichtanzeige [1]**



**Abbildung 101: Delle als Sichtanzeige [2]**

---

Quellenangaben:

MTU: Zusammenfassung der 6 ZfP-Verfahren.doc – ZfP-Verfahren, Sichtprüfung

MTU: Sichtprüfung Schweißen.ppt

[1], [2] MTU: Sichtprüfung Schweißen.ppt

## **4. Oberflächenbehandlung**

### **4.1. Allgemeines**

Im Allgemeinen bezeichnet man als Beschichten das Aufbringen einer fest haftenden Schicht (nicht nur) auf die Oberfläche eines Werkstoffes. Diese Schicht besteht entweder aus einzelnen, einfachen oder mehreren in sich zusammenhängenden Schichten bzw. Legierungen. Die aufzubringenden Beschichtungsmaterialien können in folgenden Zuständen vorliegen:

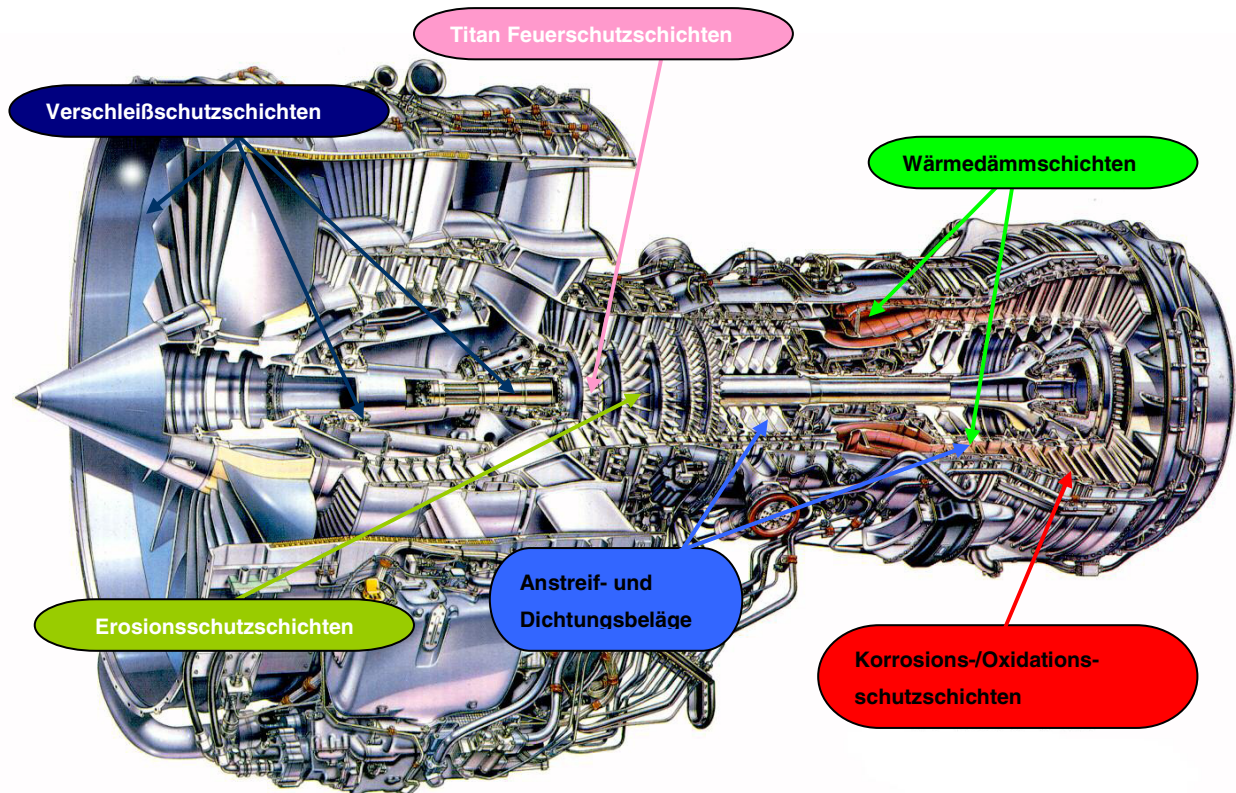
- gasförmig, z. B. CVD und PVD
- flüssig, z. B. Lackieren und Emaillieren
- fest, z. B. Auftragsschweißen und thermisches Spritzen
- gelöst, z. B. Galvanisieren

Beschichtungen auf Triebwerksbauteilen wie z.B. Dichtringen, Turbinenschaufeln usw. sind wesentliche Voraussetzungen, um den heutigen Anforderungen an Triebwerken wie:

- höhere Leistung
- hoher Wirkungsgrad
- saubere Verbrennung mit niedrigem Schadstoffausstoß
- niedrige Betriebskosten

gerecht zu werden.

Im Triebwerk sind die Schaufelwerkstoffe hohen Temperaturen ausgesetzt. Die hierzu verwendeten Materialien besitzen eine hohe Warmfestigkeit deren Lebensdauer mit entsprechender Oberflächenbehandlung verlängert wird. Je nach Triebwerksbereich werden unterschiedliche Anforderungen an Beschichtungsverfahren gestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt, die einzelnen Bereiche, in denen die spezielle Oberflächenbehandlungen notwendig sind.



**Abbildung 102: Beschichtungsvarianten je Triebwerksbereich**  
 (Triebwerk: V2500)

## **4.2. Beschichtungen im Triebwerksbau**

Aufgrund der Vielzahl an Beschichtungsmöglichkeiten und –verfahren wird dieses Kapitel speziell auf die Anforderungen im Triebwerksbau beschränkt bzw. es werden, die Verfahren erläutert, die in der MTU Aero Engines in München angewandt werden.

### **4.2.1. Oxidationsschutzschichten**

Wie bereits oben erwähnt wurde, sind hochwarmfeste Werkstoffe in einem Triebwerk unumgänglich. Zur Steigerung der Warmfestigkeit werden weitere Elemente in den Grundwerkstoff zulegiert. Dies hat jedoch zur Folge, dass der Oxidations- und Heiß-

gaskorrosionswiderstand durch die komplexen Legierungen verschlechtert wird. Somit ergibt sich die Forderung nach einer entsprechenden Oxidationsschutzschicht.

Typische Vertreter für Schutzschichten primär gegen Oxidationsangriffe sind Platin-aluminid- (Pt/Al) und Aluminid- (Al) Schichten. Diese Art von Schicht wird zum einen bei Hochdruckturbinenschaufeln in den inneren Kühlkanälen, wie auch als äußere Schutzschicht aufgebracht. Pt/Al-Schichten weisen eine deutlich höhere Oxidationsbeständigkeit gegenüber den Al-Schichten auf. Aus diesem Grund findet diese Schicht vor allem bei den thermisch höher belasteten Hochdruckturbinenschaufeln Verwendung. Hingegen werden die Kühlkanäle im Schaufelinneren und die im Niederdruckbereich eingesetzten Schaufeln, mit einer Al-Schicht beschichtet.

Zur Beschichtung der Schaufelblattoberfläche wird für eine Pt/Al-Schicht Platin über den galvanischen Prozess abgeschieden. Zur besseren Anbindung an den Grundwerkstoff erfolgt danach eine Diffusionsglühbehandlung. Daraufhin wird Aluminium im Diffusionsglühverfahren aus einer Al-angereicherten Atmosphäre, dem Alitierprozess in den Pt/Al-Verbund eingebracht. Das Beschichten der inneren Kühlkanäle kann nur während des Alitierprozesses stattfinden. Das Aufbringen einer Pt/Al-Schicht, d.h. die Platinabscheidung, im Inneren der Schaufel ist nicht möglich. Eine weitere Möglichkeit, die Pt/Al-Schicht auf der Schaufeloberfläche aufzubringen, ist das klassische PVD-Verfahren.

Unter einem Alitierprozess versteht man das Aufbringen einer besonders oxidationsbeständigen Ni-Al-Phase durch das Anreichern von Aluminium.

PVD ist die Abkürzung für physical vapour deposition. Es ist ein Oberbegriff, unter dem verschiedene vakuumbasierte Beschichtungsverfahren, z. B. Elektronenstrahlverdampfen, Sputtern, Ionenplattieren und Aufdampfen, vereint sind. Kennzeichnend für dieses Verfahren ist die Bildung der Schicht durch Kondensation des Materialdampfes auf dem zu beschichtenden Material.

#### **4.2.2. Heißgaskorrosionsschutzschichten**

Bei Temperaturen  $> 850^{\circ}\text{C}$  besteht die Notwendigkeit, die Schaufelblattoberfläche vor Heißgaskorrosion zu schützen. Im Allgemeinen wird bei der MTU Aero Engines die bereits beschriebene Pt/Al-Schicht ebenfalls als Heißgaskorrosionsschutzschicht eingesetzt. Des Weiteren hat sich als geeignete Schutzschicht, hierbei auch die MCrAlY-Legierung herausgestellt. Mit höherem Al-Gehalt wird die Oxidationsbeständigkeit durch die Bildung von Aluminiumoxid verbessert. Bei Einsatztemperaturen  $< 850^{\circ}\text{C}$  sollte der Anteil des Cr-Gehalten in der MCrAlY-Legierung erhöht werden. Daraus folgt die Zunahme der Cr-Oxidationsbildung, welche Schutz vor Sulfidation liefert.

MCrAlY-Schichten werden sehr häufig mit dem Niederdruck-/ Vakuumplasmaspritzen aufgebracht. Die Legierungsbestandteile liegen pulverförmig vor und werden dem Plasma zugeführt. Dieses ionisierte Gas schmilzt das Pulver auf, welches danach mit Hilfe einer Düse auf die zu beschichtende Oberfläche aufgespritzt wird. Der Prozess findet i. d. R. unter Vakuum statt, bei einigen Anwendungen läuft der Spritzvorgang auch an Atmosphäre ab. Ein weiteres Verfahren, dass sich für das Aufbringen von MCrAlY-Legierungen eignet, ist das Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD, electron beam physical vapour deposition). Dieses Beschichtungsverfahren ist dem obengenannten PVD zu zuordnen, d.h. die Legierung wird verdampft und anschließend auf der zu beschichtenden Oberfläche auskondensiert.

Nach jedem der beiden erläuterten Verfahren ist ein Diffusionsglühvorgang anzuschließen, um die Anbindung an den Grundwerkstoff zu verbessern. Dabei wird die innere Schichtstruktur dichter und widerstandsfähiger.

Inchromierschichten, die mit dem Diffusionsverfahren, ähnlich wie Aliterschichten, erzeugt werden, eignen sich als Sulfidationsschutz. Verwendet wird diese Beschichtung vorzugsweise im thermisch gering beanspruchten ( $< 850^{\circ}\text{C}$ ) aber dafür stark mechanisch beanspruchten Bereich am Schaufelfuß unterhalb der Plattform.

### 4.2.3. Wärmedämmschichten

Keramische Wärmedämmschichten sorgen dafür, dass der metallische Grundwerkstoff der Schaufeln vor festigkeitsmindernden Temperaturerhöhungen geschützt wird. Diese Art von Beschichtung wird auf die bereits bestehenden oxidations-/ heißgas-korrosionsbeständigen Schichten aufgebracht.

Als Verfahren zur Aufbringung der wärmedämmenden Keramikschrift (Zirkondioxid) haben sich zwei Verfahren bewährt, das Thermische Spritzen und das EB-PVD-Verfahren. Kennzeichnend für diese plasmagespritzte Zirkondioxidschichten ist eine Struktur mit vielen Poren und Mikrorissen, die die Dehnung des metallischen Grundwerkstoffes ohne Schädigung überstehen. Bei Aufbringung der Wärmedämmschicht mit dem EB-PVD-Verfahren ist eine höhere Lebensdauer zu erzielen. Durch das Aufdampfen der Zirkondioxidschicht wachsen nebeneinander liegende Stängelkristalle. Diese Struktur ermöglicht einen besseren Ausgleich der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Zirkondioxid und Metall. Zusätzlich ist es möglich glatte Oberflächen und Schaufeln mit Kühlbohrungen durch EB-PVD zu beschichten, dies hat den Vorteil, dass eine nachfolgende Glättung entfällt.



**Abbildung 103: CF6 Schaufel mit keramischer Wärmedämmschicht [1]**

### **4.3. Geeignete Prüfverfahren**

Zur geeigneten Überprüfung der ordnungs- bzw. vorschriftsgemäßen Aufbringung der Schutzschichten besteht die Möglichkeit zwischen zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfverfahren auszuwählen. Mit Hilfe der metallografische Untersuchung lässt sich die Gefügestruktur bzw. –ausbildung gut untersuchen. Bei den zerstörungsfreien Prüfverfahren sind die Thermografie und das Sichtprüfen zu verwenden. Durch die Thermografie können Anbindungsfehler detektiert werden. Zur Überprüfung der aufgetragenen Schichtdicke, werden die Verfahren Röntgen und Wirbelstrom eingesetzt.

---

#### Quellenangaben:

N. Kanani: Galvanotechnik, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, 2009

H. Hofmann, J. Spindler: Verfahren der Oberflächentechnik, Carl Hanser Verlag, 2004

[http://mtu.de/de/technologies/engineering\\_news/development/Cosack\\_Schutzschichten\\_auf\\_Turbinenschaufeln.pdf](http://mtu.de/de/technologies/engineering_news/development/Cosack_Schutzschichten_auf_Turbinenschaufeln.pdf)

<http://www.fachwissen-technik.de/verfahren/metallische-beschichtungsverfahren.html>

[1]: MTU Bilderarchiv - Röntgen

## 5. Zerstörende Prüfverfahren

### 5.1. Grundlagen

Die Werkstoffprüfung ist die Basis für das werkstofftechnische Qualitätsmanagement und für alle Qualitätsmanagementsysteme nach DIN ISO 9000ff.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Einteilung der verschiedenen zerstörenden und der bedingt zerstörungsfreien Prüfverfahren.

ZERSTÖRENDE WERKSTOFFPRÜFVERFAHREN				
Statische und quasistatische Festigkeitsprüfungen		Dynamische Festigkeitsprüfungen		Sonderprüfverfahren
Kurzzeitversuche	Langzeitversuche	Schlagversuche	Dauerschwingversuche	Beispiele
Zugversuche, Druckversuche	Zug-Zeitstandsversuche	Schlagzugversuche	Zug-Druck-Wechselversuche	Faltprobe
Biegeversuche	Druck-Zeitstandsversuche	Schlagdruckversuche	Zug-Schwellversuche	Zerspanungsprobe
Scherversuche	Biege-Zeitstandsversuche	Schlagbiegeversuche	Druck-Schwellversuche	Schweißprobe
Torsionsversuche		Fallwerkversuche	Biege-Wechselversuche	Tiefungsversuche nach Erichsen
Bruchzähigkeitsversuche		Kerbschlagbiegeversuche	Torsions-Wechselversuche	Näpfchenzugversuche

**Abbildung 104: Einteilung zerstörende Werkstoffprüfverfahren [1]**

Bedingt zerstörungsfreie WERKSTOFFPRÜFVERFAHREN			
Härteprüfverfahren		Strukturanalysen	Spektroskopie
statische Härteprüfungen	dynamische Härteprüfungen		
Mohssche Ritzhärte	Fallhärte	Metallografie	Funkenprobe
Kugeleindruck-Härte Brinell HB Rockwell HRB/HRC	Pendelhärte	Schliffherstellung und Mikroskopie	Spektroskopie mit Lichtbogen- bzw. Plasma- Anregung
Pyramideneindruck- Härte nach Vickers HV und Knoop	Rückprall-Härte	Abdruck-Verfahren nach Baumann	Röntgen- fluoreszenz
Kegeleindruck-Härte Rockwell HRC	Schlaghammer Poldi-Hammer		

**Abbildung 105: Einteilung bedingt zerstörungsfreie Werkstoffprüfung [2]**

Da beispielsweise bei einer Härteprüfung „nur“ durch einen kleinen Eindruck in die Oberfläche geprüft wird und das Werkstück so zu sagen nicht zerstört wurde, ist die Härteprüfung zu den bedingt zerstörungsfreien Prüfung zu zuordnen.

In diesen Schulungsunterlagen werden die beiden Gruppen der Werkstoffprüfverfahren unter dem Oberbegriff „zerstörende Prüfverfahren“ zusammen gefasst.

## **5.2. Beanspruchungsarten**

Grundprinzip der zerstörenden Prüfung ist es, eine Probe nach genormter Vorschrift und in genau definierter Weise zu belasten. Dabei wird der Kraftverlauf bis zum Bruch gemessen. In der Regel wird die zum Bruch erforderliche Kraft auf die Bruchfläche bezogen und daraus die Festigkeit bzw. maximal ertragene Spannung berechnet.

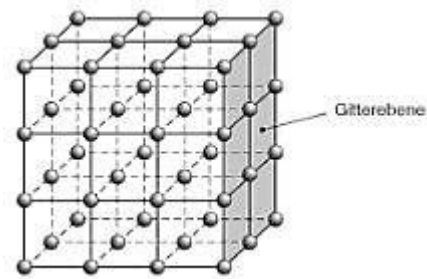
Vier elementare Arten mechanischer Beanspruchung werden dabei unterschieden:

1. Zug/Druck
2. Schub
3. Torsion
4. Biegung

### **5.3. Verformung von Metallen, Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen**

#### Metalle

Alle metallischen Werkstoffe sind kristallin, d.h. geregelt aufgebaut. Die Atome sitzen bildlich auf den Ecken eines Würfels. Der Abstand der einzelnen Atome ist durch die elektrische Ladung des Atomkerns gegeben, was zu abstoßenden Kräften zwischen den einzelnen Atomkernen führt. Das Elektronengas hält die Kerne zusammen und so die Atome auf ihren Plätzen. Mehrere dieser Würfel bilden das Atomgitter.



**Abbildung 106: Einfaches kubisches Raumgitter [3]**

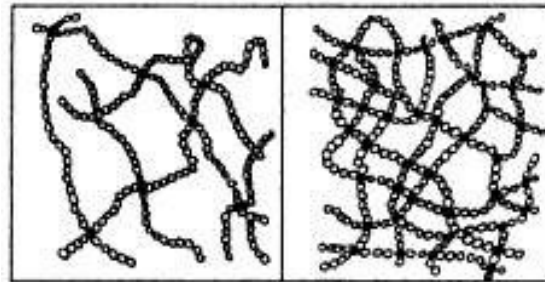
Bei elastischer Verformung werden die Atomkerne gewaltsam voneinander entfernt, jedoch nicht getrennt. Nimmt man die Belastung zurück, nehmen die Atomkerne wieder ihre alte Position ein. Bei dieser elastischen Verformung handelt es sich um einen umkehrbarer bzw. reversiblen Prozess.

Bei zu großer Belastung hingegen wird diese elastische Grenze des Werkstoffes überschritten und es kommt zur Wanderung der Atome im Gitterverbund. Bei Entlastung der Probe erfolgt keine Rückbildung in die alte Position, die Verformung ist nicht mehr umkehrbar d.h. irreversibel. Bei Überschreitung der elastischen Grenze ist die Folge eine plastische Verformung des Werkstoffes.

Jedes Atomgitter ist fehlerhaft aufgebaut. Bringt man nun eine bestimmte Belastung auf einen fehlerbehafteten Werkstoff, so können sich die Atome durch diese Fehler im Gitter bewegen und so zu einer nicht mehr umkehrbaren, plastischen (irreversiblen) Verformung führen. Die Tatsache des fehlerhaften Aufbaus eines Atomgitters ermöglicht die Verformung metallischer Werkstoffe. Ein fehlerfrei aufgebauter Werkstoff wäre nicht formbar.

### Kunststoffe

Diese Art von Werkstoff hingegen ist meist regellos aufgebaut. Die Kettenmoleküle liegen nach dem Zufallsprinzip in verknäuelter Form vor. Die zwischen den einzelnen Ketten wirkenden Kräften sind relativ klein.

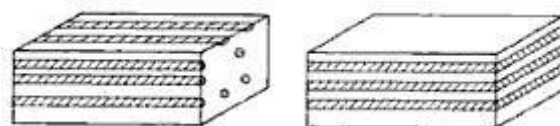


**Abbildung 107:**  
links - schwach vernetzte Ketten (Elastomer),  
rechts - stark vernetzte Ketten (Duroplast) [4]

Bei elastischer Verformung werden die Ketten voneinander entfernt. Bei unvernnetzten Kunststoffen sind die Rückstellkräfte sehr klein und schon geringe Belastungen können zu plastischer Verformung führen, d.h. die Ketten gleiten dann aufeinander ab und kehren nach der Entlastung nicht in ihre ursprüngliche Lage zurück. Wenn die einzelnen Kettenglieder wiederum durch Ketten miteinander verbunden sind, spricht man von einer Vernetzung. Vernetzte Werkstoffe lassen sich elastisch verformen, in dem das Netz gestreckt wird. Eine plastische Verformung ist je nach Grad der Vernetzung in Kombination mit der Höhe der zu belastenden Kraft nur geringfügig oder auch gar nicht möglich.

### Faserverbundwerkstoffe

Diese Werkstoffe sind aus Fasern, z.B. Glas- oder Kohlefasern und einer Matrix aufgebaut. Das Verformungsverhalten dieser Werkstoffe ist sehr stark richtungsabhängig. Die Faser ist in die Matrix aus Kunststoff eingebettet und hält diese auf Abstand, schützt die Faseroberfläche und überträgt die Kräfte in der Faser.



**Abbildung 108:**  
links - Faser- bzw. Stabverbund,  
rechts - Fasermatten- bzw. Schichtverbund [5]

Die Matrix kann sich nicht mehr verformen als die Faser, d.h. das Verformungsverhalten des Werkstoffs wird durch die Faser bestimmt. Die Faser wird meist nur elastisch verformt und bricht spröde.

---

Quellenangaben:

H. Czichos, M. Hennecke: Das Ingenieurwissen, Springer Verlag, 32. Auflage, 2004

Bargel, Schulze: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

W. Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag, 5. Auflage, 2006

E. Hering: Taschenbuch für Wirtschaftsingenieure, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, 2009

[1], [2] E. Hering: Taschenbuch für Wirtschaftsingenieure, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, 2009

[3] Bargel, Schulze: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

[4] W. Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag, 5. Auflage, 2006

[5] H. Czichos, M. Hennecke: Das Ingenieurwissen, Springer Verlag, 32. Auflage, 2004

## **5.4. Statische Prüfverfahren**

Zur Charakterisierung eines Werkstoffes dienen je nach Einsatzgebiet des Werkstoffes verschiedenen Kenngrößen. In den dazugehörigen Leistungsblättern der Materialien sind die jeweiligen Zugeigenschaften, Härte und die Beigeeigenschaften festgelegt. Zusätzlich beinhalten die Beiblätter eine umfangreiche Charakterisierung des Werkstoffes, wie z. B. Stauchgrenze, Ermüdungs- und bruchmechanische Kennwerte.

Die aus dem Zugversuch gewonnenen Kennwerte haben eine dominierende Rolle bei der Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften für die Qualitätssicherung und Auslegung. Aufgrund dessen wird nachfolgend das zerstörende Prüfverfahren „Zugprüfung“ speziell für die verschiedenen Materialien - Metall, Kunststoff und Faserverbundwerkstoffe - einzeln betrachtet.

### **5.4.1. Zugprüfung**

#### Metall

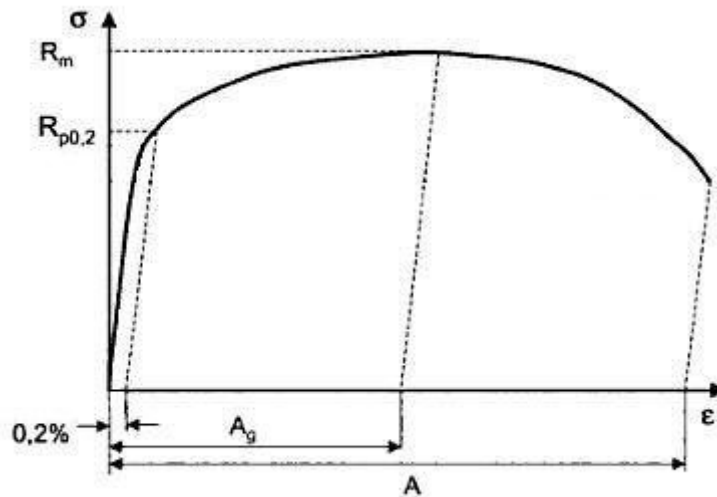
Beim Zugversuch wird eine Probe bei gleichmäßig, geringer Geschwindigkeit bis zum Bruch belastet. Während der Prüfung wird die aufgebrachte Kraft und die Längenänderung der Probe kontinuierlich gemessen. Aus der Kraft  $F$  wird zusammen mit dem Ursprungsflächenquerschnitt  $S_0$  die Nennspannung  $\sigma$  berechnet.

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Die Gesamtdehnung der Probe ist aus der Längenänderung  $\Delta L$  in Bezug auf die Ausgangslänge  $L_0$  zu ermitteln.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Aus der Abhängigkeit der Spannung und Dehnung ergibt sich das unten dargestellte  $\sigma - \varepsilon$  Diagramm.



**Abbildung 109: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [1]**  
 (ohne ausgeprägte Streckgrenzen)

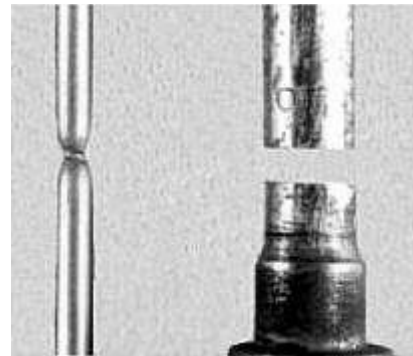
Das Diagramm zeigt zu Beginn einen linearen Anstieg und endet an der oberen Streckgrenze  $R_{p0,2}$ . Diese Gerade stellt den elastischen Bereich des Werkstoffes dar und wird als Hook'sche Gerade bezeichnet. Diese ist über das gleichnamige Gesetz aus dem Produkt von Dehnung und dem Elastizitätsmodul des Werkstoffes definiert:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Der elastische Bereich geht in den plastischen Bereich über, welcher sich, in der Regel, parabelförmig bzw. -ähnlich ausbildet. Der höchste Punkt auf dieser Kurve stellt den Höchstwert der Spannung dar und ist als maximale Zugfestigkeit  $R_m$  definiert. Nach Überschreitung dieses Punktes schnürt sich die Probe ein bis diese schließlich bricht. Die bleibende Dehnung nach dem Bruch wird als Bruchdehnung  $A$  bezeichnet. Als Gleichmaßdehnung  $A_g$  ist der bis zur Höchstspannung definiert.

Bei der Zugprüfung werden Verformungs- und Festigkeitskennwerte von Werkstoffen ermittelt. Hierbei bilden vor allem die Bruchdehnung, Gleichmaßdehnung und die Brucheinschnürung, die Grundlage für die Beurteilung des Verhaltens von Werkstoffen.

Des Weiteren lässt sich aus dem Bruchbild ableiten, ob es sich um einen spröden oder zähen Werkstoff handelt. Ein Trennbruch ist das Ergebnis eines spröden, schlecht verformbaren Werkstoff. Hingegen lässt sich bei einer großen plastischen Verformung mit gleichzeitiger Querschnittsverminderung auf einen gut verformbaren, zähen Werkstoff schließen.

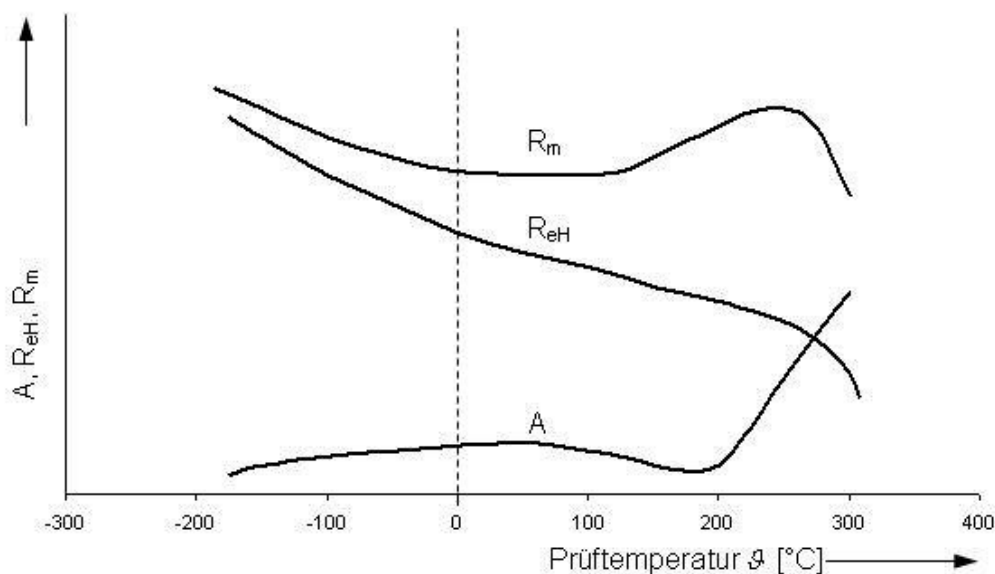


**Abbildung 110: Bruchbilder [2]**  
 links - zäher Werkstoff,  
 rechts - spröder Werkstoff

### Einflussgrößen auf die mechanischen Kennwerte

Mechanische Kennwerte sind werkstoffspezifische Kenndaten, die sich jedoch durch bestimmte Parameter beeinflussen lassen. Prüfgeschwindigkeit und Temperatur haben einen erheblichen Einfluss auf das Prüfergebnis. Aus diesem Grund gibt es detaillierte Anweisungen.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht den Einfluss der Prüftemperatur auf die Festigkeits- und Verformungskennwerte.



**Abbildung 111: Temperaturabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungskennwerte von weichem Baustahl**

Bei steigender Temperatur sinkt das Elastizitätsmodul des hier getesteten Baustahls, dies führt zu einer flacheren Anfangsneigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Ebenfalls nimmt die Festigkeit ab, hingegen steigt die Verformbarkeit des Werkstoffes. Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei Erhöhung der Prüftemperatur von weichem Baustahl die Gesamtbruchdehnung zunimmt.

### Kunststoff

Kunststoffe haben ein qualitativ ähnliches Spannungs-Dehnungs-Diagramm wie Metalle. Die Dehnungen sind jedoch erheblich größer und die Festigkeiten geringer.

Die verschiedenen Kunststofftypen zeigen außerdem ein sehr unterschiedliches Verhalten. Duroplaste zeigen fast keine plastische Deformation und brechen spröde. Thermoplaste besitzen nur sehr geringe Elastizität und sind dafür aber sehr stark plastisch verformbar. Der Bruch kann spröde oder nach dem Fließen als Verformungsbruch eintreten. Elastomere verhalten sich kautschukelastisch, d.h. sie lassen sich unter Umständen um mehrere 100% elastisch verformen. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve verläuft jedoch nicht linear.

Bei Kunststoffen ist zu beachten, dass die Prüfgeschwindigkeit und die Temperatur einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Aus einem spröden Kunststoff lässt sich durch Erhöhung der Temperatur oder Verringerung der Prüfgeschwindigkeit ein duktiler Werkstoff machen. Aus diesem Grund sind die in den Prüfvorschriften festgelegten Parameter sehr viel enger toleriert als bei Metallen.

Die Nomenklatur der Kennwerte ist anders als bei Metallen. Es wird nicht von Streckgrenze bzw. Dehngrenze sondern von Streck- bzw. Dehnspannung gesprochen. Dehnungen werden außerdem immer als Gesamtdehnung (plastische und elastischer Anteil) gemessen.

Kunststoffe und Metalle besitzen jeweils unterschiedliche Eigenschaften, welche durch ihren unterschiedlichen Aufbau erklärbar sind. Damit die jeweiligen Vorteile beider Werkstoffgruppen voll ausgeschöpft werden können, werden diese in Faser-verbundstoffen oder Sandwichstrukturen miteinander gemischt.

### Faserverbundwerkstoffe

Bei der Zugprüfung dieser Werkstoffe ist die häufigste Probenform eine nicht taillierter Prüfling mit Aufleimern an den einzuspannenden Seiten. An diesen Proben werden der E-Modul und die Zugfestigkeit bestimmt. Beim E-Modul wird aus der Anfangssteigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms der Sekantenmodul (Sekantenmodul ist Quotient aus Spannung und Dehnung) bei 10 und 50% der Bruchkraft ermittelt. Dies ist sehr problematisch und aus Gründen besserer Reproduzierbarkeit wäre es sinnvoller, als Sekantenpunkte festgelegte Dehnungswerte zu verwenden.

Bei der Zugbeanspruchung einer CFK-Probe in Faserrichtung werden zuerst die Fasern vollständig gestreckt, was dazu führt, dass zunächst keine Hook'sche Gerade entsteht. Dann wird der Verbund elastisch gedehnt. Nach Erreichen einer bestimmten Kraft lösen sich die Fasern von der Matrix und einzelne Fasern werden durchtrennt, der Verbund zerfällt in seine Einzelteile.

#### **5.4.2. Druckprüfung**

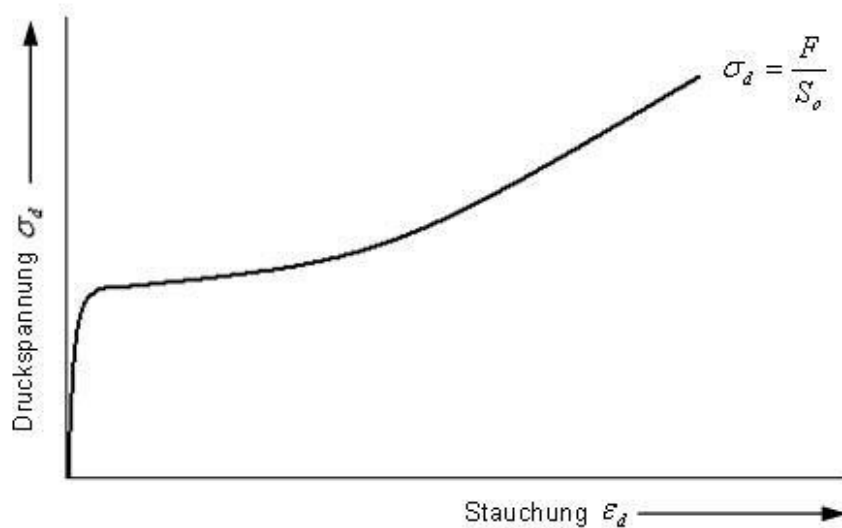
Von der Kraftwirkung gesehen entspricht der Druckversuch einem umgekehrten Zugversuch. Mit Hilfe von Druckplatten wird bei gleichbleibender Kraft und gleichmäßiger Geschwindigkeit gegen die Probe gedrückt. Die Druckspannung  $\sigma_d$  berechnet sich, wie die Nennspannung des Zugversuches, aus dem Quotienten der Kraft  $F$  und dem Ursprungsflächenquerschnitt  $S_0$ .

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Die Gesamtstauchung ist aus der Längenänderung  $\Delta L$  in Bezug auf die Ausgangslänge  $L_0$  der Probe zu ermitteln.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Aus der Abhängigkeit der Spannung und Stauchung ergibt sich das unten dargestellte  $\sigma_d - \varepsilon_d$  Diagramm.

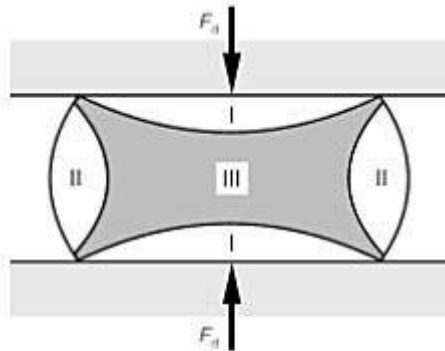


**Abbildung 112: Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm**

Es gilt zu beachten, dass bei gut verformbaren „Werkstoffen“ kein Bruch eintritt, deshalb wurde als Versagkriterium der erste Riss festgelegt.

Mit Hilfe des Druckversuches kann somit Druckfestigkeit  $\sigma_{db}$  und die Bruchstauchung  $\varepsilon_{db}$  eines Werkstoffes bestimmt werden. Was beim Zugversuch als Streckgrenze definiert ist, wird beim Druckversuch als Quetschgrenze  $\sigma_{dF}$  bzw. Druck-Fließgrenze bezeichnet.

Abbildung 113 zeigt schematisch die verschiedenen Verformungszonen, die beim Druckversuch auftreten.



**Abbildung 113: Verformungszonen einer gestauchten Probe[3]**

*I: geringe Verformung (Reibungsbehinderung)*  
*II: mäßige Zugverformung*  
*III: hohe Schubverformung*

Die Verformung an den Stirnflächen, d.h. im Bereich I, wird weitgehend durch Reibung behindert, hingegen kommt es in Zone II aufgrund hoher Zugbeanspruchung zu einer Ausbauchung des Werkstoffes. Die restliche Zone (III), welche auch als Schmiedekreuz bezeichnet wird, steht unter hoher Schubbeanspruchung.

Spröde Materialien sind nur sehr gering resistent gegen Schubbeanspruchung, daher bildet sich bei diesen keine Ausbauchung, sondern brechen.

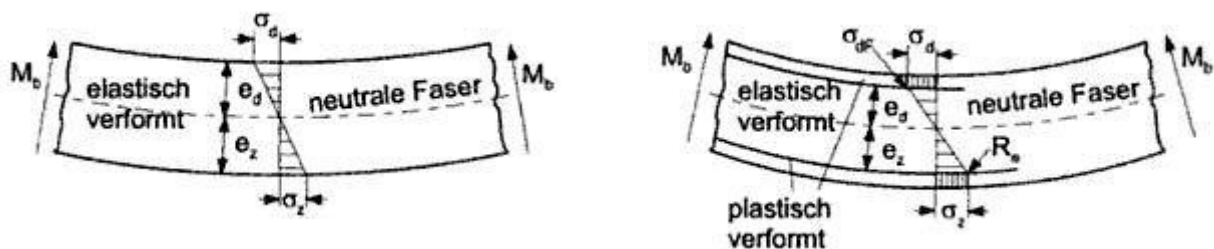
Druckversuche werden bei spröden Werkstoffen eingesetzt, um Auskunft bezüglich deren Bruchverhalten zu bekommen. Bei zähen Werkstoffen dient dieses Prüfverfahren zur Aufstellung von Fließkurven und liefert Informationen über deren Verformungsverhalten.

### 5.4.3. Biegeversuch und Torsion

Diese beiden Verfahren finden nur bei wenigen Fällen Anwendung. Grund dafür ist, dass das Biegeverhalten von homogenen, zähen Werkstoffen aus dem Zugversuch, bis zum Erreichen der Streckgrenze, ausreichend genau abzuschätzen ist.

Hingegen bei spröden Werkstoffen, z. B. Grauguss oder Hartmetall, wird der Biegeversuch durchgeführt, um die Biegebruchfestigkeit und die Durchbiegung bei Bruch ermitteln zu können.

Beim Biegeversuch wird der Prüfling, i. d. R. ein zylindrischer Stab, in Längsrichtung auf Biegung belastet, d.h. es entstehen Zug- und Druckspannungen im Inneren des Werkstoffes. Die Umkehrung der Spannungsrichtung erfolgt in der spannungsfreien neutralen Faser, welche bei symmetrischen Querschnitten in der Mitte liegt. Die Spannungen erreichen ihren Höchstwert in der Randfaser. Liegen diese Spannungswerte unterhalb der Streckgrenze, kommt es nur zu einer elastischen Verformung des Werkstückes. Bei Überschreitung der Streckgrenze bleibt eine plastische Verformung.



**Abbildung 114: links - elastische Biegeverformung, rechts - plastische Biegeverformung [4]**

$M_b$  = Biegemoment  
 $e_{d/z}$  = Abstand von neutraler Faser  
 $R_e$  = Streckgrenze  
 $\sigma_{d/z}$  = max. Spannungen am Rand  
 $\sigma_{dF}$  = Biegefließspannung

Wie bereits oben erwähnt, ist die Anwendung des Torsionsversuchs nicht sehr verbreitet, da spezielle Mess- und Versuchseinrichtungen nötig sind. Ebenso wie beim Biegeversuch, ist ein Korrelation der Kennwerten aus dem Zugversuchs möglich.

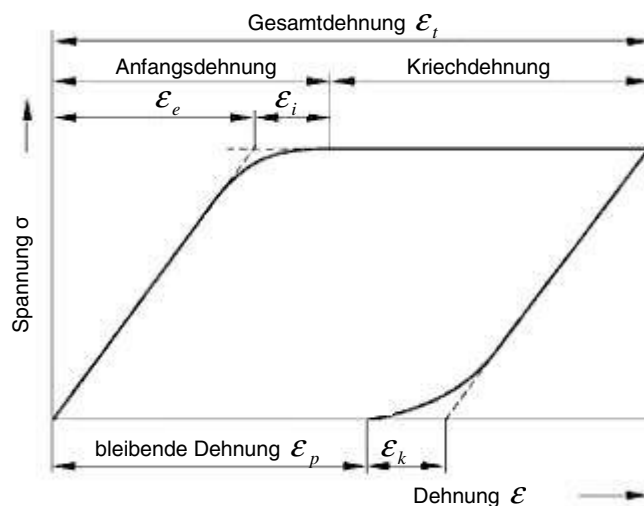
Bei Torsion wirken max. Schubspannungen in Querschnitten senkrecht und parallel zur Stabachse. Bei zähen Werkstoffen tritt der Bruch quer zur Stabachse auf, der Bruch bei ideal spröden Materialien hingegen, verläuft senkrecht zur größten Nennspannung.

#### 5.4.4. Zeitstand

Bei dieser Art der zerstörenden Prüfung wird der Werkstoff einer ruhenden Beanspruchung ausgesetzt, vor allem zur Prüfung der Warmfestigkeit von Materialien findet der Zeitstand Verwendung. Wesentliche Einflussgrößen sind Beanspruchungshöhe, -zeit und Temperatur. Üblicherweise wird der Zeitstandversuch mit Zugbeanspruchung durchgeführt.

Bei diesem Prüfverfahren ist zwischen zwei verschiedenen Arten zu unterscheiden. Zum einen die Messung bei konstanter Kraft und zum anderen die Messung bei konstanter Verformung. Um Auskunft über das Kriechverhalten eines Werkstoffes zu bekommen, findet die erste Möglichkeit ihre Verwendung, d.h. bei konstanter Kraft wird die Zunahme der Materialverformung gemessen. Beim Entspannungs- bzw. Relaxationsversuch hingegen wird bei konstanter Verformung die Abnahme der Kraft gemessen. Diese beiden Werkstoffkennwerte, Kriechverhalten und Relaxation, sind temperaturabhängige Vorgänge, daher ist es wichtig, immer die Prüftemperatur zu vermerken.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die wichtigsten Kennwerte dieses zerstörenden Prüfverfahren.



**Abbildung 115: Spannungs- Dehnungsdiagramm des Zeitstandversuches [5]**

elastische Dehnung =	$\varepsilon_e$
plastische Anfangsdehnung =	$\varepsilon_i$
plastische Dehnung =	$\varepsilon_p$
nicht proportionale Rückdehnung =	$\varepsilon_k$

---

Quellenangaben:

H. Czichos, M. Hennecke: Das Ingenieurwissen, Springer Verlag, 32. Auflage, 2004

Bargel, Schulz: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

M. Riehle, E. Simmchen: Grundlagen der Werkstofftechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 2000

K.-H. Grote, J. Feldhusen: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 22. Auflage, 2007

B. Heine: Werkstoffprüfung, Carl Hanser Verlag, 2003

[1] B. Heine: Werkstoffprüfung, Carl Hanser Verlag, 2003

[2], [3], [5] Bargel, Schulz: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

[4] M. Riehle, E. Simmchen: Grundlagen der Werkstofftechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 2000

## **5.5. Härteprüfung**

Härte ist der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen härteren Körpers entgegensetzt.

Die Härte wird gemessen, indem ein Körper mit einer definierten Kraft in das Prüfstück eingedrückt und die Größe des entstehenden Eindrucks vermessen wird. Die Härte ist dann das Verhältnis von Prüfkraft zu Eindruckgröße. Da der entstehende Eindruck sowohl vom Eindringkörper als auch von der verwendeten Prüfkraft abhängt, ist für jeden Härtewert das verwendete Prüfverfahren mit anzugeben. Die Härte eines Werkstoffs ist keine eindeutige Werkstoffeigenschaft und hat auch nicht die Bedeutung einer Werkstoffkennzahl. Trotzdem findet die Härteprüfung breite Anwendung. Sie ist ein einfaches kostengünstiges Prüfverfahren im Rahmen der Wareneingangskontrolle, Wärmebehandlungskontrollen usw.

Bei der Härteprüfung wird zwischen zwei Verfahren unterschieden. Zum einen kann die Härte über die Eindringtiefe des Prüfkörpers ermittelt werden und zum anderen über die Eindruckoberfläche.

Außerdem ist der Abstand der Eindrücke voneinander und vom Rand ausreichend groß zu wählen. Auch die Dicke des Prüfkörpers ist so groß zu wählen, dass keine Rückwirkung durch die Auflage entsteht.

### **5.5.1. Härteprüfung nach Brinell**

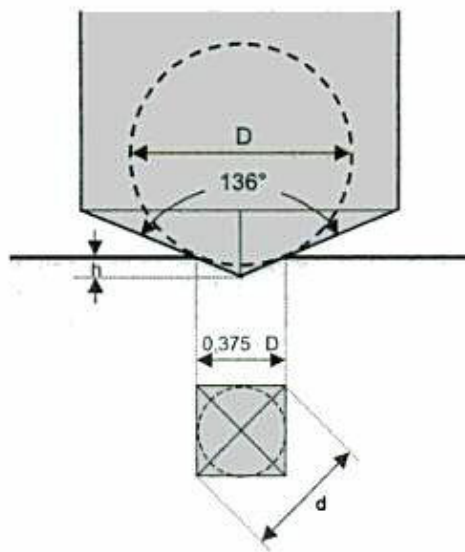
Die Härteprüfung nach Brinell kann für alle metallsichen Werkstoffe mit einer Härte unter 450HB eingesetzt werden.

Bei der Härteprüfung nach Brinell wird eine Hartmetallkugel des Durchmessers  $D$  mit einer senkrecht zur Oberfläche des Prüfstücks wirkenden Kraft  $F$  in die Oberfläche eingedrückt. Nach einer bestimmten Belastungszeit wird das Prüfstück entlastet und der Durchmesser des Eindrucks auf zwei zueinander senkrecht stehenden Längen gemessen. Die Angabe der Härte erfolgt als dimensionslose Zahl, der das Härteprüfverfahren angehängt wird.

Beispiel: 280 HB 2,5/62,5

Geprüft wurde nach dem Brinell-Verfahren. Die Härte beträgt 280 und wurde mit einer Kugel von 2,5mm Durchmesser und einer Prüfkraft  $62,5 \cdot 9,807\text{N}$  ermittelt.

### 5.5.2. Härteprüfung nach Vickers



**Abbildung116: Korrelation zwischen den Prüfkörper nach Vickers und Brinell [1]**

Die Härteprüfung nach Vickers kann zur Prüfung aller metallischen Werkstoffe eingesetzt werden. Sie ist besonders für sehr harte Stoffe, Schichten oder für sehr dünne Werkstoffe oder empfindliche Prüfstücke geeignet, da die Eindringtiefe- und -größe gering ist.

Bei der Härteprüfung nach Vickers wird eine Diamantpyramide mit einem Spitzenwinkel von  $136^\circ$  mit einer senkrecht zur Oberfläche des Prüfstücks wirkenden Kraft  $F$  eingedrückt. Nach Entlastung werden die beiden Eindruckdiagonalen vermessen.

Der Winkel von  $136^\circ$  wurde gewählt, da der Tangentenkegel eines im optimalen Arbeitsbereich

liegenden Brinelleindrucks den gleichen Winkel einschließt, somit sind Vickers- und Brinellhärten im Bereich bis 350HV bzw. 350HB vergleichbar sind.

Die Angabe der Härte erfolgt ebenfalls als dimensionslose Zahl, der das Härteprüfverfahren angehängt wird.

Beispiel: 400HV 30

Die Härte beträgt 400 und wurde mit einer Prüfkraft  $30 \cdot 9,807\text{N}$  mit Hilfe des Vickers-Verfahrens ermittelt.

### 5.5.3. Härteprüfung nach Rockwell

Die Härteprüfung nach Rockwell ist ein schnelles Verfahren zur Bestimmung der Härte. Es kann für metallische Werkstoffe in bestimmten Härtebereichen eingesetzt werden, wobei die prüfbaren Bereiche vom Verfahren abhängig sind.

Bei der Rockwellhärteprüfung gibt es sehr zahlreiche Prüfverfahren, die sich durch den Eindringkörper und die Prüfkraft unterscheiden. Die beiden wichtigsten sind die Verfahren nach Rockwell B und C.

Bei der Rockwellhärteprüfung wird im Gegensatz zu den anderen Verfahren nicht die Eindruckoberfläche, sondern die Eindringtiefe als Maß für die Härte verwendet, wobei die Eindringtiefe als Differenz zwischen der Eindringtiefe unter einer Prüfvorlast und der Eindringtiefe nach der Einwirkung der Hauptlast gemessen wird. Eine bleibende Eindringtiefe von 0,002mm ist als eine Rockwelleinheit festgelegt. Um nun mit steigender Härte auch steigende Härtewerte zu bekommen, wird die Eindringtiefe von einer willkürlich festgelegten Zahl abgezogen, die für die verschiedenen Rockwellprüfverfahren jeweils einen bestimmten Wert hat. Das Verfahren lässt sich sehr gut automatisieren.

Beim dem Verfahren nach Rockwell C ist der Eindringkörper ein Diamantkegel mit einem Öffnungswinkel von  $120^\circ$ , dessen Spitze mit einem Radius von 0,2mm abgerundet ist. Die Prüfvorlast beträgt 98,07N und die Hauptlast 1373N. Es können Härten zwischen 20 und 70HRC gemessen werden.

Bei dem Verfahren nach Rockwell B wird eine Stahlkugel mit 1/16" Durchmesser als Eindringkörper verwendet. Die Prüfvorlast beträgt 98,07N und die Hauptlast 883N. Es lassen sich Härten von 35 bis 100HRB messen.

#### **5.5.4. Härteprüfung nach Shore**

Die Härteprüfung nach Shore findet für Kunststoffe, hauptsächlich für Elastomere Anwendung. Eine Metallkugel wird von einer Feder bis zu einer bestimmten Tiefe in den Kunststoff eingedrückt, wobei der Federweg durch einen Zeiger auf einer Skala sichtbar gemacht wird. Die Prüfkraft beträgt 12,5N bei Shore A und 50N bei Shore D. Die Härte entspricht einem bestimmten Federweg, wobei diese Zuordnung willkürlich gewählt wurde und keiner physikalischen Dimension zugeordnet werden kann. Die Härte wird beispielsweise mit 75 Shore A angegeben.

Die Verfahren mit Eindringtiefenmessung erfordern nur kurze Messzeiten und sind daher kostengünstig. Sie können als transportable Messeinrichtungen vorliegen. Die Härtewerte können direkt abgelesen werden.

Bei den Verfahren, bei denen die Eindruckoberfläche vermessen wird, ist keine Automatisierung möglich und daher ist der Zeitaufwand für diese Prüfungen relativ hoch.

Für viele Stähle ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Härte und der Zugfestigkeit. Das Verfahren nach Vickers hat gegenüber Brinell den Vorteil, dass auch große Härten prüfbar sind. Während das Verfahren nach Brinell große Eindrücke liefert und damit große Bereiche bei der Härtemessung erfasst.

---

#### Quellenangaben:

Bargel, Schulz: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

M. Riehle, E. Simmchen: Grundlagen der Werkstofftechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 2000

K.-H. Grote, J. Feldhusen: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 22. Auflage, 2007

B. Heine: Werkstoffprüfung, Carl Hanser Verlag, 2003

[http://www.karg-industrietechnik.de/produkte/mechanische-pruefgeraete/Grundlagen\\_Haertepruefung\\_dt\\_EV.pdf](http://www.karg-industrietechnik.de/produkte/mechanische-pruefgeraete/Grundlagen_Haertepruefung_dt_EV.pdf)

[1] B. Heine: Werkstoffprüfung, Carl Hanser Verlag, 2003

## **5.6. Dynamische Prüfung**

Versuche mit wechselnder Beanspruchung wurden bereits im 19. Jahrhundert von August Wöhler zur Ermittlung von mechanischen Werkstoffeigenschaften durchgeführt.

Bei häufiger Wiederholung einer Belastung kann nicht die, durch den statischen Versuch ermittelte, Belastungsgrenze für die Konstruktionsberechnung zugrunde gelegt werden. Bereits schwingende Belastungen im elastischen Bereich können nach einer gewissen Lastwechselzahl ohne vorherige plastische Verformung zum Bruch führen. Dieses Phänomen der Rissbildung und des anschließenden Risswachstums unter schwingender Beanspruchung wird als Werkstoffermüdung bezeichnet.

Als Ursache für die Entstehung von Schwingbrüchen können hauptsächlich folgende Erscheinungen genannt werden.

*Werkstoffbedingte Ursachen:*

- Oberflächenverletzungen, z.B. Bearbeitungsriefen, Kratzer
- Fehlstellen des Werkstoffes, z.B. Schlackeneinschluss, Lunker
- Wärmebehandlungsfehler, z.B. Härterisse

*Formbedingte Ursachen:*

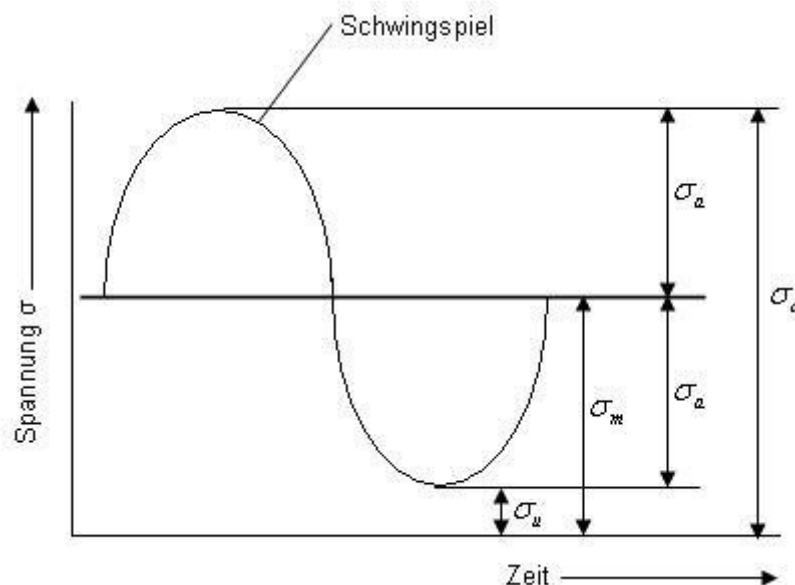
- Kerbwirkungen durch Bohrungen, Gewinde, Keilnuten

Bei schwingender Beanspruchung im elastischen Bereich, ist die Versagenslastspielzahl im wesentlichen von der Größe der Spannungsamplitude und der Mittelspannung abhängig. Für eine Lebensdauerabschätzung müssen also Gesetzmäßigkeiten aus dem Werkstoffverhalten in Abhängigkeit von diesen Belastungsgrößen abgeleitet werden. Die dafür erforderliche Datenbasis wird mittels normierter Prüfprozesse generiert. Für die Anwendung der Daten in Auslegung und Konstruktion, wird der Zusammenhang zwischen Belastungshöhe und Lebensdauer durch Kennlinien in sogenannten Wöhlerdiagrammen grafisch aufgetragen. In Abhängigkeit vom realen Hintergrund des betrachteten Ermüdungsphänomens, werden diese Versuche entweder spannungs- oder dehnungsgeregelt durchgeführt.

Nachfolgenden wird am Beispiel von spannungsgeregelten Versuchen gezeigt, wie die Ergebnisse von Schwingfestigkeitsprüfung in die Erstellung von Wöhlerkurven eingehen. Im Vordergrund soll dabei die Erfüllung der Prüfaufgabe, d.h. die exakte Durchführung, Auswertung und Ergebnisbewertung der Schwingfestigkeitsversuche stehen.

### 5.6.1. Dauerschwingfestigkeit

Der Belastungszyklus einer schwingenden Werkstoffbelastung wird typischerweise durch die Mittelspannung  $\sigma_m$ , die Spannungsamplitude  $\sigma_a$  und die Schwingfrequenz  $f$  charakterisiert. Die, für den Laborversuch idealisierte, oft sinusförmige Kurve findet ihre Wendepunkte jeweils am Spannungsmaximum  $\sigma_o$ , und am Spannungsminimum  $\sigma_u$ . Bei einer vollen Schwingung mit Periodendauer  $T$  wird von einem Schwingspiel gesprochen, deren Anzahl die Schwingspielzahl  $N$  ist. Die Schwingfrequenz  $f$  ist der Kehrwert der Periodendauer.



**Abbildung 117: sinusförmiger Spannungsverlauf eines Belastungszyklus**

Je nach Lage der Spannungsumkehrpunkte ist bei der Schwingbelastung nach verschiedene Beanspruchungsbereiche zu unterscheiden.

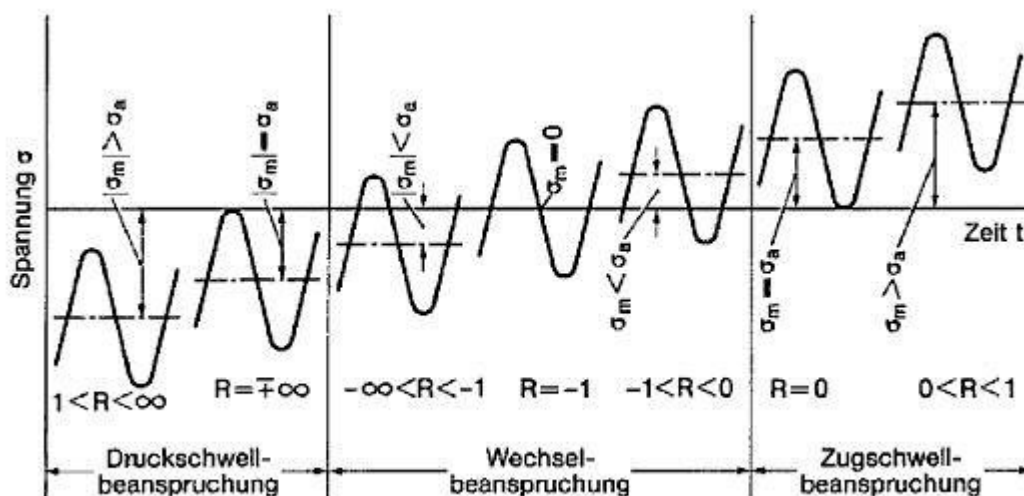
- *Druckschwellbereich*, wenn das Spannungsmaximum  $\leq 0$  MPa beträgt
- *Zugschwellbereich*, wenn das Spannungsminimum  $\geq 0$  MPa beträgt
- *Zug- Druck-Wechselbereich*, bei Maximalspannung  $> 0$  MPa (im Zugbereich) und Minimalspannung  $< 0$  MPa (im Druckbereich)

Zugspannungen werden als positive und Druckspannungen als negative Spannungswerte definiert.

Das Spannungsverhältnis  $R_\sigma$  ist aus dem Quotienten vom  $\sigma_u$  und  $\sigma_o$  definiert.

$$R_\sigma = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

Dabei gilt  $-\infty < R < +1$

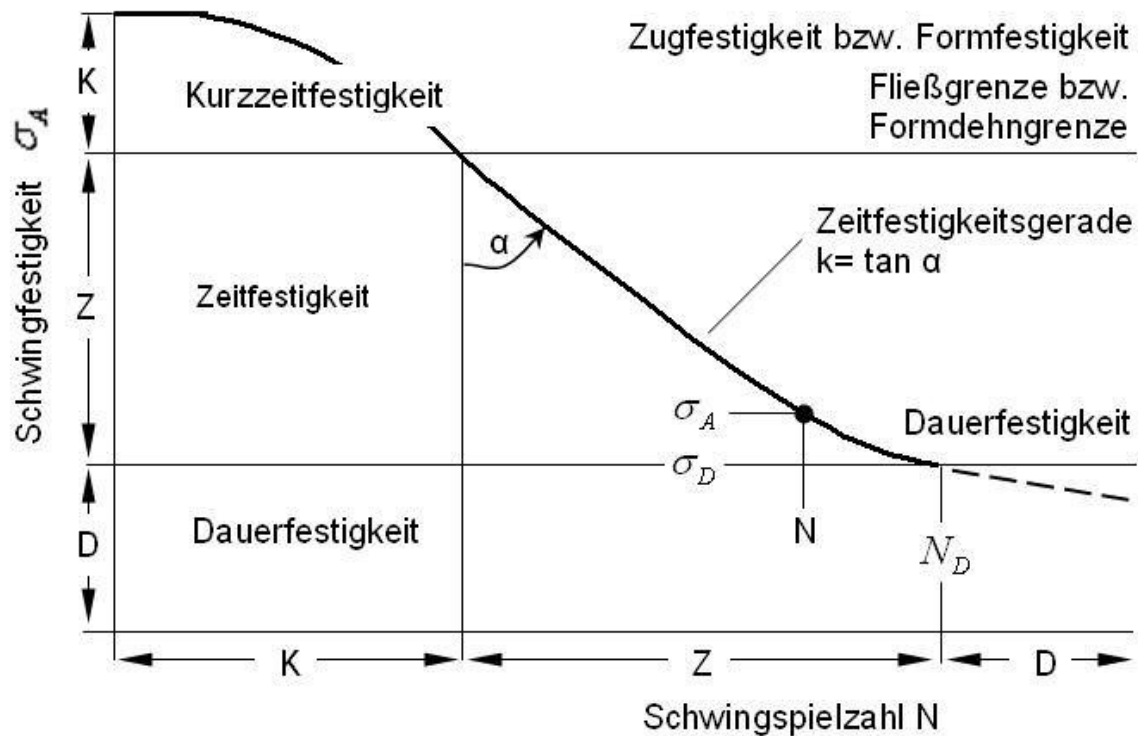


**Abbildung 118: Beanspruchungsbereiche im Schwingungsversuch [1]**

Beim Schwingungsversuch wird zwischen Einstufen-, Mehrstufen- und Betriebsfestigkeitsversuchen unterschieden. Im Einstufentest ist die Zyklusform konstant, im Mehrstufenversuch ändert sie sich nach einer vorgegebenen Stufenfolge. Im Betriebsfestigkeitsversuch folgen Amplitude, Mittelwert und Frequenz einem betriebsähnlichen Verlauf, der zwischen regelhaft und regellos liegen kann. Die Versuche zur Betriebsfestigkeit werden näher im Kapitel 5.6.2 beschrieben.

### Das Wöhler-Diagramm

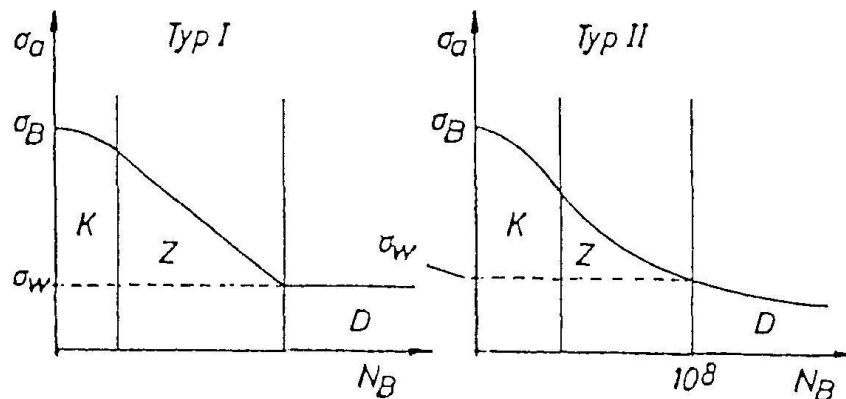
Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfung einer Versuchsreihe liefern die Basis für das sogenannte Wöhler-Diagramm (Abbildung 119).



**Abbildung 119: Wöhler-Diagramm**

In einem x-y-Diagramm mit der Versagenslastspielzahl  $N$  als Abszisse und der Spannungsamplitude  $\sigma_a$  als Ordinate werden die Versuchsergebnisse aufgetragen. Mittels eines geeigneten statistischen Verfahrens wird aus den Einzelwerten eine Kurve konstruiert. In doppelt-logarithmischer Auftragung verläuft die Kennlinie im Kurzzeitfestigkeits- und Zeitfestigkeitsbereich überwiegend linear. In Abhängigkeit von der Ermüdungscharakteristik des untersuchten Werkstoffs kann ein mehr oder weniger ausgeprägtes Abflachen der Kurve im Übergang zum Dauerfestigkeitsbereich beobachtet werden.

Bei den Wöhlerkurven ist zwischen den Typen I und II zu unterscheiden.



**Abbildung 120: Wöhlerkurven vom Typ I und II**

- Das **Kurzzeitfestigkeitsgebiet** ist charakterisiert durch plastische Verformungsanteile im Belastungszyklus und wird abgedeckt durch „Low Cycle Fatigue“ (LCF-Versuche) Diese werden überwiegend dehnungsgeregelt und mit dreieckförmigen Belastungszyklen durchgeführt. Die wichtigsten Kennwerte des dehnungsgeregelten LCF-Versuchs sind die Dehnungsextrema, die Dehngeschwindigkeit (z.B. 0,3%/Sek) und die Prüftemperatur. Für die grafische Aufbereitung der ermittelten Lebensdauerwerte eignet sich die doppellogarithmische Auftragung in einer Dehnungswöhlerkurve.
- Im **Zeitfestigkeitsgebiet** bewegt sich die Versagenslastspielzahl in einem Bereich von ca.  $10^4$  bis ca.  $10^6 \dots 10^7$  Zyklen. Das geeignete Prüfverfahren ist der spannungsgeregelte „High Cycle Fatigue“ (HCF-Versuch). Das Lastniveau von typischen HCF-Versuchen bewegt sich deutlich unterhalb der Streckgrenze, so dass keine messbaren plastischen Verformungsanteile auftreten. Die wichtigsten Kennwerte des HCF-Versuchs sind die Spannungsextrema und die Prüftemperatur, sowie die Prüffrequenz (z.B. 100Hz).
- **Dauerfestigkeitsgebiet** umfasst den Belastungsbereich in der Nähe der Dauerfestigkeit

Generell wird für Werkstoffen, die der Typ II Kurve entsprechen, eine gewisse Grenzlastspielzahl (z.B.  $10^7$ ) festgelegt, eine solche Probe wird als Durchläufer bezeichnet.

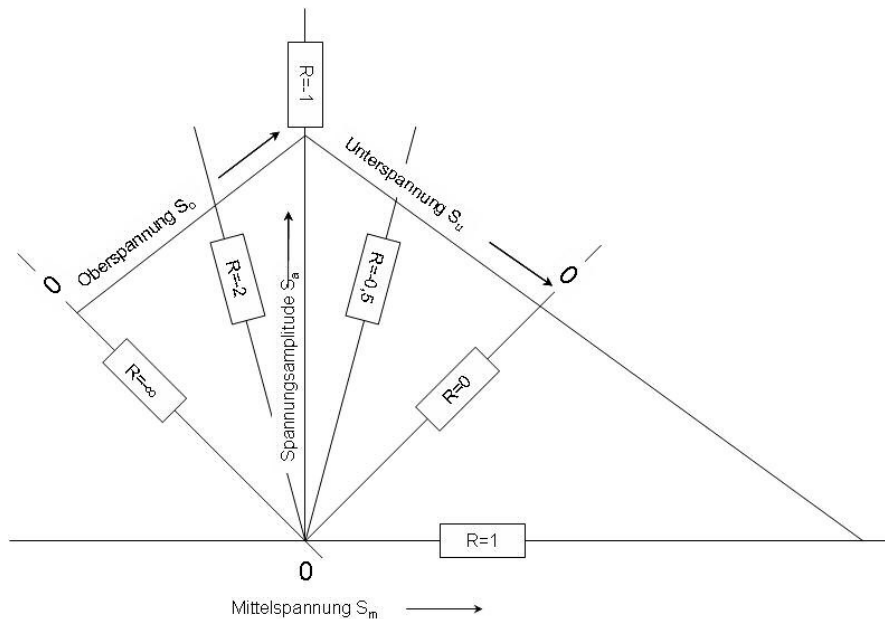
Bei den meisten Stählen tritt, theoretisch auch bei beliebig großen Lastspielzahlen, unterhalb einer bestimmten Spannungsamplitude kein Bruch mehr auf. Diese Werkstoffe sind für die Wöhlerkurve vom Typ I kennzeichnend.

### Das Haigh-Diagramm

Das Wöhler-Diagramm charakterisiert das Verhalten eines Werkstoffes bei schwingender Beanspruchung nur in einem ganz bestimmten Bereich der Schwingbeanspruchung, d.h. bei einem ganz bestimmten Spannungsverhältnis  $R_\sigma$ .

Soll das Ermüdungsverhalten des Werkstoffes umfassender d.h. bei unterschiedlichen R-Verhältnissen untersucht werden, so sind mehrere Wöhler-Diagramme mit verschiedenen R-Verhältnissen zu erstellen. Diese Vielzahl an unterschiedlichen Wöhlerlinien werden in ein Dauerfestigkeitsschaubild übertragen, um somit eine genaue bzw. aussagekräftige Darstellung der Dauerfestigkeitswerte zu erhalten. Beispielsweise werden die von R abhängigen Spannungsamplituden bei Dauerfestigkeit in einem sogenannten Haigh-Diagramm zusammengefasst.

In diesem Diagramm wird die Spannungsamplitude über der Mittelspannung aufgetragen. Des weiteren finden sich Geraden für die unterschiedliche R Werte. Das Diagramm wird nach rechts durch die Streckgrenze ( $R = 1$ , dh. rein statische Last) begrenzt und geht über  $R = 0$  (rein schwellende Last), die y-Achse mit  $R = -1$  (wechselnde Belastung) bis hin zu  $R = \infty$  für druckschwellige Beanspruchung. Es ergibt sich zu jeder vorhandenen Mittelspannungs- und Amplitudenkombination ein Punkt im Diagramm. Liegt dieser innerhalb der Begrenzungslinie so ist diese Kombination dauerfest, andernfalls nicht.



**Abbildung 121: Haigh-Diagramm**

### 5.6.2. Betriebsfestigkeitsprüfung

Hintergrund der bisher beschriebenen Schwingfestigkeitsprüfung sind Versuche mit konstanten sinus- (HCF) oder dreieckförmigen Belastungszyklen (LCF). In bestimmten realen Belastungsfällen folgen die schädigungsrelevanten Lasten jedoch einem eher regellosen Verlauf. Bei Flugzeugen sind z.B. die durch Böen auftretenden hohen Beanspruchungswerte eine Zufallsvariable. Der einfache Einstufenversuch kann daher keine eindeutige Aussage über die Lebensdauer beanspruchter Teile unter derartigen Betriebsbedingungen liefern. Vor diesem Hintergrund werden Versuche mit scheinbar zufällig auftretenden statischen, quasistatischen und dynamischen Belastungen mit dem Ziel durchgeführt, im Versuch eine Gleichwertigkeit zur realen Schädigung zu erzielen. Als Beispiele sind hierzu die Prüfstände für große Flugzeugstrukturen bei der IABG in Dresden und die multiaxialen Fahrzeugprüfstände bei den Automobilherstellern.

Die Betriebsfestigkeitsprüfung erfordert das folgende Vorgehen:

1. Ermittlung der Größe, Häufigkeit, Reihenfolge und Frequenz der Belastungen, die auf die zu untersuchenden Komponenten oder Baugruppen im Laufe ihrer Mindestlebensdauer einwirken
2. Ermittlung der tatsächlichen Lebensdauer an Prüflingen durch Aufbringen der unter 1. ermittelten Belastungsablaufes im Betriebsfestigkeitsversuch

### Blockprogrammversuch

Der erste Schritt zur Durchführung von Mehrstufenversuchen waren die seit etwa 1939 durchgeführten Blockprogrammversuche. Die Blockprogramme erhalten meist viele hintereinander geschaltete Schwingungsblöcke mit einem geringen Spannungsausschlag und wenige mit hohen Spannungswerten. Mit Blockprogrammversuchen kann allerdings die völlig regellose Betriebsbeanspruchung noch nicht nachgeahmt werden. Insbesondere ist die zeitliche Reihenfolge der hohen und niedrigen Belastungen anders als in der Praxis. Für viele Anwendungsfälle lässt sich aber mit solchen einfachen Blockprogrammversuchen das eigentliche Betriebslastenspektrum hinreichend genau nachbilden.

### Betriebslastenversuche

Wie bereits oben beschrieben, sind Blockprogrammversuche nur bedingt für die Simulation der tatsächlichen Betriebsbelastung geeignet. Dies ist auch ein Grund, dass in der Luftfahrt, bei welcher die Forderungen an die Leichtbauweise und Werkstoffausnutzung besonders hoch sind, zunehmend Betriebslastenversuche durchgeführt werden.

Um die tatsächlichen Schwingungen eines Betriebes nachahmen zu können, werden die im Betrieb wirkenden Kräfte mit Hilfe von aufgeklebten Dehnungsmessstreifen gemessen und als elektrische Spannungen über einen Messverstärker registriert. Die Last-Zeit-Funktionen können dann mit verschiedenen mathematischen Methoden ausgewertet werden. Es werden die auftretenden Lasten nach Größe und Häufigkeit notiert, so dass sich daraus die Häufigkeitsverteilungskurven, die sogenannten Kollektive bilden lassen.

Das Belastungskollektiv wird von einem Rechner in die Prüfmaschine eingesteuert, bis der Schwingfestigkeitsbruch eintritt und damit die zu ermittelnde Lebensdauer abgeschätzt werden kann.

---

Quellenangaben:

Bargel, Schulz: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

M. Riehle, E. Simmchen: Grundlagen der Werkstofftechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 2000

K.-H. Grote, J. Feldhusen: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 22. Auflage, 2007

B. Heine: Werkstoffprüfung, Carl Hanser Verlag, 2003

D. Radaj, M. Vormwald: Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure, Springer Verlag, 3. Auflage, 2007

Grundlagen Maschinenelemente - Festigkeitsnachweis mit FKM-Freund.doc

E. Haibach: Betriebsfestigkeit, Springer Verlag, 2. Auflage, 2002

[1] D. Radaj, M. Vormwald: Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure, Springer Verlag, 3. Auflage, 2007

## **5.7. Bruchmechanik**

Die statischen Festigkeits- und die Schwingfestigkeitsversuche liefern eine Aussage über das Werkstoffverhalten, wenn die bei Versuchsbeginn vorhandenen Oberflächen- und Volumenfehler die jeweils spezifizierte maximal zulässige Größe nicht überschreiten. Das Werkstoffverhalten kann sich jedoch gravierend verändern, wenn Schädigungen von bruchmechanisch relevanter Größe vorhanden sind. Duktile Werkstoffe, zeigen Kerben gegenüber ein eher gutmütiges Verhalten, während spröde Werkstoffe, wie beispielsweise Titan, tendenziell kerbenempfindlich reagieren.

Die Bruchmechanik untersucht das Werkstoffverhalten im angerissenen Zustand, d.h. die Fähigkeit des Werkstoffes, dem Riss einen Widerstand entgegen zu setzen. Diese Untersuchungsergebnisse ermöglichen erst die „damage-tolerant“-Auslegung von Bauteilen, um Fehler zu zulassen, aber auch sicherzustellen, dass diese nicht kritisch werden. Bereits im Neuzustand können, bedingt durch das Gieß-, Schmiede- oder Fertigungsverfahren, folgende Fehler vorhanden sein:

- Lunker
- Poren
- Risse
- Kratzer
- Konstruktive Kerben (Bohrungen, Radien)

Bruchmechanische Untersuchungen werden durchgeführt im Rahmen der Qualitätssicherung, für Werkstoffvergleiche, zur Untersuchung des Fertigungs- und Umgebungseinflusses, für den Schadenstoleranznachweis, zur Ermittlung von Dimensionierungskennwerten und zur Festlegung von Inspektionsintervallen. Eine Korrelation zwischen bruchmechanischen und anderen mechanischen Kennwerten wie z.B. die Zugfestigkeit ist nicht möglich.

Bei der Bruchmechanik werden drei Hauptfragestellungen unterschieden:

- Wie groß ist die statische Tragfähigkeit eines Bauteils im angerissenen Zustand? Kennwertermittlung über den Risszähigkeitsversuch
- Wie breitet sich ein Riss bei angelegter Schwingbeanspruchung aus? Kennwertermittlung über den Rissfortschrittversuch
- Welches ist die untere Grenze der Beanspruchung, bei der ein Riss in einem gegebenen Medium nicht mehr weiter wächst? Kennwertermittlung über den Schwellwertversuch bzw. "K-decreasing test"

Um bruchmechanische Untersuchungen durchführen zu können, ist es zunächst erforderlich, künstliche Risse in die Proben einzubringen. Hierbei werden drei Arten von Rissen unterschieden:

- Mittige Durchrisse, z.B. Bohrungen mit Anrissen
- Seitliche Durchrisse, z.B. Anrisse an Radien
- Oberflächenrisse, z.B. Kratzer auf der Oberfläche

Die künstlichen Risse können durch Funkenerosion oder durch Sägeschnitte erzeugt werden. Um wirklich repräsentative künstliche Risse mit kleinsten Radien an den Risspitzen zu erhalten, werden die mechanisch erzeugten Risse durch eine Schwingbeanspruchung geschärft. Dieses Schärfen der Kerben ist sehr wichtig, da viele Untersuchungen gezeigt haben, dass die bruchmechanischen Kennwerte vom Kerbgrundradius abhängig sind.

### **5.7.1. Risslängenmessmethode**

Die Spannungsintensität an der Risspitze wird wesentlich von der Risstiefe in Verbindung mit der Probengeometrie und der angelegten Belastung bestimmt. Für eine Interpretation der Versuchsergebnisse, ist es daher erforderlich, die Risstiefe zu messen. Dies ist mit den drei nachfolgenden Verfahren möglich.

### Compliance Methode

Compliance heißt Nachgiebigkeit. Die Risslängenmessung basiert auf der, mit der Risslänge sich verändernden Nachgiebigkeit der Probe. Ein Rissaufweitungsaufnehmer wird möglichst in der Mittelachse des Laststrangs so an die Probe angebracht, dass die Rissaufweitung gemessen werden kann. Aus der gemessenen Rissöffnung wird entweder durch eine vorher aufgenommene Kalibrierungskurve oder durch teilweise standardisierte Algorithmen die Risslänge bestimmt. Die Methode ermöglicht Risslängenmessungen mit einer Genauigkeit von 0,1mm für Rissverlängerungen unter 10mm und 0,5mm für Rissverlängerungen über 10mm.

### Optische Methode

Risslängenmessungen mit einem Mikroskop oder einer Videoanlage sind ebenfalls möglich. Hier sind Genauigkeiten von 0,01 bis 0,1mm, je nach Anlage, erreichbar. Diese Methode lässt sich nur bei freiem Zugang zum Riss realisieren. Für die meisten Versuche bei erhöhter Temperatur (im Ofen) ist dieses Verfahren nicht anwendbar.

### Potentialmethode

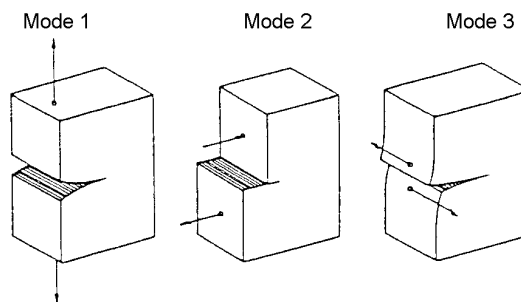
Die Potentialmethode wird unterschieden in die direkte und indirekte Potentialmethode. Bei der direkten Potentialmethode wird die Probe mit einem konstanten Strom durchflossen und die Potentialänderung in Abhängigkeit von der Rissverlängerung gemessen. Über einen Algorithmus wird die Potentialänderung in die Rissverlängerung umgerechnet.

Bei der indirekten Potentialmethode fließt Strom durch eine Metallfolie, welche auf der Probe appliziert ist. Über die Potentialänderung wird wiederum die Risslänge bestimmt. Risse mit großer plastischer Zone sind nicht messbar, da die plastische Zone zu einem Riss in der Messfolie und damit zu verfälschten Messergebnissen führt.

Bei dieser Methode werden Genauigkeiten von 0,1mm erreicht.

### 5.7.2. Risszähigkeitsversuch

Der Risszähigkeitsversuch dient zur Ermittlung des kritischen Spannungsintensitätsfaktors  $K_{IC}$ , bei der ein bereits vorhandener feiner Anriss in einer normierten Probe unter zunehmender Last zum plötzlichen Versagen der Probenstruktur (Bruch) führt.



**Abbildung 122: Proben zur Rissfestigkeitsbestimmung**

- Mode I: eine Zugspannung führt zum symmetrischen Abheben der Rissufer
- Mode II: ebener Schub bewirkt ein Abgleiten der Rissoberflächen in der Rissebene
- Mode III: **ebener** Schub führt zu einer Verschiebung der Rissoberflächen quer zur Rissrichtung

Im  $K_{IC}$  Versuch verläuft die Belastungsrichtung senkrecht zur Rissebene (Mode I aus Abbildung 122). In der Praxis hat daher die Rissöffnungsart I die größte Bedeutung und wird im Folgenden ausschließlich betrachtet.

Der Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  charakterisiert das ideal-elastische Spannungsfeld im Bereich einer feinen Rissspitze. Das plastische Werkstoffverhalten wird bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Daher ist eine hinreichend kleine plastische Verformungszone vor der Rissspitze die Voraussetzung für die Ermittlung des Werkstoffkennwertes  $K_{IC}$  aus einem Risszähigkeitsversuch. Der Prüfstandard definiert die Proportionen normierter Proben und enthält Formeln zur Berechnung von  $K_I$  aus der Kraft  $P$  mittels einer Geometriefunktion  $Y$ . Sie ist für standardisierte Proben bekannt.

Für die Übertragung der Ergebnisse auf ein Bauteil, muss  $K_I$  unter Berücksichtigung der konkreten Bauteil- und Rissgeometrie sowie der Belastungssituation, meist mittels einer mechanischen FE-Analyse, berechnet werden.

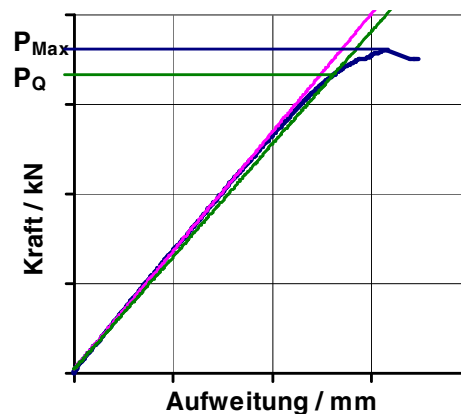
Die kritische Größe der Spannungsintensität ist die Risszähigkeit  $K_{IC}$ . Sie ist als Widerstand gegen abruptes Risswachstum zu verstehen.

Begriffserklärung  $K_{IC}$ :

- (C) kritischer
- (K) Spannungsintensitätsfaktor
- (I) Modus I Rissöffnungsart

Risszähigkeitsuntersuchungen können u. a. an Blechen oder Platten durchgeführt werden.  $K_{IC}$ -Werte lassen sich dann bestimmen, wenn das plastisch verformte Werkstoffvolumen hinreichend klein gegenüber den Probenabmessungen ist und die Probe mit einer instabilen (plötzlichen) Rissausbreitung versagt. Im Prüfstandard ist definiert, wie auf Basis von Probengeometrie und Messdaten die Gültigkeit des  $K_{IC}$  Wertes festgestellt wird. Da auch die vorher unbekannten Versuchsergebnisse in die Gültigkeitskriterien eingehen, kann die Wiederholung eines Versuchs mit alternativer Probengeometrie erforderlich werden.

Die Aufzeichnung des Kräfteverlaufs über der Rissöffnung einer angerissenen Probe liefert beispielsweise folgende Kurve.



**Abbildung 123: Kraft-Aufweitungsdiagramm eines Risszähigkeitsversuchs**

Am Anfang verlaufen Kraft und Rissöffnung proportional. Hier wird der Riss nur geöffnet, es tritt keine Verlängerung ein. Nach Erreichen der charakteristischen Kraft  $P_Q$  weicht die Kurve von der Geraden ab. Bis zum Erreichen von  $P_{max}$  findet eine Phase der plastischen Aufweitung oder eines stabilen Risswachstums statt. Der Prüfstandard schreibt vor, dass der Quotient  $P_{max}/P_Q$  unterhalb 1,1 liegen muss, da sowohl ein stabiles Risswachstum, als auch eine plastische Verformung an der Riss Spitze, den rein linear-elastischen Ansatz des K-Konzeptes verhindern. Mit Erreichen des Kraftmaximums wird der Riss instabil.

### 5.7.3. Rissfortschrittsuntersuchungen

Bei den Rissfortschrittsuntersuchungen wird ermittelt, wie sich ein Riss unter dynamischer Beanspruchung ausbreitet.

Eine mitten- oder seitengekerbten Probe wird zunächst einer Rissinitiierungsprozedur unterzogen. Ziel ist es, mittels einer Sinusbeanspruchung einen Ermüdungsanriss mit feiner Riss Spitze zu erzeugen. Im anschließenden Rissfortschrittversuch wird die Probe mit der Zyklusform belastet, welche i. d. R. einem idealisierten Lastfall des realen Bauteils entspricht, beispielsweise Kraft-Dreieckzyklus mit Haltezeit. Aufgrund des wachsenden Risses vergrößert sich im Laufe des Versuchs kontinuierlich das  $\Delta K$ , so dass unter Anwendung einer geeigneten Methode zur Risstiefenmessung, eine quasi-kontinuierliche Funktion der Risswachstumsgeschwindigkeit  $da/dn$  über die Schwingbreite der Spannungsintensität  $\Delta K$  generiert werden kann. Die Ergebnisse werden im doppelt-logarithmischen Diagramm  $da/dn$  vs.  $\Delta K$  aufgetragen und durch eine Exponentialfunktion  $da/dn = C \cdot (\Delta K)^m$  approximiert.  $C$  und  $m$  sind die sog. Paris-Parameter der Rissfortschrittcurve.

Die Rissfortschrittcurven sind theoretisch von der Probenform unabhängig, werden aber durch das in der dynamischen Beanspruchung aufgebrachte Spannungsverhältnis  $R$  beeinflusst. Mit steigendem Mittelspannungsniveau nimmt die Rissfortschrittsgeschwindigkeit mit gleichem  $\Delta K$  zu.

#### 5.7.4. Bruchmechanische Zeitstandversuche

Bei bruchmechanischen Zeitstandversuchen wird die Grenzspannungsintensität  $K_{SCC}$  ermittelt, bei der unter einem bestimmten Medium gerade noch kein Risswachstum auftritt.

Um die Versuche durchzuführen, ist es erforderlich, die Proben oder Bauteile zu belasten und sie gleichzeitig mit dem Prüfmedium zu beaufschlagen. Hierzu kann man die Proben in Belastungsrahmen einbauen, die ähnlich wie Prüfmaschinen aufgebaut sind. Die Probe wird hierbei mit konstanter Kraft belastet. Die Mediumbeaufschlagung kann im Wechsel- oder Dauertauchversuch erfolgen. Die rissbehafteten Proben stehen 30 Tage unter Last. Tritt kein Versagen während dieser 30 Tage auf, so werden die Proben endermüdet und Bruchfläche hinsichtlich Risswachstum untersucht. Meistens ist es erforderlich, die Bruchbeurteilung am Rasterelektronenmikroskop vorzunehmen, um eindeutige Aussagen hinsichtlich Risswachstum zu ermöglichen. Wird auf der Bruchfläche Risswachstum gefunden, so lag die angelegte Spannung oberhalb des  $K_{SCC}$  –Wertes. Ist kein Risswachstum festzustellen, so lag die Spannung unterhalb des  $K_{SCC}$  –Wert. Daraufhin wird versucht, sich mit weiteren Proben dem gesuchten Wert anzunähern.

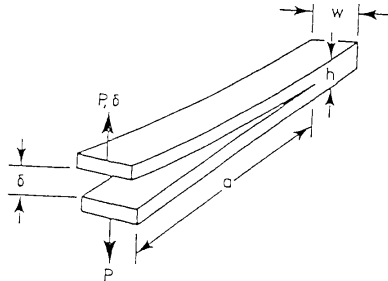
Es ist auch möglich, spezielle Belastungsvorrichtungen zu konstruieren, die eine konstante Last, Rissöffnung oder Dehnung erzeugen, was oftmals kostengünstiger ist, da mehr Proben gleichzeitig geprüft werden können.

#### 5.7.5. Bruchmechanik bei Faserverbundwerkstoffen

Die dazugehörigen Versuche werden in Anlehnung an die der Metalle durchgeführt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der interlaminaren Bruchzähigkeit und der Rissfortpflanzung zwischen zwei Lagen entlang der Fasserrichtung.

### Double Cantilever Beam Probe (DCB-Probe)

Die Probe dient zum Testen von Proben in Rissöffnungsmodus I. Die Probe wurde ursprünglich für die Untersuchung der Bruchmechanik an Klebungen entwickelt. Die interlaminaire Bruchzähigkeit wird bestimmt, indem die Probe soweit belastet wird, bis ein bereits vorhandener Riss bzw. eine Delamination sich ausbreitet.

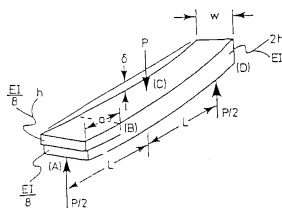


Während des Versuches müssen die Kraft, die Nachgiebigkeit der Probe und die Risslänge gemessen werden. Die Risszähigkeit kann als Arbeit verstanden werden, welche aufgewendet werden muss, um eine bestimmte Fläche zu delaminieren. Der ermittelte Kennwert ist der  $G_{IC}$ -Wert.

An gleichen Proben kann auch das Rissfortschrittsverhalten untersucht werden. Die Versuche werden im Gegensatz zu Rissfortschrittsversuchen an Metallen bei konstanter Dehnung gefahren. Da die Prüfkraft mit wachsendem Riss immer kleiner wird, kommt der Riss irgendwann zum Stillstand.

### End Notched Flexure Probe (ENF-Probe)

Die Probe erlaubt die Bestimmung der kritischen Energiefreisetzungsrate in ebener Dehnung unter dem Beanspruchungsmodus II. Die Probe ermöglicht eine Scherbelastung an der Rissspitze, ohne dass große Reibung zwischen den Rissoberflächen auftritt. Bei diesem Versuch wird eine mit einem Anfangsriss versehene Biegeprobe belastet und die Kraft in Abhängigkeit von der Durchbiegung gemessen. Auch hier wird die Energie bestimmt, die erforderlich ist, um eine bestimmte Delaminationsfläche zu erzeugen. Der ermittelte Kennwert ist der  $G_{IIC}$ -Wert.

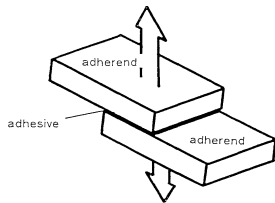


## **5.8. Prüfung von Klebeverbindungen**

Bei Klebeverbindungen werden drei Hauptbeanspruchungen unterschieden:

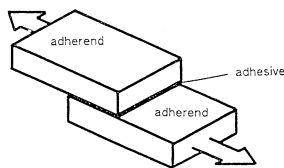
### Zugbeanspruchung

Die Beanspruchung erfolgt senkrecht zur Klebeschicht und verteilt sich gleichmäßig auf die gesamte Fläche. Die Zugfestigkeit ist höher als die Scherfestigkeit. Diese Belastung tritt in der Realität eigentlich nicht auf, da die Kräfte normalerweise nicht senkrecht auf die Klebung wirken. Es liegt fast immer Biegung vor, was zu vorzeitigem Versagen führt.



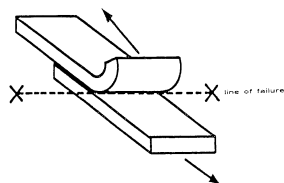
### Scherbeanspruchung

Bei der Scherbeanspruchung liegt die Klebeschicht in der Belastungsrichtung. Die beanspruchte Fläche ist die Überlappungslänge mal der Probenbreite. Dies ist die hauptsächlich am Bauteil vorkommende Beanspruchung.



### Schälbeanspruchung

Die Kraft wirkt entlang der Schällinie in sehr hoher Konzentration. Hierfür wird mindestens ein flexibles Verbindungselement benötigt (Folie oder dünnes Blech)



### **5.8.1. Zugscherversuch**

Der Zugscherversuch ist der am häufigstem bei Klebeverbindungen angewandte Prüfung. Eine einfach überlappte Klebung wird auf Schub beansprucht. Die ermittelte Scherfestigkeit ergibt sich aus der maximalen Prüfkraft bezogen auf die Klebefläche. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist es erforderlich, gleiche Probenformen mit gleichen Dicken und Werkstoffen der Fügeteile zu haben.

Es werden zwei Probenformen unterschieden:

#### Standardprobe

Die Standardprobe hat eine kleine Klebefläche und ist einfach herzustellen. Die Spannungsverteilung an dieser Probe ist sehr komplex und schwer zu analysieren, da es sich nicht um eine reine Scherbeanspruchung handelt. Die ermittelten Scherfestigkeiten weisen große Streuungen auf.

#### Blister Detection-Probe

Die Blister Detection-Probe hat eine große Klebefläche und ist auch aus Bauteilen entnehmbar. Die Probenherstellung ist relativ teuer, weil die Probe speziell geätzt werden muss. Auch hier ist die Spannungsanalyse schwierig. Die ermittelten Scherfestigkeiten streuen allerdings weniger als bei der Standardprobe.

### **5.8.2. Scherversuch**

Für die Ermittlung der Schereigenschaften von CFK gibt es verschiedene Prüfmethoden, bei denen entweder die interlaminare oder die intralaminare Scherfestigkeit ermittelt werden. Da einige Methoden zwar sehr gute Aussagen über das Scherverhalten liefern, aber sehr aufwändig sind, ist der Prüfaufwand häufig das Kriterium für die Auswahl der Methode.

Die einfachste, kostengünstigste, aber für statische Berechnungen nicht gültige Prüfmethode ist der interlaminare Scherversuch (Kurzbiegeversuch). Es wird die Scherfestigkeit zwischen den Schichten gemessen.

### Kurzbiegeversuch

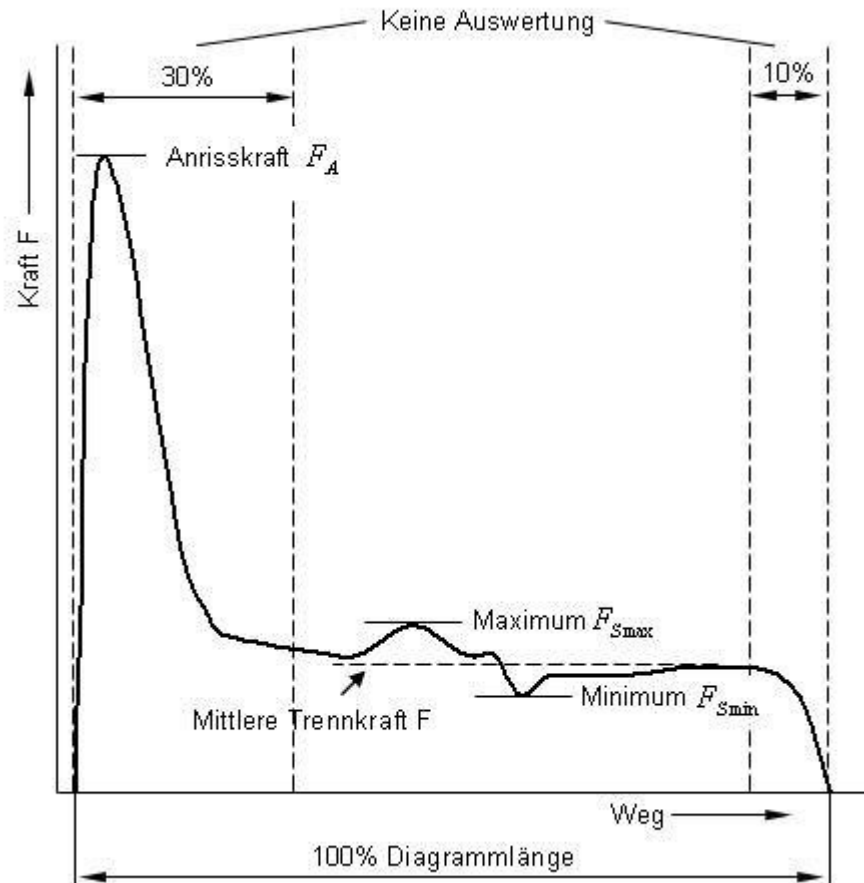
Bei diesem Versuch muss ein bestimmtes Auflageabstand-/Dickenverhältnis eingehalten werden und der Versuch ist nur gültig, wenn Schubversagen eintritt. Das Versagen tritt in der Mitte der Probe ein, da dort die Schubspannung am größten ist. Die Probe wird gleichzeitig biegebeansprucht. Es kann zu Zugversagen infolge der Biegebeanspruchung kommen. Die Ergebnisse sind nicht vergleichbar mit denen anderer Prüfmethoden. Es ist jedoch eine gute Prüfmethode für die Qualitätssicherung, die Werkstoffentwicklung und zur Untersuchung von Umwelteinflüssen.

Wenn man eine Zugscherprobe auf Zug belastet, so ergeben sich zusätzlich zu den Schubspannungen in der Klebefuge noch Schäl- und Normalspannungen.

### **5.8.3. Schälversuch**

Schälversuche sind die am zweithäufigsten durchgeführten Versuche, zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen, nach dem Scheren. Die Proben sind einfach herzustellen und zu prüfen. Bei dieser Prüfung wirkt die Kraft nicht in einer vorgegebenen Fläche, sondern entlang einer Linie, die senkrecht zur angreifenden Kraft ist. Die Schälfestigkeit ist die Kraft bezogen auf die Schällänge. Schälfestigkeitswerte können nicht direkt in die Berechnung einfließen. Sie werden für Werkstoffentwicklung und Qualitätssicherung verwendet, sowie zur Verfahrenskontrolle.

Anhand des Schälendiagramm ist ersichtlich, dass zunächst eine große Anfangskraft erforderlich ist und für das weiter Schälen eine erheblich niedrigere, konstante Kraft nötig ist. Zur Ermittlung der Schälfestigkeit wird dieser Anfangspeak (ca. 30%) wie auch die letzten 10% nicht berücksichtigt.

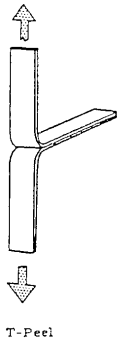


**Abbildung 124: Skizze Schäldiagramm**

Das Schäldiagramm wird von der Klebstoffdicke nicht beeinflusst. Mit steigender Fügeteildicke und steigendem E-Modul der Fügeteile steigt auch die Schälfestigkeit. Ein großer Nachteil von Schälversuchen ist die plastische Deformation der Fügeteile. Es lassen sich drei Typen von Schälversuchen unterscheiden, deren Unterschied hauptsächlich im Schälwinkel besteht.

### T-Schälversuch

Dieser Versuch erhält seinen Namen durch das Aussehen der Probe während des Schälversuches. Die Probe wird hergestellt indem zwei gleich dicke Fügeteile miteinander verklebt werden. Während des Versuchs werden die Fügeteile auseinandergezogen.

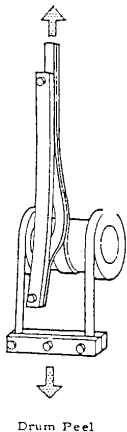


Die Probenherstellung ist sehr einfach. Die Fügeteile verformen sich sehr stark.

Dieser Schälversuch findet vor allem Anwendung bei der Feststellung von Unterschieden der Oberflächenvorbehandlung.

### Trommelschälversuch

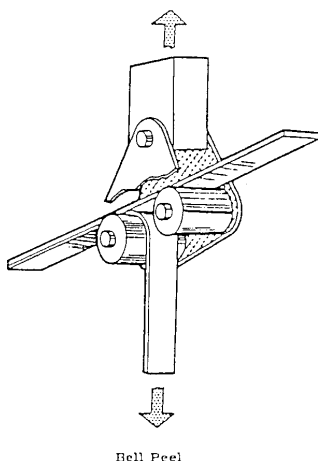
Es handelt sich um eine hochentwickelte Prüfmethode, bei der eine Trommel an der Schälprobe „hinauf klettert“ und so die Decklage abschält. Es ist erforderlich, die für das Aufwickeln der Decklage benötigte Kraft von der Schälkraft zu subtrahieren, um so die wirkliche Schälkraft zu erhalten.



Die Probenherstellung ist einfach. Die Versuchsergebnisse verändern sich mit der Schälgeschwindigkeit und der Dicke der Fügeteile.

Der Test wird für Entwicklungsversuche und für die Verfahrenskontrolle eingesetzt.

### Rollenschälversuch



Bei diesem Versuch wird eine abgewinkelte geklebte Probe an den nicht geklebten Schenkeln über eine Rolle durch eine Zugkraft so belastet, dass die Klebschicht reißt und beide Probehälften voneinander getrennt werden. Hierzu wird eine Probe auf halber Schälstrecke trocken geschält und dann wird Wasser in die offene Probe eingebracht und weiter geschält. Der Rollenschältest wird oft benutzt, um innerhalb kürzester Zeit eine Aussage über die Adhäsionseigenschaften eines Klebstoffes zu bekommen.

Zudem ist hierbei sehr gut erkennbar, ob die Oberflächenvorbehandlung in Ordnung ist. Langzeittests ersetzt das Verfahren nicht.

---

Quellenangaben:

Bargel, Schulz: Werkstoffkunde, Springer Verlag, 10. Auflage, 2008

M. Riehle, E. Simmchen: Grundlagen der Werkstofftechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 2000

B. Heine: Werkstoffprüfung, Carl Hanser Verlag, 2003

[http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-werkstoff/d1\\_bruch.pdf](http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-werkstoff/d1_bruch.pdf)

[http://www.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech\\_04-05-10.pdf](http://www.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech_04-05-10.pdf)

[http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft\\_2/chapter6.pdf](http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft_2/chapter6.pdf)

M. Neitzel und P. Mitschang: Handbuch Verbundwerkstoffe, Carl Hanser Verlag, 2004

G. W. Ehrenstein: Faserverbund-Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, 2006

## **6. Betriebsfestigkeit**

Vor allem in der Luftfahrt hat Sicherheit oberste Priorität, daher ist die Entwicklung durch das Streben nach höchster Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit gekennzeichnet. Die Lebensdauer von Flugzeugen ist auf 20 -25 Jahren und bis zu mindestens 90.000 Flügen ausgelegt, um die Luftfahrttüchtigkeit gewährleisten zu können, gilt der Betriebsfestigkeit große Aufmerksamkeit.

Betriebsfestigkeit ist definiert als das Festigkeitsverhalten von Bauteilen unter sich verändernden, zufallsartigen Beanspruchungen.

Heute wird der Begriff Betriebsfestigkeit als Synonym für den Begriff Schwingfestigkeit benutzt und schließt somit alle sich verändernden zufallsartigen sowie deterministischen Belastungen mit ein. Wie bereits in Kapitel 5.6 erwähnt ist bei der Dauer-schwingfestigkeit zwischen Einstufen-, Mehrstufen-, und Betriebsfestigkeitsversuchen zu unterscheiden. Bauteile können unter Schwingbeanspruchung versagen, deshalb ist die Betriebsfestigkeit ein wichtiges Qualitätsmerkmal.

### **6.1. Begriffe der Betriebsfestigkeit**

#### Dauerfestigkeit

Grenzwert der Belastung bis zu dessen Höhe eine schwingende Beanspruchung beliebig oft ohne Bruch ertragbar ist. Im Flugzeugbau nur anwendbar wenn keinerlei Belastungen oberhalb der Grenze auftreten.

#### Lebensdauer

Gibt die Zeitdauer an, bis eine konstante Schwingbeanspruchung zum Versagen des Bauteils führt. Gemessen wird in sog. Lastwechseln, d.h. Anzahl der sich ändernden Belastungen.

#### Ermüdung

Wiederholt auftretende Beanspruchungswechsel, die letztendlich zum Anriss und dann zum Bruch führen, können die physikalischen und chemischen Eigenschaften

eines Werkstoffs ändern. Tritt solch eine Änderung bei einem Werkstoff ein, spricht man von Ermüdung.

#### Rissfortschritt

Die Ausbreitung/Wachstum eines Anrisses wird Rissfortschritt genannt. Als Rissfortschritts-Lebensdauer bezeichnet man die Zeit vom Anriss bis zum Versagen eines Werkstoffs/Bauteils. Die Grenze wird hier oftmals bei der visuell erkennbaren Risslänge gesetzt.

#### Detektierbare Risslänge

Bei Inspektionen muss einer Riss mit bestimmter Länge mit ausreichender Sicherheit gefunden werden, wobei dies von der Inspektionsmethode, Zugänglichkeit und vielen weiteren Kriterien abhängt.

#### Kritische Risslänge

So bezeichnet man die Risslänge bei der ein plötzliches Versagen eintritt. Die kritische Risslänge ist ein Maß für die Restfestigkeit eines angerissenen Bauteils.

#### Schadenstoleranz

Rissfortschritt und Restfestigkeit werden unter der sog. Schadenstoleranz zusammengefasst.

#### Erstinspektion

Erste aufgrund von Ermüdung notwendige Inspektion. Die Erstinspektion wird berechnet aus dem Quotienten der Lebensdauer der Bauteils und einem ausreichenden Sicherheitsfaktor. Als Einheit ist „Flüge“ definiert.

#### Inspektionsintervall

Zeitraum/Abstand der Folgeinspektionen angegeben in „Flügen“. Errechnet wird das Intervall aus der Anzahl der Flüge zwischen erkennbarer und kritischer Risslänge dividiert durch einen ausreichenden Sicherheitsfaktor.

## **6.2. Vorschriften zur Betriebsfestigkeit**

Die Vorschriften bezüglich Betriebsfestigkeit bzw. „damage tolerance“ sind im wesentlichen im Paragraph FAR 25.571/CS enthalten und sind bei der amerikanischen wie auch bei der europäischen Luftfahrtbehörde gleichwertig. Ziel ist es, ein Struktur-Inspektionsprogramm zu erstellen, dessen Aufgabe es ist, einen Fehler frühzeitig zu erkennen. Es muss nachgewiesen werden, dass ein katastrophales Versagen durch Ermüdung, Korrosion oder einen zufälligen Unfallschaden während des Fluges ausgeschlossen werden kann.

Die Betreuung und Auswertung der Versuche enthält auch die Festlegung der Konsequenzen, d.h. die Definition von erforderlichen Modifikationen der In-Service Flugzeuge und in der Produktion und/oder notwendiger Inspektionen der In-Service Flugzeuge.

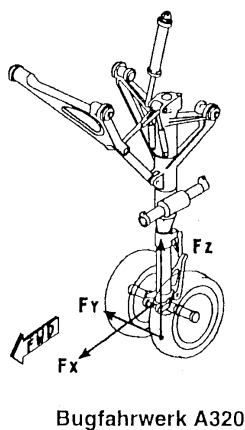
Nachfolgenden sind die Hauptanforderungen der Betriebsfestigkeits- bzw. Schadens-toleranzbewertung zusammengefasst:

- Erstellung von analytischen Ermüdungs- und Damage-Tolerance-Berechnungen und –nachweisen für neue Strukturen und Reparaturen
- Versuchsmäßige Nachweise der Betriebsfestigkeit und des Damage-Tolerance-Verhaltens der Struktur (neue Struktur und Reparaturen) durch Klein-, Komponenten- und Großzellen-Versuche
- Erstellung eines Inspektionsprogramms für neue Strukturen und Reparaturen auf der Basis der analytischen versuchsmäßigen Nachweise
- Auswertung der In-Service Ergebnisse (Schadensbefunde) und Definition der Schlussfolgerungen resultierend in Modifikation und/oder Inspektion

### 6.3. Konstruktionsprinzip

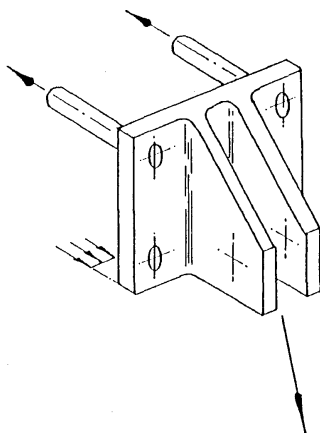
Die Anforderungen an eine Flugzeugstruktur sind in den verschiedenen Bereichen in Bezug auf Funktion und Betriebssicherheit sehr unterschiedlich. Es müssen deshalb verschiedene Konstruktionsprinzipien angewendet werden, um eine schadenstolerante Struktur zu erhalten. Nachfolgend wird ein Überblick bezüglich der einzelnen Prinzipien gegeben.

#### 6.3.1. Konstruktionsprinzip „safe life“



Ein „safe life“-Bauteil hat eine analytisch und versuchsmäßig nachgewiesene sichere Lebensdauer. Der Nachweis hat mit einem relativ hohen Sicherheitsfaktor (Überdimensionierung) zu erfolgen, d.h. für sehr kleine Ausfallwahrscheinlichkeiten. Nach Ablauf dieser Lebensdauer wird das Bauteil ersetzt, unabhängig davon, ob es Schäden zeigt oder nicht. Das „safe life“-Konzept wurde im Flugzeugbau bis 1960 angewendet. Nach den heutigen Vorschriften ist nur noch das Fahrwerk nach diesem Prinzip zu konstruieren.

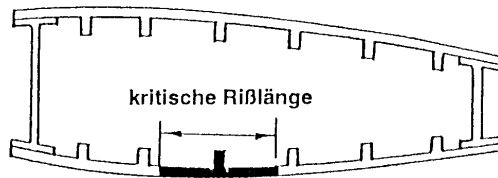
#### 6.3.2. Konstruktionsprinzip „fail safe“



Ein „fail safe“-Bauteil ist eine ausfallssichere Konstruktion, d.h. es besteht aus mehreren Lastpfaden, sodass nach Ausfall eines Lastpfades durch andere Lastpfade die gesamte Last übernommen werden kann. Die verbleibenden Lastpfade müssen so ausgelegt sein, dass sie die sichere statische Last komplett übernehmen können.

Das „fail safe“-Konzept war im Flugzeugbau bis 1978 zugelassen und wurde dann durch eine Vorschriftenänderung vom „damage tolerance“-Konzept abgelöst.

### 6.3.3. Konstruktionsprinzip „damage tolerance“



Flügel

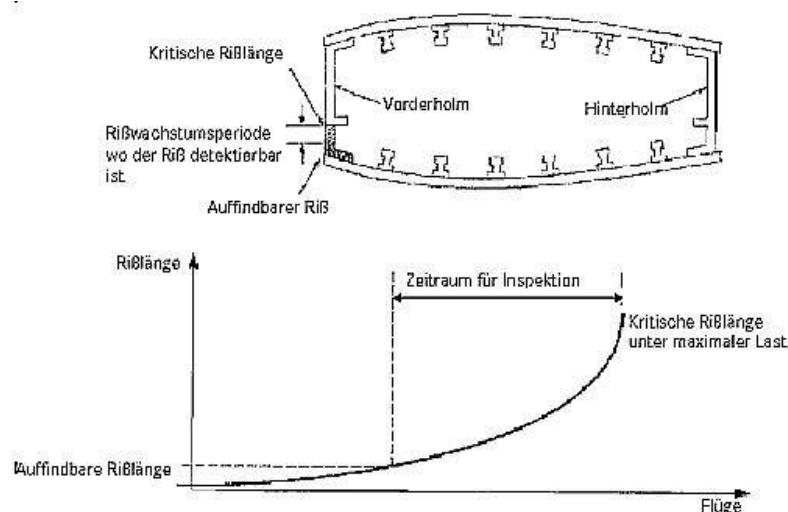
Bei „damage-tolerant“- Bauteilen werden Schäden bis zu einer definierten Schadensgröße toleriert. In diesem Bereich besitzt die fehlerbehaftete Struktur die Fähigkeit, die zu erwartenden Belastungen zu ertragen, bis die Fehler durch eine geplante Inspektion oder einem nicht sicherheitsgefährdenden Funktionsausfall entdeckt und repariert werden.

Ein „damage tolerance“-Bauteil unterscheidet sich in der Konstruktion nicht wesentlich von einem „fail safe“-Bauteil. Die Sicherheit des Bauteils basiert auf den Inspektionen, die ab dem Threshold (Schwellenwert) in Intervallen durchzuführen sind. Dabei ist zu beachten, dass die tolerierbare Fehlergröße von den verwendeten Werkstoffen, den Bauweisen und den Belastungen abhängig ist.

Bei der schadenstoleranten Konstruktion gibt es zwei Kategorien:

#### Einfacher Lastpfad

Der erste Inspektionstermin wird durch eine Schwingfestigkeitsberechnung, die mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt wird, festgelegt. Die folgenden Inspektionsintervalle werden vom Risswachstum abgeleitet.



**Abbildung 125: Schadenstolerante Konstruktion**  
(einfacher Lastpfad)

### Mehrfacher Lastpfad

Diese Konstruktionen werden in drei Untergruppen unterteilt:

- *Mehrfacher Lastpfad - nur von außen inspizierbar*

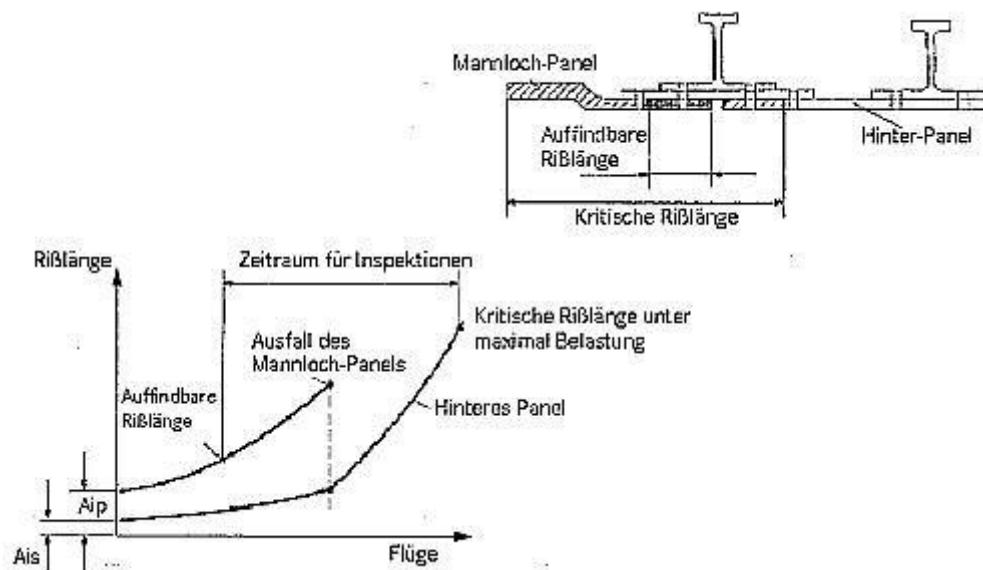
Der Ausfall des ersten Lastpfades ist nicht detektierbar bevor der Lastpfad komplett ausgefallen ist, z.B. weil dieser abgedeckt ist. Zu diesem Zeitpunkt ist der Anfangsriss im zweiten Lastpfad gewachsen, aber noch nicht erkennbar. Das Inspektionsintervall wird ermittelt aus der Rissfortschrittsperiode zwischen dem Ausfall des ersten Lastpfades und dem Erreichen der kritischen Risslänge im zweiten Lastpfad, d.h. inspiziert wird der erste Lastpfad. Dabei ist die Lastumlagerung vom ersten zum zweiten Lastpfad zu berücksichtigen.

- *Mehrfacher Lastpfad - nur ein komplett gerissener Lastpfad ist detektierbar*

Es ist ein detektierbarer Riss im ersten Lastpfad zu suchen. Das Inspektionsintervall ergibt sich aus der Rissfortschrittsperiode vom erkennbaren Riss im ersten Lastpfad bis zur kritischen Risslänge im zweiten Lastpfad, d.h. inspiziert wird der erste Lastpfad. Während dieser Rissfortschrittsperiode fällt der erste Lastpfad aus und der zweite übernimmt die Last.

- *Mehrfacher Lastpfad - auch angerissene Lastpfade sind detektierbar*

Die Struktur ist so ausgelegt, dass der Rissfortschritt im externen Lastpfad langsam genug ist, um nach Ausfall des internen Lastpfades und unter Berücksichtigung der Lastumlagerung eine zufriedenstellende Rissfortschrittsperiode zu liefern. Eine Inspektion des inneren Lastpfades ist nicht erforderlich.



**Abbildung 126: Schadenstolerante Konstruktion**  
(mehrfacher Lastenpfad)

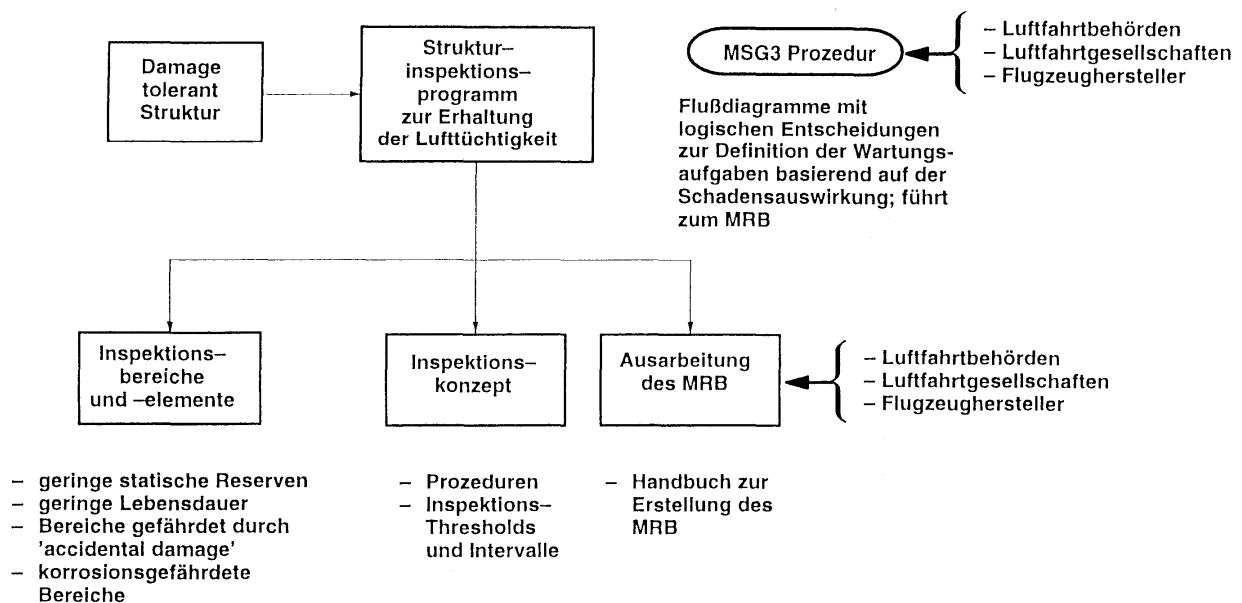
## 6.4. Strukturinspektionen

### 6.4.1. Erstellung eines Wartungsprogramms

Für jeden neuen Flugzeugtyp oder Triebwerk ist vor Indienststellung bei den Luftfahrtgesellschaften ein Wartungsprogramm zu erstellen. Ziele sind die Erhaltung der Lufttüchtigkeit während der gesamten Einsatzdauer in wirtschaftlicher Weise und die Erfüllung der Zulassungsforderungen. Als Ergebnis entsteht ein Programm zur planmäßigen Wartung zusammengefasst im „Maintenance Review Board“ - Report (MRB-Report), der von Behörden, Luftfahrtgesellschaften und Hersteller anerkannt wird. Der MRB-Report enthält die minimalen planmäßigen Wartungsforderungen mit ihren Intervallen für Systeme, Triebwerke und Struktur. Dies ist die Basis für jeden Betreiber zur Erstellung seines eigenen Wartungsprogramms, das von seiner Behörde anerkannt werden muss.

Ziel des Wartungsprogramms ist die Entdeckung eines Schadens vor Erreichen einer kritischen Situation, die zum Verlust der Lufttüchtigkeit führen würde. Deshalb ist die Detektion des Schadens eine unablässige Bedingung für die damage tolerance Kapazität der Struktur.

Das folgende Organigramm zeigt den Prozess zur Erstellung des Wartungsprogramms.



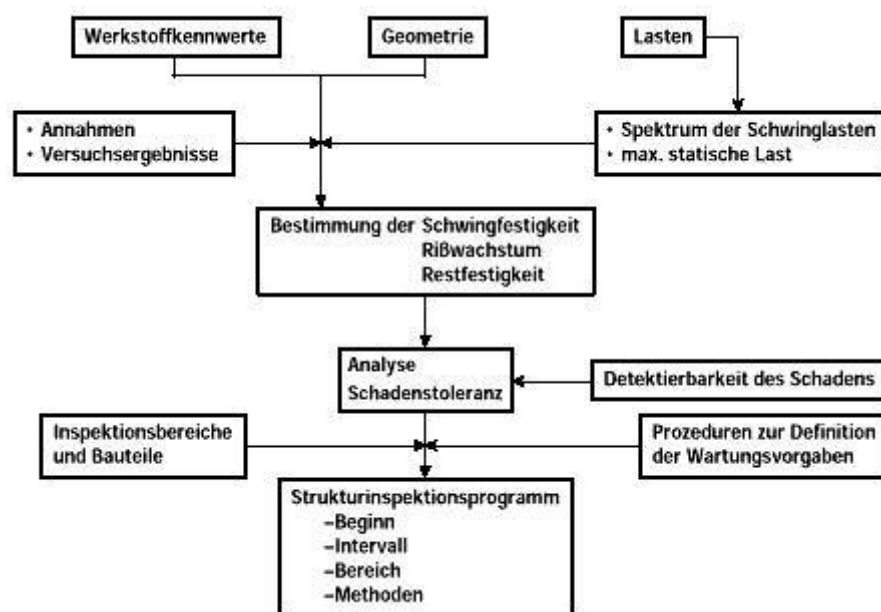
**Abbildung 127: Prozess zur Definition des Wartungsprogramms**

### 6.4.2. Ermittlung der erforderlichen Strukturinspektionen

Für jedes sicherheitsrelevantes Bauteil (Strukturelement) ist diese Analyse durchzuführen. Hierzu sind folgende Daten für jedes zu inspizierende Bauteil festzulegen und in Handbüchern dem Betreiber zur Verfügung zu stellen.

- Inspektionsbeginn: Flugzeugalter oder Anzahl der Flüge bis zur ersten Inspektion
- Inspektionsintervall: Zeit oder Anzahl der Flüge zwischen den Inspektionen
- Inspektionsbereich: Detaillierte Beschreibung des Inspektionsbereiches und der Fehlerart und –lage
- Inspektionsmethode: Detaillierte Angabe in einer Inspektionsprozedur (Gerät, Justierung, Bewertungskriterium)

Abbildung 128 zeigt die Faktoren, welche für die Entwicklung eines Strukturinspektions-Programms zu beachten sind.

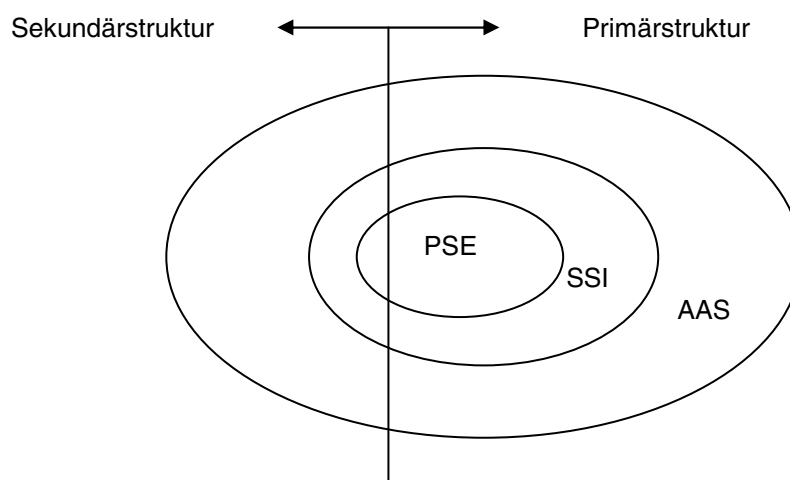


**Abbildung 128: Strukturinspektion-Programm**

Zur Auswahl der Inspektionsbereiche ist die Einteilung der Gesamtstruktur zu beachten.

Die *Primärstruktur* übernimmt einen Teil der Flug-, Boden- oder Innendrucklasten. Die *Sekundärstruktur* übernimmt nur Luft- oder Trägheitslasten, die auf oder innerhalb der Sekundärstruktur entstehen.

Ein *PSE* (*principal structural element*) ist ein Strukturelement, welches wesentlich zur Übernahme der Flug-, Boden oder Innendrucklasten beiträgt und dessen Integrität unentbehrlich ist zur Erhaltung der Lufttüchtigkeit des Flugzeugs. Die *AAS* (*airworthiness affected structure*) umfasst die gesamte Primärstruktur und diejenigen Elemente der Sekundärstruktur, deren Integrität unentbehrlich ist zur Erhaltung der Lufttüchtigkeit des Flugzeugs. Ein *SSI* (*significant structural item*) ist ein Element, das vom Hersteller für die Inspektionen ausgewählt wurde und dessen Ausfall die Strukturintegrität, die für die Sicherheit des Flugzeugs notwendig ist, beeinflussen könnte.



**Abbildung 129: Ermittlung der Strukturinspektionen**

### 6.4.3. Ermittlung der detektierbaren Risslänge

Die Erkennbarkeit ist abhängig von der Inspektionsebene:

- *GVI: general visual inspection (allg. Sichtinspektion)*

Ist eine visuelle Untersuchung, um offensichtliche unzureichende Zustände der Struktur zu entdecken. Dieser Inspektionstyp kann die Entfernung von Abdeckungen, Verkleidungen sowie Zugangsdeckeln und -türen erfordern.

- *DET: detailed inspection (detaillierte Sichtinspektion)*

Hierbei handelt es sich um eine intensive visuelle Untersuchung eines spezifischen Details, Zusammenbaus oder Einbau zur Entdeckung von Unregelmäßigkeiten. Dabei muss ausreichendes Licht vorhanden sein und wenn erforderlich Hilfsmittel wie Spiegel, Lupen oder Ähnliches eingesetzt werden. Ebenfalls kann eine Oberflächenreinigung sowie Arbeiten zur Schaffung eines Zugangs erforderlich sein.

- *SDET: special detailed inspection (spezielle detaillierte Inspektion)*

Diese intensive Untersuchung eines speziellen Bereichs ähnelt dem der „detailed inspection“. Zusätzlich erfordert das SDET spezielle Techniken wie Eindringprüfverfahren oder Vergrößerung mit hoher Auflösung. Des Weiteren kann eine Demontage von Bauteilen erforderlich sein.

Die erkennbare Risslänge ist stark von dem gewählten Niveau abhängig, sodass bei einer höherem Inspektionsebene (kleinere detektierbare Risslänge), größere Inspektionsintervalle möglich sind.

Das Ziel der Bestimmung der detektierbaren Risslänge ist es, das niedrigste Inspektionsniveau auszuwählen, d.h. das effektiv und praktikabel ist.



Die erkennbare Risslänge für visuelle Inspektionen (GVI und DET) wird mit Hilfe der MSG3-Prozedur (*Maintenance Steering Group*) bestimmt, die im MPPPH (*Maintenance Program Policy and Procedures Handbook*) festgelegt ist. Es ist nicht die minimal Risslänge, sondern diejenige, die nicht übersehen werden darf.

Dabei werden die folgenden Parameter berücksichtigt:

- Inspektionsniveau
- Zugang (Sichtbarkeit und Behinderung durch andere Bauteile)
- Beleuchtung
- Oberflächenbeschaffenheit, Größe und Materialdicke sowie Randeinfluss
- verdickte Risslängen

Sollte das untersuchte Inspektionsniveau nicht zu einem sicheren und wirtschaftlichen Inspektionsintervall führen, dann wird das nächst höhere Inspektionsniveau ausgewählt und hierfür die erkennbare Risslänge bestimmt.

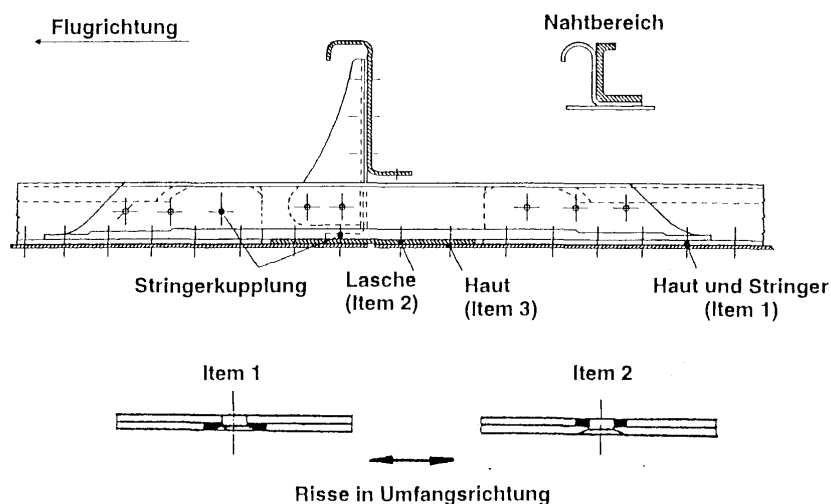
## **6.5. Erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden - Beispiele**

### Rumpfstruktur

In diesem Kapitel sind Beispiele von Schäden angegeben wie sie zur Bestimmung des Inspektionsintervalls angesetzt wurden. Die Lage der Schäden (Risse) wurde anhand der Erfahrungen mit früheren Flugzeugtypen und der Großzellenversuche, des Spannungsniveaus, der Kerbempfindlichkeit etc. definiert.

Querstöße - Ermüdungsempfindliche Stelle an der Quernaht können sein:

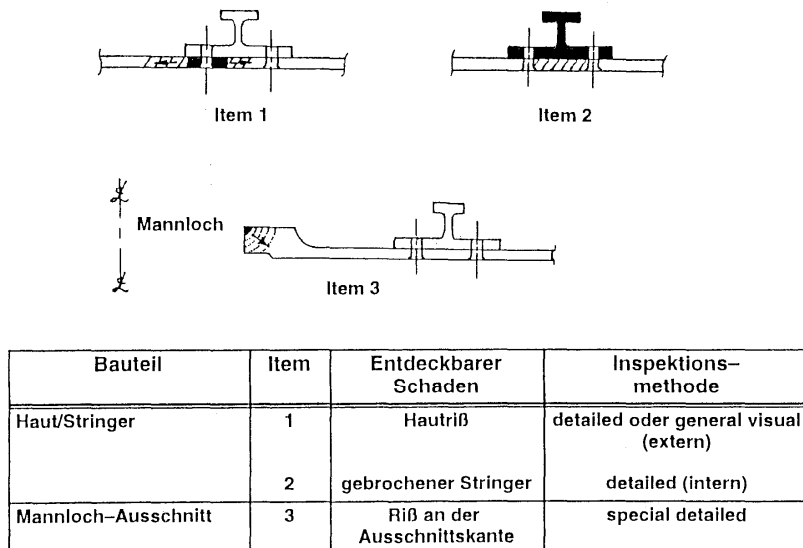
- Haut und Stringer am Auslauf der Stringerkupplung
- Querstoßblasche im Bereich der beiden inneren Nietreihen
- Haut im Bereich der äußeren Nietreihen der Haut-Laschennietung
- Stringerkupplungsfuß im Bereich der inneren Nietreihen
- Stringerkupplungsflansch am Auslauf des Stringers



Bauteil	Item	Entdeckbarer Schaden	Inspektionsmethode
Haut am Auslauf der Stringerkupplung	1	Hautriß	detailed (extern)
Querstoßblasche	2	Riß in der Lasche	special detailed (von außen)
Haut im Bereich der Lasche	3	Hautriß	detailed (extern)

**Abbildung 130: Querstöße - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden**

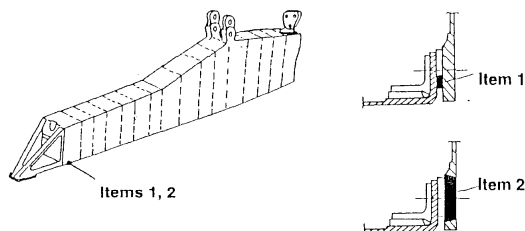
## Flügelstruktur



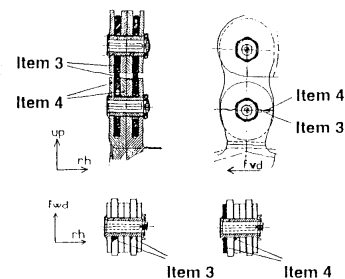
**Abbildung 131: Flügelunterdecke - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden**

## Pylon

Pylon – Anschluß unterer Träger an Seitenpanel



Pylon – Vorderer Anschluß an den Flügel



Bauteil	Item	Entdeckbarer Schaden	Inspektionsmethode
unterer Träger	1	Riß im vertikalen Flansch	detailed oder special detailed
Seiten-Panel	2	Riß im Panel	general visual
Pylon-Anschluß	3	Riß im äußeren Pylon-Anschluß und kleiner Anriß im inneren Anschluß	detailed nach Ausbau
Pylon äußerer Ti-Beschlag	4	Riß im äußeren Auge und kleiner Anriß im inneren Auge	general visual

**Abbildung 132: Pylon - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden**

Quellenangaben:

<http://www.ndt.net/article/v04n06/tober/tober.htm>

[1], [2] <http://www.ndt.net/article/v04n06/tober/tober.htm>

## **7. Aufbau einer „Written Practice“ (Zulassungsvorschrift)**

### **7.1. Allgemeines**

Betriebe aus der Luft- und Raumfahrtbranche, die zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen (ZfP) durchführen, müssen eine Zulassungsvorschrift für die Qualifikation und Zulassung ihres ZfP-Personals erstellen und pflegen. Diese Zulassungsvorschrift muss die Anforderungen der Norm DIN EN 4179 „Luft- und Raumfahrt – Qualifikation und Zulassung des Personals für zerstörungsfreie Prüfungen“ entsprechen. Somit stellt diese Norm die Grundlage für die Zulassung von Personal für alle Tätigkeiten der zerstörungsfreien Prüfung dar.

Folgende Mindestanforderungen sind für den Inhalt der Zulassungsvorschrift festgelegt.

- Qualifikationsstufen
- Pflichten und Verantwortung des Personals
- Ausbildungsprogramm
- Anforderungen an die Erfahrung
- Prüfungsordnung
- Aufzeichnungen und Abwicklung
- Anforderungen an die Erneuerung bzw. Verlängerung der Zulassung

### **7.2. Qualifikationsstufen**

Dieser Punkt legt die in der Zulassungsvorschrift enthaltenen Stufen der Qualifikation und Zulassung fest. Es gibt insgesamt sieben Stufen der Qualifizierung. Für bestimmte Situationen dürfen diese vom Arbeitgeber weiter unterteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Anforderungen und Verantwortlichkeiten bei solchen Unterteilungen in der Zulassungsvorschrift einzeln aufzuführen sind.

Nach folgenden Qualifikationsstufen wird unterteilt:

- Trainee
- Personal der Stufe 1 „mit Einschränkung“
- Personal der Stufe 1
- Personal der Stufe 2
- Personal der Stufe 3
- Ausbilder
- Auditor

### **7.3. Pflichten und Verantwortung des Personals**

Hierbei können die Verantwortlichkeiten und Pflichten des Personals für die drei Zulassungsstufen gemäß §4 der EN 4179 übernommen werden.

Im Ausbildungsprogramm sollte eine Beschreibung der vom Arbeitgeber selbst vorgenommenen Ausbildung, sowie die von ihm genutzten externen Ausbildungsstellen, einschließlich der für jedes Verfahren und Qualifikationsstufe erforderlichen Ausbildungsstunden und Ausbildungsinhalte vorliegen.

Für die Ausbildungsstelle sollten nachfolgende Angaben in die Zulassungsvorschrift einfließen:

- Benennung der Stelle im Betrieb, organisatorische Einbindung der Ausbildungsstelle
- verantwortliche Stufe 3 Person für die Schulung
- Lehrpersonal
- Ausbildungsinhalte und –stunden pro Verfahren

Externe Stellen bzw. Schulungsstätten, welche auch für andere Firmen die Qualifikation durchführen, müssen zusätzlich zu den genannten Forderungen auch eine Anerkennung vom „BDLI-Lenkausschuss“ für ZfP-Personalqualifikation (nach § 2.11 in EN 4179) vorweisen.

Die mindestens erforderlichen Ausbildungsstunden für die 5 „Basisverfahren“ Eindringprüfung (PT), Magnetpulverprüfung (MT), Wirbelstromprüfung (ET), Ultraschallprüfung (UT) und Durchstrahlungsprüfung/Röntgen (RT) können aus EN 4179 entnommen werden. Die Ausbildungsinhalte sind für die Basisverfahren in den BDLI-Stoffplänen enthalten und können falls erforderlich individuell ergänzt werden.

#### **7.4. Ausbildungsprogramm**

Für die von der zuständigen ZfP-Organisation, NANDTB, oder externen Vertragsstellen müssen Lehrpläne oder Quellenangaben für die vorgesehenen Unterweisungen in der Zulassungsvorschrift enthalten sein. Im Ausbildungsprogramm sind zudem die jeweilige erforderliche Mindestanzahl von Ausbildungsstunden festgelegt, wie auch die Art der Ausbildungseinrichtung.

#### **7.5. Anforderungen an die Erfahrung**

Diesem Vorschriftenpunkt sind die Anforderungen - Erfahrungszeit in Stunden - zu entnehmen, welche mindestens notwendig sind, um die Techniken des jeweiligen Verfahrens zu erlernen. Die jeweils aufzuwendende Zeit für die 5 Basisverfahren ist aus DIN EN 4179 zu entnehmen.

##### Beispiel:

Ultraschall Stufe 1 -> Stufe 2: gem. EN 4179 sind 1200 Erfahrungsstunden als Stufe 1 erforderlich, die sich wie folgt aufteilen:

300 Std. automatische US-Tauchanlage

150 Std. Bewertung von C-Bildern nach Prüfanweisung

500 Std. Impuls-Echo-Handprüfung

250 Std. US-Handprüfung mit halbautomat. Scansystem

-----  
Σ 1200 Std.

## **7.6. Prüfungsordnung**

In der Prüfungsordnung werden die Personen oder Organisationen, welche die Prüfungen durchführen genannt. Darin sind zusätzlich auch Einzelheiten über die Zahl der Prüfungsfragen und die Bewertungen der Prüfergebnisse enthalten.

Die Anzahl der Prüfungsfragen für die 5 Basisverfahren ist in DIN EN 4179 für alle Stufen festgelegt.

## **7.7. Aufzeichnungen und Abwicklung**

Dieser Punkt legt die Details fest, welche für jede zugelassene Person aufgezeichnet werden und benennt die für die Erstellung, Verwaltung und Pflege des Qualifikations- und Zulassungsprogramms des Arbeitsgebers verantwortlichen Personen. Die Aufzeichnungen sind für die Dauer ihrer Gültigkeit aufzubewahren.

## **7.8. Anforderungen an die Erneuerung bzw. Verlängerung der Zulassung**

Neben der jährlichen Überprüfung der körperlichen Eignung (z.B. Sehtest bei der Eindringprüfung) definiert DIN EN 4179 mehrere Möglichkeiten für den fachlichen Teil der Wiederzulassung.

Es ist zu dokumentieren, welcher fachliche „Wiederholungsnachweis“ gewählt wurde, wobei speziell die möglichen Alternativen genau beschrieben werden sollten.

Ebenfalls ist zu dokumentieren, an welchem Ort die Wiederholungsprüfung stattgefunden hat und ob eine vorgeschalteter Auffrischungslehrgang vorgesehen ist.

---

Quellenangaben:

DIN EN 4179

<http://www2.lba.de/dokumente/rundschreiben/RS-19-02-02-4.pdf>

## **8. Wahrscheinlichkeitsbetrachtung**

### **8.1. Einführung**

In diesem Kapitel wird eine allgemeine, kurze Einführung in das Gebiet der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung, unter dem Gesichtspunkt des Einsatzes im Rahmen von Aufgaben der Qualitätssicherung, gegeben. Dabei wird vorrangig auf Definitionen und Abgrenzungen von Begriffen sowie der Beschreibung genereller Vorgehensweisen eingegangen.

### **8.2. Statistik**

Statistik ist eine methodische Hilfswissenschaft zur systematischen, zahlenmäßigen Untersuchung von Massenerscheinungen. Es werden Tatbestände, die auf dem Zusammenwirken von vielen Einzelercheinungen beruhen, unter generalisierten Gesichtspunkten betrachtet. Statistische Methoden werden auf vielen Gebieten wie beispielsweise Volks- und Betriebswirtschaft, Sozialwissenschaften, Medizin und Qualitätssicherung eingesetzt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und Auswertungen sind oft Grundlagen für Entscheidungen über zukünftige Vorgehensweisen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit bei der Erstellung von Statistiken sorgfältig und gewissenhaft vorzugehen.

Eine statistische Untersuchung beginnt mit der Erhebung, d.h. der Erfassung von Massentatsachen, die anschließend geordnet, bearbeitet und dargestellt werden.

Die Ergebnisse einer statistischen Untersuchung sind um so zuverlässiger, je größer die Zahl der beobachteten Fälle ist.

Die Statistik wird in zwei Teilgebiete unterteilt:

- beschreibende Statistik
- beurteilende Statistik

Die *beschreibende Statistik* befasst sich mit der Planung und Durchführung statistischer Erhebungen, sowie mit der zweckmäßigen Aufbereitung, der dabei gewonnen Daten.

Die *beurteilende Statistik* befasst sich mit den Problemen der Auswahl von Stichproben und den Methoden. Beispielsweise die Vorgehensweise zur Ermittlung der Grundgesamtheit auf Basis von Stichprobenergebnissen sowie die Beschreibung deren Aussagefähigkeit. Ein wesentliches Hilfsmittel der beurteilenden Statistik ist die Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Im Rahmen von Qualitätssicherungsaufgaben findet im wesentlichen die beurteilende Statistik ihren Einsatz. Ein typisches Beispiel hierfür ist die zerstörende Prüfung von Wareneingangs- oder Fertigungsbegleitproben. Es wird an einer Anzahl Proben, z. B. der E-Modul und die Festigkeit gemessen. Aus den Messwerten dieser Stichprobe wird auf die Gesamtheit geschlossen.

### **8.2.1. Statistische Erhebung und zugeordnete Begriffe**

Grundlage jeder Statistik ist die statistische Erhebung, bei der die Individuen (Objekte) einer Grundgesamtheit auf eines oder mehrere Merkmale untersucht werden.

#### Grundgesamtheit einer statistischen Erhebung

Beispielsweise alle Produkte, die von einem Unternehmen in einem bestimmten Zeitraum hergestellt worden sind, bilden eine Grundgesamtheit.

#### Merkmale nach denen untersucht wird

Die Untersuchungsmerkmale sind verschieden und richten sich nach der Grundgesamtheit.

Die folgende Tabelle zeigt, ein paar Arten von Merkmalsausprägungen, die mit verschiedenen zerstörungsfreien Prüfmethoden festgestellt werden können.

<b>Merkmalsträger</b>	<b>Merkmal</b>	<b>Merkmalsausprägung</b>	<b>Methode</b>
gegossene Schaufel	Erfüllung der Qualitätsanforderungen	Gußfehler	z. B. Röntgen, Ultraschallprüfung
geschmiedete Scheibe	Erfüllung der Qualitätsanforderungen	Schmiedefehlern	z. B. Ultraschall-, Risseindringprüfung
Lötverbindung	Erfüllung der Qualitätsanforderungen	Lotanbindung	z. B. Röntgen, Risseindringprüfung

Von Skalen wird gesprochen, um die unterschiedlichen Merkmalausprägung hervorzuheben.

#### Nominalskala:

Die Merkmalsausprägungen sind Namen oder Bezeichnungen, die ausschließlich der Kennzeichnung dienen.

Beispiel: Gußfehler: Lunker, Seigerungen,...

#### Ordinalskala

Die Merkmalsausprägungen sind im allgemeinen Zahlen und bringen eine Rangfolge zum Ausdruck.

Beispiel: Lunkerausprägung: vereinzelt, verteilt, gehäuft,...

#### Metrische Skala

Die Merkmalsausprägungen sind Zahlen, legen eine Rangfolge fest und überdies sind Differenzen und Verhältnisse sinnvoll.

Beispiel: Lunkergröße: 0,5mm, 1mm,...

Merkmale mit metrischer Skala bezeichnet man als quantitative Merkmale, solche mit Nominal- oder Ordinalskala heißen qualitative Merkmale.

Die quantitativen Merkmale werden weiter in diskret und stetig unterteilt:

- diskret: Ausprägung kann nur isolierte Zahlenwerte annehmen, z.B. Anzahl der Fehleranzeigen
- stetig: Merkmale können alle Zahlenwerte in einem Intervall annehmen, z.B. Lunkergrößen in mm

### **8.2.2. Stichprobe**

Im Idealfall erstreckt sich eine statistische Erhebung auf alle Objekte der betrachteten Grundgesamtheit. Aufgrund von Zeit- oder Kostengründen ist es oft nicht möglich, die Untersuchung bei allen Objekten der Grundgesamtheit durchzuführen. Dies hat zur Folge, dass nur eine gewisse Auswahl von Merkmalsträgern untersucht wird, das Vorgehen wird als Stichprobenuntersuchung bezeichnet. Die hierbei ermittelten Daten werden auf die Grundgesamtheit übertragen. Voraussetzung für die Einschränkung einer Untersuchung auf eine Stichprobe ist, dass somit ein gestreutes Abbild der Grundgesamtheit ermittelt wird.

Die Festlegung einer Stichprobe und deren Umfang für eine statistische Erhebung kommt einer entscheidenden Bedeutung bei. Das Ergebnis der Erhebung für die Gesamtheit kann nur in dem Maße gelten, in dem die Zusammensetzung der Stichprobe der Zusammensetzung der Grundgesamtheit entspricht.

Mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung ist festzustellen, mit welcher Zuverlässigkeit und in welchem Toleranzintervall das Stichprobenergebnis auf die Gesamtheit übertragen werden kann.

### **8.2.3. Auswertung statistischer Erhebungen**

Für die Verfahren der Auswertung statistischer Erhebungen ist es unwesentlich, ob die Erhebung an der Grundgesamtheit oder einer Stichprobe durchgeführt worden ist.

Im allgemeinen liegt das Ergebnis einer statistischen Erhebung in Form einer sogenannten Urliste vor.

Beispiel: Urliste von 20 Bauteilen und deren Anzahl an Poren pro Bauteil

<b>Bauteil (i)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	8	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Fehl- stellen (x)</b>	3	3	5	2	4	2	3	3	4	2	3	3	2	4	3	4	1	1	5	4

Im ersten Schritt wird für die Merkmalsausprägung eine Klasseneinteilung festgelegt. In vielen Fällen ergibt sich eine Klasseneinteilung direkt aus den Merkmalsausprägungen. In anderen Fällen, insbesondere bei Ausprägungen mit metrischer Skala, ist es erforderlich Werte aus einem bestimmten Intervall zu einer Klasse zusammenzufassen. Die Schwierigkeit der Klasseneinteilung ist immer die Festlegung der Klassengrenzen und der Klassenzuordnung der Grenzwerte. Auf das Ergebnis der Auswertung hat diese Zuordnung keinen generellen Einfluss. Bei einer Interpretation der Ergebnisse muss die Zuordnung jedoch unter Umständen berücksichtigt werden. Ist die Klasseneinteilung definiert, wird aus der Urliste die Strichliste und Häufigkeitstabelle erstellt.

Aus der Urliste für die Klassenbreiten erhält man folgendes Bearbeitungsergebnis

<b>Fehl- stellen</b>	<b>Klasse k</b>	<b>Strichliste</b>	<b>Häufigkeit</b>			<b>Summenhäufigkeit</b>		
			<b>absolut a (k)</b>	<b>relativ h (k)</b>	<b>prozentual p (k)</b>	<b>absolut A (k)</b>	<b>relativ H (k)</b>	<b>prozentual P (k)</b>
1	1	III	3	0,12	12	3	0,12	12
2	2	IIII	5	0,20	20	8	0,32	32
3	3	IIII IIII	9	0,36	36	17	0,68	68
4	4	IIII I	6	0,24	24	23	0,92	92
5	5	II	2	0,08	8	25	1,00	100
6	6		0	0	0	25	1,00	100
		Summe =	25	1,00	100			

Die relative bzw. absolute Häufigkeit und Summenhäufigkeit werden folgendermaßen berechnet.

<b>relative Häufigkeit</b>	$h(k) = \frac{a(k)}{\sum_{k=1}^n i(k)}$	$H(k) = \frac{\sum_{k=1}^m A(k)}{\sum_{k=1}^n a(k)} = \sum_{k=1}^m h(k)$
<b>prozentuale Häufigkeit</b>	$p(k) = h(k) \cdot 100$	$P(k) = H(k) \cdot 100$

#### 8.2.4. Graphische Darstellung von Häufigkeitstabellen

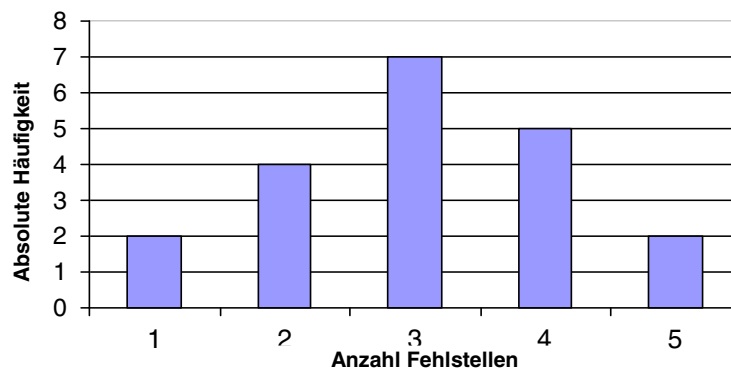
Häufigkeitstabellen sind oft nicht sehr übersichtlich, deshalb werden diese oft grafisch dargestellt werden.

Die Bilder von Häufigkeitsverteilungen empirischer, statistischer Untersuchungen können in ihrer Gestalt bzw. Darstellung sehr unterschiedlich sein

Nachfolgend die am häufigsten verwendeten grafischen Darstellungen am Beispiel der absoluten Häufigkeitsverteilung der „20 Bauteile und deren Anzahl an Poren pro Bauteil“.

##### Säulendiagramm

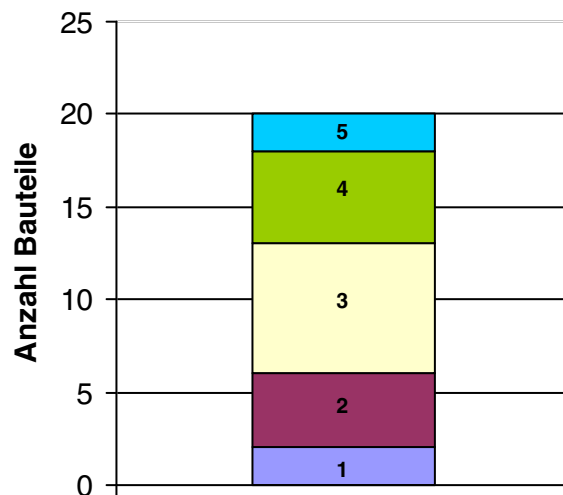
Bei dieser Diagrammart werden auf der x-Achse die Merkmalsausprägungen der Klassen aufgetragen. Die Säulen auf der y-Achse Linien entsprechen der Länge der jeweiligen absoluten Häufigkeit.



**Abbildung 133: Säulendiagramm - absolute Häufigkeit**

### Gestapeltes Säulendiagramm

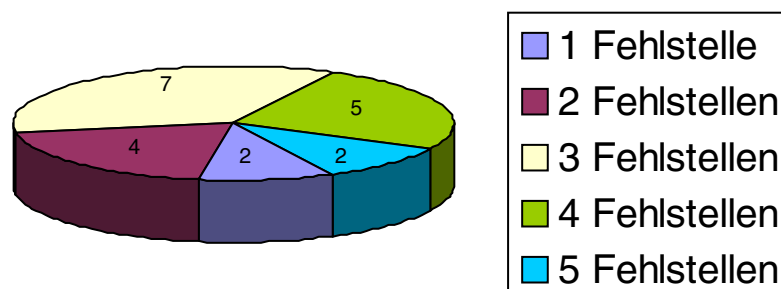
Beim gestapelten Säulendiagramm werden die Anteile der einzelnen Klassen übereinander dargestellt, wobei die einzelnen Höhen der jeweiligen Klassenhäufigkeit entsprechen.



**Abbildung 134: gestapeltes Säulendiagramm**

### Kreisdiagramm

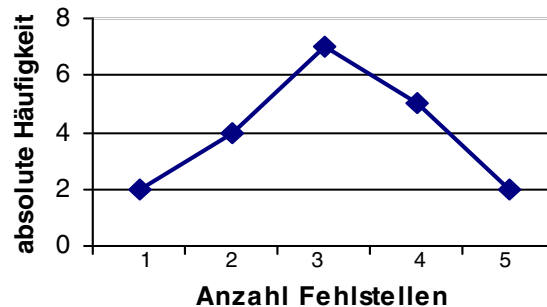
Dieses Diagramm verdeutlicht die Häufigkeit der jeweiligen Klasse als Sektor eines Kreises.



**Abbildung 135: Kreisdiagramm**

### Häufigkeitspolynom

Durch das Verbinden der einzelnen Höchstwerte des Säulendiagramms entsteht ein Häufigkeitspolynom.



**Abbildung 136: Häufigkeitspolynom**

### **8.2.5. Lageparameter statischer Häufigkeitsverteilungen**

Häufigkeitstabellen oder Verteilungen geben ein vollständiges Bild des Ergebnisses einer statistischen Untersuchung wieder. Anhand von wenigen, jedoch charakteristischen Zahlenwerten, sogenannten statistischen Maßzahlen oder Lageparametern, ist es möglich verschiedene Häufigkeitsverteilungen gleichzeitig zu betrachten und diese miteinander zu vergleichen.

Ein wichtiger kennzeichnender Lageparameter für das Ergebnis statistischer Untersuchungen ist der *Mittelwert* ( $\bar{x}$ ) bzw. der *arithmetische Mittelwert* ( $\bar{x}_{arithm}$ ). Sie werden wie folgt berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Ein weiterer wichtiger Lageparameter ist der *Median* oder auch Zentralwert genannt.

Zur Bestimmung des Median werden die Stichprobenwerte der Urliste zunächst ihrer Rangfolge nach geordnet. Danach wird der Stichprobenwert bestimmt, der bei dieser

Anordnung in der Mitte liegt. Bei einer ungeraden Anzahl von Werten ist der Median, der in der Mitte liegende Wert, bei einer geraden Anzahl das arithmetische Mittel der beiden Mittenwerte der Zentralwerte.

Beispiel:

Anzahl n	Werte aufsteigend geordnet	Median
<b>Ungerade Anzahl</b>	950 1200 1370 <b>1580</b> 1650 1800 6000	1580
<b>Gerade Anzahl</b>	950 1200 1370 <b>1580 1600</b> 1650 1800 6000	1590

Der Merkmalswert, der in einer Stichprobe am häufigsten vorkommt, heißt *Modalwert* oder Modus der Stichprobe.

Der Modalwert ist derjenige Merkmalswert, der am häufigsten vorkommt. Anwendung findet dieser bei nominal skalierten Größen, bei denen kein Mittelwert berechnet werden kann.

Beispiel:

Bei der Ermittlung der Häufigkeit von verschiedenen Gußfehlern ist nur eine Aussage bezüglich der größten Häufigkeit der unterschiedlichen Merkmalausprägungen möglich.

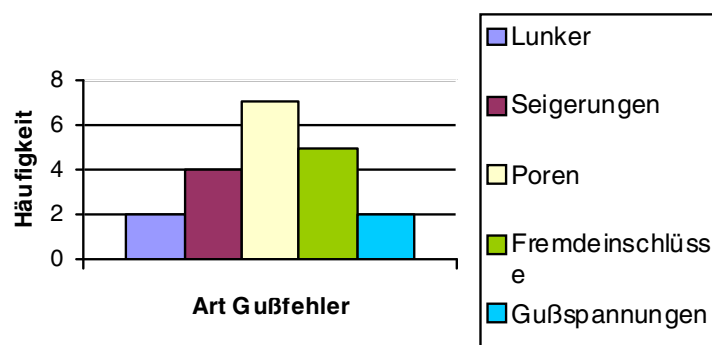


Abbildung 137: grafische Darstellung des Modalwerts

### 8.2.6. Streuungsparameter statischer Häufigkeitsverteilungen

In vielen Fällen ist es nicht ausreichend für die Verteilung einer Stichprobe nur den Mittelwert anzugeben.

Nur durch die Angabe eines Lageparameters ist nicht ersichtlich, ob der Beobachtungswert in der Nähe dieses Lageparameters liegt oder nicht. Daher besteht die Notwendigkeit der zusätzlichen Berechnung von Streuungsparametern.

Die *Spannweite (SP)* ist ein Streuungsparameter, welcher jedoch nur bedingt aussagekräftig ist, da bei der Berechnung „Ausreißer“ nicht beachtet werden.

$$SP = \max x_i - \min x_i$$

Die wichtigsten Streuungsparameter sind die *mittlere quadratische Abweichung* oder *Standardabweichung*.

Die mittlere quadratische Abweichung  $s^2$  ist das arithmetische Mittel der quadratischen Abstände aller Beobachtungswerte von  $\bar{x}$ . Die Standardabweichung  $s$  ergibt sich aus deren der positiven Wurzel.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$s = \sqrt{s^2}$$

### **8.3. Wahrscheinlichkeitsrechnung**

Wahrscheinlichkeit ist die Einstufung von Ereignissen nach der Gewissheit (zum Beispiel ihres Eintretens). Besondere Bedeutung hat dabei die Gewissheit von Vorhersagen.

### 8.3.1. Definition der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses

Für die Wahrscheinlichkeitsrechnung ist die numerische Wahrscheinlichkeit ein Maß der relativen Häufigkeit, mit der ein Ereignis vorkommt.

Die Wahrscheinlichkeit  $p(x_i)$  für ein Ereignis  $x_i$  ist festgelegt als.

$$p(x_i) = \frac{\text{Anzahl der Fälle bei denen das Ereignis } x_i \text{ aufgetreten ist}}{\text{Anzahl aller Fälle, die möglich sind}}$$

wobei gilt  $0 \leq p(x_i) \leq 1$

Ist  $p(x_i)$  die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis eintritt, dann ist  $q(x_i) = 1 - p(x_i)$ .

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis nicht eintritt, d.h. alle anderen möglichen Ereignisse außer dem Ergebnis  $x_i$  treten ein.

### 8.3.2. Aufgabe der Wahrscheinlichkeitsrechnung

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung ist ein Verfahren, das angibt, wie Wahrscheinlichkeiten berechnet werden können; insbesondere wie aus gegebenen Wahrscheinlichkeiten neue Wahrscheinlichkeiten zu berechnen sind.

Das Festsetzen der Wahrscheinlichkeit für die einzelnen möglichen Elementarereignisse, ist nicht Aufgabe der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Wahrscheinlichkeitsverteilungen können aufgrund empirischer Befunde, aus der Festlegung der Anzahl möglicher Ereignisse gewonnen oder aufgrund von theoretischen Annahmen festgesetzt werden. Erst danach erfolgt die Anwendung der Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf diese Ausgangswahrscheinlichkeit.

Eine spezielle Aufgabe der Wahrscheinlichkeitsrechnung ist es, aus einer Reihe vorliegender Messwerte abzuschätzen, welchen Vertrauensgrad die Aussage dieser Messung hat. Es wird dabei ermittelt, wie groß die Zuverlässigkeit der Messung war,

d.h. mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer Wiederholung der Messung ein Messwert in einem vorgegebenen Vertrauensintervall liegt.

### **8.3.3. Wahrscheinlichkeitsverteilungen**

Empirische Wahrscheinlichkeitsverteilungen, welche z.B. durch statistische Untersuchungen ermittelt wurden, können in Form und Gestalt sehr unterschiedlich aussehen. Es gibt jedoch eine Reihe von Fällen, in denen die Wahrscheinlichkeitsverteilung eindeutig bestimmt und für eine große Anzahl von Ereignissen dann auch als mathematisches Formel angegeben werden kann.

Nachfolgend wird auf die zwei möglichen Verteilungsarten, Gleichverteilung und Normalverteilung, genauer eingegangen.

#### Gleichverteilung

Eine stetige Gleichverteilung weißt für alle Zufallsvariablen  $X$  die gleiche Dichte auf.  $X$  ist dabei in einem Intervall mit den Grenzen  $a$  und  $b$  definiert. Die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die Zufallsvariable  $X$  im festgelegten Intervall liegt, wird ermittelt in dem die Fläche unter der Dichtefunktion zwischen den Grenzen berechnet wird.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , \text{ falls } a \leq x \leq b \\ 0 & \end{cases}$$

Für die Verteilungsfunktion gilt:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ falls } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & , \text{ falls } a \leq x \leq b \\ 1 & , \text{ falls } x > b \end{cases}$$

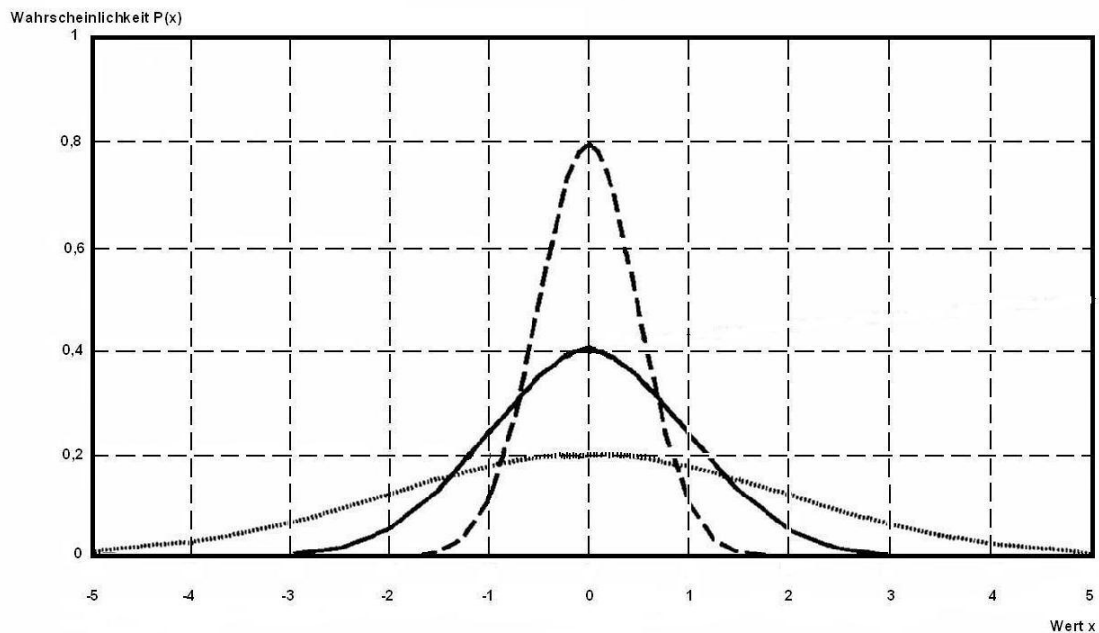
### Normalverteilung

Die wichtigste Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist die Normalverteilung oder Gauß'sche Verteilung. Vor allem bei der Abschätzung der Messwerten einer Messreihe, d.h. wie gut entspricht das Messergebnis der Stichprobe der Gesamtheit. Eine wesentliche Voraussetzung, dass diese Schätzung richtig ist, ist die Übereinstimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte mit der Normalverteilung.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Eine Zufallsvariable  $x$  heißt normalverteilt mit dem Erwartungswert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  wenn die obige Gleichung erfüllt ist.

Im nachfolgenden Bild sind Normalverteilungsfunktionen für den gleichen Erwartungswert  $\mu = 5$  aber verschiedene Standardabweichungen  $\sigma = 0,5$ ; 1 und 2 dargestellt.



**Abbildung 138: Normalverteilungsfunktion (Dichteverteilung)**

- $\sigma = 0,5$
- $\sigma = 1$
- .....  $\sigma = 2$

Die Normalverteilungsfunktion ist symmetrisch zum Erwartungswert  $\mu$  und um so schmaler und höher, je kleiner die Standardabweichung  $\sigma$  ist.

Bei einer genügend großen Anzahl von Messwerten beschreibt die Normalverteilung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der unterschiedlichen Werte einer Messreihe. Der „wahrscheinlichste“ Wert ist der Erwartungswert. Abweichungen vom Erwartungswert beruhen auf zufälligen Fehlern und können bei jeder Messung auftreten. Da negative und positive Messfehler gleich wahrscheinlich sind, muss die Verteilungsfunktion symmetrisch sein. Je größer die Abweichung eines Wertes vom Erwartungswert ist, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Wert bei einer Messung auftritt. Die Normalverteilungsfunktion ist so definiert, dass die Größe der Gesamtfläche unterhalb der Kurve und oberhalb der x-Achse immer den Wert 1 hat.

Die Normalverteilungsfunktion gibt für einen gegebenen Erwartungswert  $\mu$  und eine Standardabweichung  $\sigma$  an, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $p(x)$  ein bestimmter Wert  $x$  auftritt, wenn eine genügende Anzahl von Messungen durchgeführt wird.

Reale Verteilungen für Messwerte entsprechen um so besser der Normalverteilung, je größer die Anzahl der Messwerte ist. Mit wachsender Anzahl der Messwerte entspricht der arithmetische Mittelwert immer besser dem Erwartungswert und die empirische Standardabweichung derjenigen der Normalverteilung.

### Abschätzung von Vertrauensgrenzen

Aus den Werten  $x_i$  mit  $i=1, \dots, n$  einer Zufallsstichprobe ist das arithmetische Mittel  $x_m$  ein Schätzwert für den Erwartungswert  $\mu$  und die Streuung  $s$  ein Schätzwert für die Standardabweichung  $\sigma$ .

Die Schätzwerte werden im allgemeinen von den wirklichen Werten abweichen. Handelt es sich um einen großen Stichprobenumfang  $n$ , ist mit einer kleinen Abweichung zu rechnen.

Zu beantworten ist nun die Frage mit welcher Zuverlässigkeit  $\gamma < 1$  ein Schätzwert in einem Intervall  $x_u = x_m - c \leq \mu \leq x_m + c$  liegt.

Bei der Normalverteilung ist die Fläche zwischen den Intervallsgrenzen die Zuverlässigkeit  $\gamma$  und die beiden Flächen außerhalb des Intervalls entsprechen je  $\frac{\alpha}{2} = \frac{1-\gamma}{2}$

Für die verschiedenen Aufgabenstellungen zur Parameterschätzung gibt es Tabellen, aus denen bei vorgegebenen Konfidenzniveau  $\gamma$ -Zahlen Werte für  $c$  entnommen werden können.

Unter Konfidenzniveau ist die Wahrscheinlichkeit zu verstehen, mit der ein potentieller Fehler in einem bestimmten Intervall zu erwarten ist.

Für die Normalverteilung gilt:

$$\Phi(c) = \frac{1+\gamma}{2}$$

Der c-Wert wird auch als  $\frac{1+\gamma}{2}$  - Quantil der Normalverteilung bezeichnet.

Für die Quantil-Werte verschiedener Verteilungen gibt es ebenfalls Tabellen, aus denen sie entnommen werden können. Je nach Anwendungsfall müssen die entsprechenden Verteilungsfunktion berücksichtigt werden.

#### Beispiel

Gegeben: Normalverteilung

Konfidenzniveau  $\gamma = 0,95$

somit ergibt sich für  $q = \frac{(1+\gamma)}{2} = 0,975$

laut Tabelle entspricht dies einem c-Wert von 1,96.

#### Quantile der Normalverteilung

$\gamma$	$Q=(1+\gamma)/2$	c(q)
0	0,5	0
0,2	0,6	0,25
0,4	0,7	0,52
0,6	0,8	0,84
0,7	0,85	1,04
0,8	0,9	1,28
0,85	0,925	1,44
0,9	0,95	1,65
0,95	0,975	1,96
0,96	0,98	2,05
0,98	0,99	2,33
0,99	0,995	2,58
1	1	3,09

## **8.4. Anwendungen aus der Qualitätssicherung**

### **8.4.1. Zerstörungsfreie Prüfung**

Es besteht ein großes Interesse das Leistungsvermögen zerstörungsfreier Prüfverfahren eindeutig zu beschreiben und zu kennzeichnen.

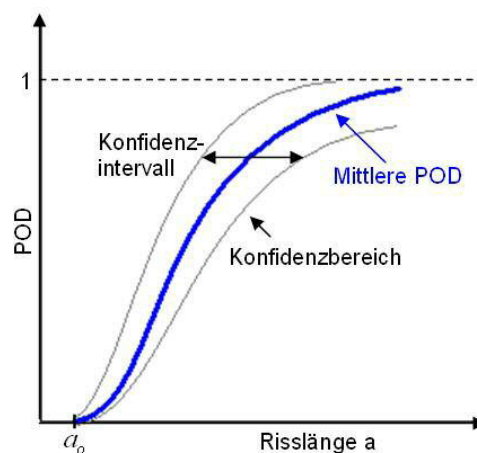
In diesem Zusammenhang wird oft nach dem kleinsten Fehler, der noch nachgewiesen werden kann, gefragt. Es ist möglich durch Steigerung der Prüfempfindlichkeit die „Nachweisgrenze“, zur Detektion von sehr kleinen Fehlergrößen, zu erhöhen. Mit der Empfindlichkeitssteigerung ist aber der Effekt verbunden, dass es auch auf fehlerfreien Bereichen zu Anzeigen kommt.

Für zerstörungsfreie Prüfverfahren in der Luftfahrt ist nicht wichtig, den kleinsten Fehler zu finden, sondern mit einer möglichst hohen Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Fehlergröße nachweisen zu können.

### **8.4.2. POD-Kurve**

Das Leistungsvermögen eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens wird durch eine Probability of Detection – Kurve (POD-Kurve) beschrieben.

Die POD-Kurve zeigt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit, bei der Prüfung einer bestimmten Fehlergröße, eine Anzeige zu erwarten ist. Diese Wahrscheinlichkeit bezeichnet man als Findungsrate.



**Abbildung 139: POD-Kurve**

Die Auffindwahrscheinlichkeit eines Fehlers ist von dessen Größe abhängig. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, ist die Findungsrate bei kleinen Fehlern gering, sie steigt aber mit zunehmender Fehlergröße an und erreicht für große Fehler annähernd den Wert 1.

Der POD- Kurvenverlauf ergibt sich nach der Übertragung mehrfacher Prüfergebnisse für verschiedene Fehlergrößen in das Diagramm.

Im Flugzeugbau wird für die Prüfung von sicherheitsrelevanten Bauteilen eine Findungsrate, die größer als 90% gefordert bei einer statistischen Sicherheit, ist eine Rate von größer als 95% notwendig.

### **8.4.3. ROC-Kurve**

Eine andere Möglichkeit das Leistungsvermögen eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zu beschreiben, ist die Receiver Operating Characteristic – Kurve (ROC-Kurve). Das Konzept der ROC-Kurve wurde aus der allgemeinen Theorie der Signalerkennung abgeleitet.

Für die zerstörungsfreie Prüfung gibt es zwei Prüfkörper-Zustände:

$Z_0$ : kein Fehler in der Prüfposition

$Z_f$ : Fehler in der Prüfposition

Die zerstörungsfreie Prüfung liefert für jede Prüfposition eine der folgenden Aussagen:

$A_n$ : Die Prüfanzeige ist negativ, d.h. es wird kein Fehler angezeigt

$A_p$ : Die Prüfanzeige ist positiv, d.h. es wird ein Fehler angezeigt

Für den Ausgang einer Prüfung gibt es also vier mögliche Ereignisse:

$E1 = [Z_0; A_n]$  kein Fehler und Anzeige negativ → keine Fehleranzeige

$E2 = [Z_0; A_p]$  kein Fehler und Anzeige positiv → Falschalarm

$E3 = [Z_f; A_n]$  Fehler und Anzeige negativ → keine Fehleranzeige

$E4 = [Z_f; A_p]$  Fehler und Anzeige positiv → Fehler wird angezeigt

Die für ein Prüfverfahren kennzeichnenden Ereignisse sind:

E2 = Falschalarm

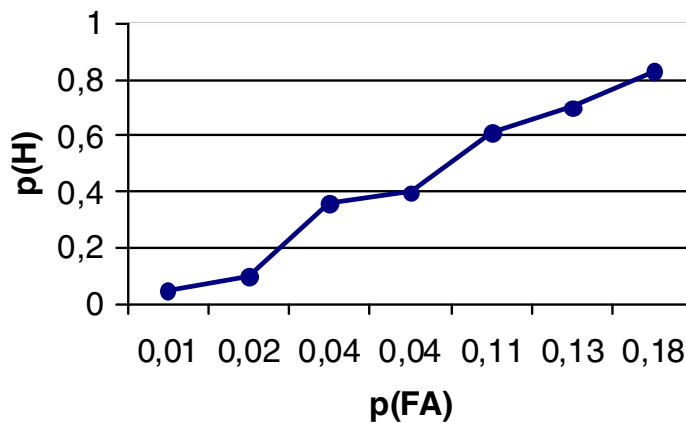
E4 = Fehlermeldung

bzw. die Wahrscheinlichkeiten:

$p(E2)=p(FA)$ : Falschalarm-Wahrscheinlichkeit

$p(E4)=p(H)$ : Fehleranzeige-Wahrscheinlichkeit.

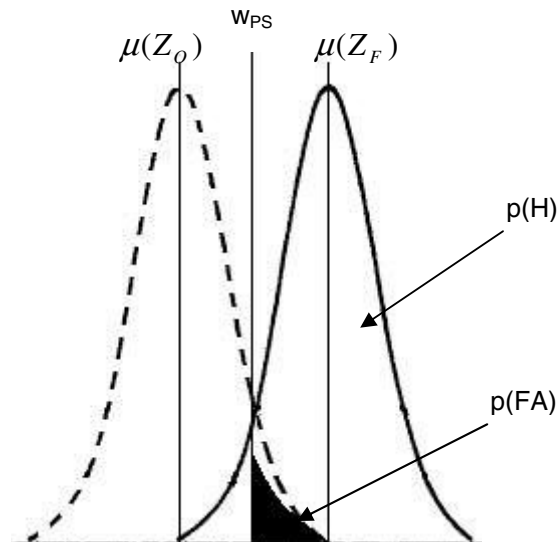
Die ROC-Kurve ist die grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit  $p(H)$  in Abhängigkeit von  $p(FA)$ .



**Abbildung 140: ROC-Kurve**

Das ROC-Kurvenkonzept beruht auf den folgenden Überlegungen:

Von einer fehlerfreien Prüfposition erhält man Signale mit einer Häufigkeitsverteilung  $\phi(Z_0)$  um einen Erwartungswert  $\mu(Z_0)$ . Bei Prüfposition, die einen Fehler signalisieren, ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung  $\phi(Z_F)$  um einen Erwartungswert  $\mu(Z_F)$ .



**Abbildung 141: ROC-Kurvenkonzept**

Für Signale  $w > w_{ps}$  ( $w_{ps}$  = Signal-Schwellwert) ist die Fläche unter der Kurve  $\phi(Z_0)$  die Falschalarmwahrscheinlichkeit  $p(FA)$  und die Fläche unter der Kurve  $\phi(Z_F)$  die Findungswahrscheinlichkeit  $p(H)$ . Je weiter die Erwartungswerte  $\mu(Z_0)$  und  $\mu(Z_F)$  auseinander liegen und je geringer die Streuungen der Signale,  $\sigma(Z_0)$  und  $\sigma(Z_F)$ , um den Erwartungswert sind, desto besser ist die Signaltrennung für Fehler und fehlerfreie Prüfpositionen.

Je besser die Fehleranzeigen von Anzeigen fehlerfreier Bereiche getrennt werden, d.h. je weiter die Erwartungswerte dieser Anzeigen auseinander liegen, desto besser ist das Prüfverfahren.

Quellenangaben:

G. Bamberg, F. Baur, M. Krapp: Statistik, Oldenbourg Verlag, 14. Auflage, 2008

<http://www.mathe-lexikon.at/statistik/lagemasse.html>

<http://www.mathe-lexikon.at/statistik/streuungsmaasse.html>

<http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/v29/v29.htm>

<http://www.ndt.net/article/bau-zfp2008/Inhalt/v01.pdf>