

Basics für Level III

(Luft- und Raumfahrt)

VORBEREITUNGSSEMINAR

&

GRUNDLAGEN

Version 2.0

Autor:

Stefan Neuhäusler

Vorwort

Alle Personen, die zerstörungsfreie Prüfungen im Luft- und Raumfahrtbereich durchführen, müssen qualifiziert und zugelassen sein in Übereinstimmung mit NAS410 bzw. EN 4179. Personal, das die einzelnen Prozessschritte durchführt, muss sich mindestens im Level 1 qualifiziert haben. Personen die Entscheidungen treffen über die Zulässigkeit von Anzeigen, müssen mindestens eine Qualifikation im Level 2 des jeweiligen Prüfverfahren haben.

Die Anforderungen an den „Level III“ sind deutlich höher.

Personal der Stufe 3 muss gem. EN 4179

- die praktischen Fähigkeiten und Kenntnisse besitzen, um die Leitlinien, Normen sowie die weiteren Vertragsunterlagen, die dem vom Arbeitgeber angewendeten ZfP-Verfahren zugrunde liegen, umzusetzen.
- in der Lage sein, die technische Verantwortung für die ZfP-Einrichtung und das -Personal zu übernehmen.
- in der Lage sein, das Prüfverfahren und die Prüftechnik für eine bestimmte Prüfung zu wählen.
- in der Lage sein, die Zweckdienlichkeit von Verfahrensweisen in dem Verfahren sicherzustellen und zu überprüfen, für das die Zulassung erfolgt.
- ZfP-Verfahren und andere ZfP-bezogene Arbeitsanweisungen aufgrund ihrer technischen Zweckmäßigkeit in dem Verfahren genehmigen, für das die Zulassung erfolgt.
- allgemeine Kenntnisse besitzen über weitere ZfP-Verfahren und Produkttechnologien des Arbeitgebers.
- in der Lage sein, die Ausbildung, Prüfung und Zulassung von Personal in dem Verfahren, für das es zugelassen ist, durchzuführen oder zu leiten.
- die ZfP für die Annahme von Teilen nur durchzuführen, falls ein Nachweis der entsprechenden Befähigung in der praktischen Prüfung enthalten war.
- sofern in der Zulassungsvorschrift festgelegt, in der Lage sein, externe Vertragsstellen zu auditieren, um sicherzustellen, dass die Anforderungen der Zulassungsvorschrift erfüllt sind.

Neben der fachlichen Qualifikation im Prüfverfahren werden zusätzliche Kenntnisse vorausgesetzt. Diese sogenannten Basics für Level III (Luft- und Raumfahrt) beinhalten unter anderem die Grundlagen der Werkstoffkunde, Fertigungsverfahren, zerstörungsfreie Prüfverfahren, Oberflächenbehandlung, zerstörende Prüfverfahren, Betriebsfestigkeit, Vorschriften und Wahrscheinlichkeitsbetrachtung.

Diese Grundkenntnisse sind nötig, um den Anforderungen, welche an einen Level III (Luft- und Raumfahrt) gestellt sind, gerecht zu werden.

Die Ausarbeitung der Basics für Level III (Luft- und Raumfahrt) wäre ohne die engagierte Mitarbeit meiner Kolleginnen und Kollegen, die ausgewiesene Experten im jeweiligen Fachgebiet sind, nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt folgenden Kolleginnen und Kollegen (in alphabetischer Reihenfolge):

- Dr. Joachim Bamberg (Wirbelstromverfahren, Ultraschall)
- Dr. Hans-Uwe Baron (EN4179, Korrekturlesen)
- Dr. Andreas Baus (Nieten und Schrauben)
- Thomas Brendel (Dynamische Prüfverfahren, Bruchmechanik)
- Werner Buchmann (Schmieden)
- Jürgen Burchards (FPI, ET)
- Heinz Camastral (Gießen, HIP)
- Bernd Daniels (Löten)
- Dr. Johanna Farnhammer (Ultraschall)
- Martin Fessler-Knobel (Kleben)
- Benjamin Henkel (Magnetpulververfahren; Röntgen)
- Dr. Falko Heutling (metallische Werkstoffe, Billetherstellung)
- Dr. Manuel Hertter (Schichten und Schichtsysteme)
- Dr. Marco Hüller (Werkstofftechnik, Titan)
- Dr. Ulrich Knott (Löten)
- Astrid Kraus (Betriebsfestigkeit)
- Ralph Kropp (Schweißen)
- Ernst Rau (UT)
- Wilhelm Satzger (Shearografie)
- Michaela Schnell (Recherche und Skript)
- Robert Schuster (FPI)
- Siegfried Sikorski (Faserverbundwerkstoffe, Prüfung Klebeverbindung)
- Katrin Taubenberger (Korrekturlesen)
- Robert Wege (Gießen)
- Gerhard Westenrieder (Schweißen)
- Katharina Wolf (Recherche und Skript)
- Herbert Zisik (Sichtprüfen)

München, März 2019

Stefan Neuhäusler

Inhaltsverzeichnis

1. Metallische Werkstoffe	25
1.1. Einführung in die Metallkunde	25
1.2. Festigkeitssteigerung	25
Kaltverfestigung	25
Legierungen	26
Dispersionshärtung	26
Umwandlungshärtung	26
1.3. Elektrische Leitfähigkeit.....	27
1.4. Werkstoffauswahl.....	28
Funktion eines Werkstoffes	29
Werkstoffkosten	30
1.5. Hauptsächlich verwendete Flugzeugwerkstoffe	30
Aluminium und -legierungen.....	31
Titan und -legierungen	32
Stahl und Nickel sowie dessen Legierungen.....	33
1.6. Wichtige Werkstoffbezeichnungen am Beispiel: Triebwerksbau	34
2. Fertigungsverfahren	36
2.1. Gießen	36
2.1.1.Übersicht der Werkstoffgruppen	36

2.1.2. Gießverfahren	37
Sandgießen	38
Feinguss	39
Titanfeinguss inklusive HIP (Hot isostatic pressing)	39
Kokillenguss	40
Druckguss	41
2.1.3. Gussfehler und geeignete Prüfverfahren	41
Lunker	42
Seigerungen	42
Gussspannungen	42
Gasblasen	42
Schlackeneinschlüsse	42
Keramische Einschlüsse	43
2.1.4. Anwendungen im Triebwerksbau	43
2.2. Schmieden	45
2.2.1. Grundlagen	45
2.2.2. Warm-, Halbwarm- und Kaltschmieden	45
Warmschmieden	45
Halbwarm Schmieden	45
Kaltschmieden	45
2.2.3. Freiformen	46
2.2.4. Gesenkformen	46
2.2.5. Schmiedefehler und geeignete Prüfverfahren	46
Schmiedeüberlappung	46

Kernzerschmieden/ Schmiederisse	47
2.2.6.Vor- und Nachteile des Schmiedens.....	47
Vorteile:	47
Nachteile:	47
2.2.7.Anwendungen im Triebwerksbau.....	48
2.3. Faserverbundwerkstoffe	50
2.3.1.Grundlagen.....	50
2.3.2.Matrixsysteme.....	51
Epoxidharze (EP-Harze)	51
Phenolharze	51
Thermoplaste	51
2.3.3.Fasern.....	52
2.3.4.Halbzeuge.....	53
UD -Tape.....	53
Gewebe Prepreg	54
Trockene Faserhalbzeuge.....	54
2.3.5.Bauweisen	54
Monolithische Bauteile	54
Kernverbund- oder Sandwichbauteile	54
Integrale und differentielle Bauweisen.....	55
Grundsätzlicher Fertigungsablauf	56
Prozessparameter für die Aushärtung.....	56
Resin Transfer Molding (RTM)	58
Resin Infusion (RI).....	58

2.3.6. Prüfung von Kernverbunden	59
Wabenzugversuch.....	59
Wabendruckversuch.....	59
Biegeversuch	59
Plattenscherversuch.....	59
Trommelschälversuch	59
Druckversuch senkrecht zur Wabe.....	59
2.3.7. Anwendungen in der Luftfahrt.....	60
2.4. Billetherstellung von Titan und Titanlegierungen.....	62
2.4.1. Grundlagen	62
2.4.2. Herstellung von Titanschwamm.....	63
2.4.3. Herstellung von Titaningot	64
Vakuumlichtbogenofen (VAR).....	65
2.4.4. Herstellung von Titanbillet.....	68
2.4.5. Fehler und geeignete Prüfverfahren	69
2.4.6. Anwendungen im Triebwerksbau.....	69
2.5. Schweißen	71
2.5.1. Grundlagen	71
2.5.2. Schweißverfahren	71
Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)	72
Elektronenstrahlschweißen	72
Laserstrahlschweißen (LA).....	73
Widerstands- Punktschweißen (RP).....	74
Widerstands- Rollennahtschweißen (RR)	75

Reibschweißen.....	76
2.5.3.Probleme beim Schweißen der unterschiedlichen Werkstoffe	77
Aluminium	77
Titan und –Legierungen	77
Stähle.....	78
Nickel	78
2.5.4.Geeignete Prüfverfahren.....	79
2.5.5.Vor- und Nachteile des Schweißens	79
2.5.6.Anwendungen in der Luftfahrt.....	80
2.6. Lötten	82
2.6.1.Grundlagen	82
2.6.2.Lötverfahren.....	84
Flammlöten	84
Induktionslöten.....	85
Ofenlöten.....	85
Hochtemperaturlöten.....	86
2.6.3.Reparatur und Prüfung	86
2.6.4.Vor- und Nachteile des Lötens.....	87
2.6.5.Anwendungen im Triebwerksbau.....	87
2.7. Kleben	89
2.7.1.Grundlagen	89
2.7.2.Klebstoffarten.....	89
2.7.3.Klebefehler.....	90
2.7.4.Prüfung der Fügeverbindung	90

2.7.5.Vor- und Nachteile	90
2.7.6.Anwendungsbeispiele in der Luftfahrt	91
2.8. Niete und Schrauben.....	93
2.8.1.Grundlagen	93
2.8.2.Nieten	93
2.8.3.Nietarten	94
Passniet	95
Blindniet	96
Stanzniet	96
2.8.4.Nietfehler und geeignete Prüfverfahren	98
2.8.5.Nietanwendungen in der Luftfahrt.....	99
2.8.6.Schrauben und Muttern	99
2.8.7.Schrauben- und Mutterarten	100
Passschraube	100
Kopfschrauben	100
Schaftschrauben	101
2.8.8.Prüfung von Schraubverbindungen	102
2.8.9.Schraubanwendungen im Triebwerksbau.....	102
3. Zerstörungsfreie Prüfverfahren	105
3.1. Thermografie.....	105
3.1.1.Historie.....	105
3.1.2.Grundlagen	106
Elektromagnetische Strahlung	106
Emissions-Koeffizient	106

3.1.3. Passive und aktive Thermografie	108
Passive Thermografie	108
Aktive Thermografie	108
3.1.4. Thermografieverfahren	109
Impuls-Thermografie	109
Induktions-Thermografie	112
Ultraschall-Thermografie (SonoTherm)	113
3.1.5. Vor- und Nachteile der Thermografie	114
3.2. Ultraschall	116
3.2.1. Historie	116
3.2.2. Grundlagen	116
Piezoeffekt	116
Ultraschallwellen	117
3.2.3. Ultraschallprüfverfahren	119
Durchschallungsverfahren	119
Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren	120
3.2.4. Methoden zur Anzeigen-Bewertung	122
Vergleichskörper-Methode	122
Bezugslinien-Methode	122
3.2.5. Anwendungen im Triebwerksbau	122
3.3. Röntgen	124
3.3.1. Historie	124
3.3.2. Grundlagen	125
Röntgenstrahlen	125

Qualität und Intensität von Röntgenstrahlung	126
Wellenlänge und Energie	126
Intensität und Dosisleistung	127
Elektronenquelle und Target	127
Elektronenbeschleunigung	127
3.3.3.Absorptionsverhalten verschiedener Stoffe	128
Unterschiedliche Materialdicke.....	128
Unterschiedliche Materialien	128
Unterschiedliche Strahlqualität und gleiche Intensität	129
3.3.4.Röntgenprüfung von Festkörpern	130
3.3.5.Röntgenprüfung mit digitalen Detektoren.....	131
3.3.6.Streustrahlung	135
Innere Streuung	136
Seitenstreuung.....	136
Rückstreuung	137
3.3.7.Anwendungen im Triebwerksbau.....	137
3.4. Computertomographie (CT)	139
3.4.1.Historie.....	139
3.4.2.Grundlagen	139
Röntgenröhre	141
Detektoren.....	142
Szintillationskristall mit Photodiode	143
Objektmanipulator	144
Computergestützte Kontroll- und Auswertungssysteme.....	144

3.4.3.Prinzip der Computertomographie	145
Unterschied zwischen 2D und 3D CT:.....	149
3.4.4.Anwendungen im Triebwerksbau	149
3.5. Wirbelstromverfahren	151
3.5.1.Grundlagen	151
Elektrizität.....	151
Ohmsche Gesetz	152
Magnetismus.....	153
Magnetische Feldstärke eines stromdurchflossenen Leiters.....	154
Magnetische Feldstärke einer stromdurchflossenen Spule	154
Magnetischer Fluss	154
Magnetische Flussdichte	155
Magnetische Flussdichte einer Luftspule	155
3.5.2.Induktionsgesetz.....	155
3.5.3.Wechselstromwiderstand und Induktivität einer Spule	156
3.5.4.Eindringtiefe	156
3.5.5.Wirbelstromprüfverfahren	157
Werkstoff und Frequenz.....	158
Justierung.....	159
Kanteneffekt	159
3.5.6.Verwendete Spulsysteme	159
3.5.7.Prüfgerät	162
3.5.8.Anwendungen im Flugzeugbau	163
3.6. Magnetpulververfahren	165

3.6.1.Historie.....	165
3.6.2.Grundlagen	165
Erzeugung eines Magnetfeldes	166
Permeabilität	167
3.6.3.Prüfmittel.....	167
Nassprüfung:.....	168
Trockenprüfung:.....	168
Magnetpulver	168
3.6.4.Magnetpulverprüfverfahren.....	169
Kontinuierliches Verfahren	169
Restfeldverfahren	170
3.6.5.Magnetisierungsmethoden.....	170
Jochmagnetisierung	171
Magnetisierung mit stromdurchflossenem Leiter	171
Magnetisierung mittels Stromdurchflutung	174
3.6.6.Auswertung.....	175
3.6.7.Entmagnetisierung	175
Eindringprüfung.....	177
3.6.8.Grundlagen	177
3.6.9.Verfahrensabläufe der FPI.....	177
Vorreinigung.....	177
Eindringvorgang	178
Zwischenreinigung	178
Trocknung.....	179

Aufbringen des Entwicklers	179
Nachreinigung	179
3.6.10. Entwicklung und Auswertung/Anzeige	179
Entwicklung	179
Auswertung/Anzeige	180
3.6.11. Prüfmittelsysteme	181
3.6.12. Eigenschaften der Prüfmittel	181
3.6.13. Anwendungen im Triebwerksbau	182
3.7. Shearografie	184
3.7.1. Geschichte	184
Entwicklung der digitalen Shearografie	184
3.7.2. Grundlagen	184
3.7.3. Verfahrensablauf	185
Untersuchungsbedingungen	187
3.7.4. Vor- und Nachteile der Shearografie	187
3.7.5. Anwendungen in der Luftfahrt	188
3.8. Sichtprüfung	190
3.8.1. Grundlagen	190
3.8.2. Allgemeine und spezielle Sichtprüfung	190
Allgemeine Sichtprüfung	190
Spezielle Sichtprüfung	191
3.8.3. Arbeitstechnik der Sichtprüfung	191
Vorbereitung der Oberfläche	192
Reinigung	192

3.8.4.Hilfsmittel	193
3.8.5.Anwendungen im Triebwerksbau	193
4. Oberflächenbehandlung	195
4.1. Allgemeines.....	195
4.2. Beschichtungen im Triebwerksbau.....	196
4.2.1.Oxidationsschutzschichten	196
4.2.2.Heißgaskorrosionsschutzschichten.....	197
4.2.3.Wärmedämmschichten	198
4.3. Geeignete Prüfverfahren	200
5. Zerstörende Prüfverfahren	201
5.1. Grundlagen	201
5.2. Beanspruchungsarten	202
5.3. Verformung von Metallen, Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen ...	203
Metalle.....	203
Kunststoffe	204
Faserverbundwerkstoffe.....	204
5.4. Statische Prüfverfahren	206
5.4.1.Zugprüfung	206
Metall.....	206
Einflussgrößen auf die mechanischen Kennwerte	208
Kunststoff	209
Faserverbundwerkstoffe.....	209
5.4.2.Druckprüfung	210
5.4.3.Biegeversuch und Torsion	212

5.4.4. Zeitstand	214
5.5. Härteprüfung	216
5.5.1. Härteprüfung nach Brinell	216
5.5.2. Härteprüfung nach Vickers	217
5.5.3. Härteprüfung nach Rockwell	218
5.5.4. Härteprüfung nach Shore	218
5.6. Dynamische Prüfung	220
5.6.1. Dauerschwingfestigkeit	221
Das Wöhler-Diagramm	223
Das Haigh-Diagramm	225
5.6.2. Betriebsfestigkeitsprüfung	226
Blockprogrammversuch	227
Betriebslastenversuche	227
5.7. Bruchmechanik	229
5.7.1. Risslängenmessmethode	230
Compliance Methode	231
Optische Methode	231
Potentialmethode	231
5.7.2. Risszähigkeitsversuch	232
5.7.3. Rissfortschrittsuntersuchungen	234
5.7.4. Bruchmechanische Zeitstandversuche	235
5.7.5. Bruchmechanik bei Faserverbundwerkstoffen	236
Double Cantilever Beam Probe (DCB-Probe)	236
End Notched Flexure Probe (ENF-Probe)	236

5.8. Prüfung von Klebeverbindungen	237
5.8.1.Zugscherversuch	238
Standardprobe	238
Blister Detection-Probe	238
5.8.2.Scherversuch	238
Kurzbiegeversuch	239
5.8.3.Schälversuch	239
6. Betriebsfestigkeit	244
6.1. Begriffe der Betriebsfestigkeit	244
6.2. Vorschriften zur Betriebsfestigkeit	246
6.3. Konstruktionsprinzip	246
6.3.1.Konstruktionsprinzip „safe life“ und „fail safe“	247
6.3.2.Konstruktionsprinzip „damage tolerance“	248
Einfacher Lastpfad	249
Mehrfacher Lastpfad	249
6.4. Strukturinspektionen.....	251
6.4.1.Erstellung eines Wartungsprogramms	251
6.4.2.Ermittlung der erforderlichen Strukturinspektionen	252
6.4.3.Ermittlung der detektierbaren Risslänge	254
6.5. Erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden - Beispiele	256
Rumpfstruktur.....	256
Flügelstruktur	257
7. Aufbau einer „Written Practice“ (Zulassungsvorschrift).....	259
7.1. Allgemeines.....	259

7.2. Qualifikationsstufen	259
7.3. Pflichten und Verantwortung des Personals.....	260
7.4. Ausbildungsprogramm	261
7.5. Anforderungen an die Erfahrung	261
7.6. Prüfungsordnung.....	262
7.7. Aufzeichnungen und Abwicklung.....	262
7.8. Anforderungen an die Erneuerung bzw. Verlängerung der Zulassung.....	262
8. Fehlerauffindwahrscheinlichkeit POD (Probability of Detection)	264
8.1. Begriff POD	265
8.2. Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung.....	266
8.3. Durchführung der POD-Bestimmung.....	270
8.4. Methoden zur POD-Ermittlung	271
8.4.1.Hit / Miss Methode	271
8.4.2.29 / 29 Methode.....	272
8.4.3.â über a – Methode.....	273
8.5. Referenzkörper / Referenzfehler	275
8.6. POD für die Lebensdauerberechnung.....	276
8.7. Durchführung einer POD-Studie	278

Abbildung 1: Eisen-Kohlenstoff- Diagramm [1].....	27
Abbildung 2: Anordnung der äußeren Energiebänder	28
Abbildung 3: Werkstoffauswahl	29
Abbildung 4: Werkstoffeinsatz im Triebwerk [2].....	31
Abbildung 5: Übersicht über die Werkstoffgruppen	36
Abbildung 6: Übersicht der Gießverfahren.....	37
Abbildung 7: Grafische Darstellung des Sandgießens [1]	38
Abbildung 8: Gegossene Laufschaufeln [2]	43
Abbildung 9: Geschmiedetes Gehäuse und Dichtring	48
Abbildung 10: Sandwichstruktur in Differential- und Integralbauweise [1]	56
Abbildung 11: Faserverbundbauteile am A380 [2].....	60
Abbildung 12: GE90 Fan-Schaufel, FVK-Schaufelblatt mit Ti-Vorderkante [3].....	61
Abbildung 13: Verteilung der globalen Vorkommen von TiO ₂ [1].....	62
Abbildung 14: Erweiterter Kroll-Prozess zur Herstellung von Titanschwamm	63
Abbildung 15: Titanschwammkuchen [2] und zerkleinerter Titanschwamm [3]	64
Abbildung 16: Prinzipskizze eines Vakuumlichtbogenofens	66
Abbildung 17: Prinzipskizze eines "Cold-Hearth-Melters"-Prozesses [4].....	67
Abbildung 18: Prinzipskizze eines "Skull-Melters"-Prozesses [5]	67
Abbildung 19: schematische Darstellung des Herstellungsprozess vom Ingot zum Billet [6].....	68
Abbildung 20: Übersicht über die Schweißverfahren.....	71
Abbildung 21: WIG-Schweißen [1].....	72
Abbildung 22: Elektronenstrahlschweißen.....	73
Abbildung 23: Laserstrahlschweißen	74

Abbildung 24: Widerstands-Punktschweißen	75
Abbildung 25: Widerstands-Rollnahtschweißen	75
Abbildung 26: Reibschweißen [2]	76
Abbildung 27: Verdichter-Läufer (CF6 Stufe 3-9) [3]	80
Abbildung 28: Diffusionsvorgang während des Lötens [1]	82
Abbildung 29: [2].....	82
Abbildung 30: Solidustemperaturen.....	83
Abbildung 31: Benetzung des Grundwerkstoffes [3].....	83
Abbildung 32: Zusammengelötetes Leitschaufelsegment mit Waben [4]	88
Abbildung 33: Adhäsions- und Kohäsionskräfte bei einer Klebeverbindung [1].....	89
Abbildung 34: PW 4000 [2].....	91
Abbildung 35: Funktionsprinzip Nieten [1]	93
Abbildung 36: Stanzniet mit Vollniet (2 Vollniet mit Ringnut, 3 Fügeteil, 4 Matrize, 5 Nietstempel, 6 Niederhalter) [2]	97
Abbildung 37: Stanzniet mit Halbholniet (1 Halbholniet, 3 Fügeteil, 4 Matrize, 5 Nietstempel, 6 Niederhalter) [3]	98
Abbildung 38: Beschädigung der Bauteiloberfläche durch falsches Nieten [4]	98
Abbildung 39: genormte Schraubenkopfformen [5]	101
Abbildung 40: Faserverlauf im Schraubenkopf [6]	101
Abbildung 41: Schraube-Mutter-Verbindung [8].....	103
Abbildung 42: Elektromagnetisches Spektrum	106
Abbildung 43: Bild warmer Heizkörper - Thermogramm	107
Abbildung 44: Messanordnung einer passiven Thermografie [2].....	108
Abbildung 45: Messanordnung einer aktiven Thermografie	109

Abbildung 46: links- hohlgegossene Turbinenschaufel, rechts- qualitatives Wanddickenbild	109
Abbildung 47: Thermografie System	110
Abbildung 48: Temperatur- Zeitverlauf bei einer Impulsthermografie	111
Abbildung 49: Thermografie System	112
Abbildung 50: Messanordnung einer Ultraschallthermografie	113
Abbildung 51: Messung der Schallgeschwindigkeit [1]	116
Abbildung 52: Direkter Piezoeffekt	117
Abbildung 53: Reziproker Piezoeffekt.....	117
Abbildung 54: Longitudinalwellen	118
Abbildung 55: Transversalwellen.....	118
Abbildung 56: Durchschallungstechnik.....	119
Abbildung 57: Impuls-Echo-Verfahren im Tauchbad	120
Abbildung 58: A-Bild [2]	120
Abbildung 59: Ableitung eines C-Bildes.....	121
Abbildung 60: Turbinenscheibe in Wasserbad	123
Abbildung 61: Wilhelm Conrad Röntgen [1].....	124
Abbildung 62: Abnahme der Intensität infolge zunehmender Materialdicke	128
Abbildung 63: Abnahme der Intensität bei gleicher Dicke aber unterschiedlichen Werkstoffen	129
Abbildung 64: Veränderung der Intensität bei Änderung der Energie.....	129
Abbildung 65: Schwächung von Röntgenstrahlung im Festkörper mit Fehlstelle ...	130
Abbildung 66: Funktionsablauf bei der Speicherfolientechnik	132
Abbildung 67: Direkte Umwandlung von Röntgenstrahlung in elektrische Signale.	133

Abbildung 68: Umwandlung der Röntgenstrahlung in sichtbares Licht mit einem Szintillator	134
Abbildung 69: Funktionsweise des digitalen Röntgenbildverstärker	135
Abbildung 70: Innere Streuung	136
Abbildung 71: Seitenstreuung.....	136
Abbildung 72: Rückstreuung.....	137
Abbildung 73: Prüfobjekt und Röntgenbild]	138
Abbildung 74: Geschweißte Rohrverbindung und Röntgenbild	138
Abbildung 75: Johan Radon [1]	139
Abbildung 76: Prinzip der medizinischen CT	140
Abbildung 77: Geometrische Vergrößerung und Unschärfe	141
Abbildung 78:.....	142
Abbildung 79: Prinzip der Szintillation	143
Abbildung 80: (a) CT einer Lunge, (b) CT eines Herzen	145
Abbildung 81: Schnitt eines Würfels	145
Abbildung 82: : Prinzip CT: Einstrahlung von links	146
Abbildung 83: Einstrahlung 45°	147
Abbildung 84: Prinzip CT: Einstrahlung von unten	147
Abbildung 85: Darstellbarkeit einer Probe in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchstrahlungen	148
Abbildung 86: CT-Schnitt durch eine Turbinenschaufel.....	150
Abbildung 87: Prinzip der Wirbelstromprüfung	158
Abbildung 88: (a) Fehlstelle in Feldrichtung, (b) Fehlstelle senkrecht zur Feldrichtung	166
Abbildung 89: Jochmagnetisierung.....	171

Abbildung 90: Längsmagnetisierung mit stromdurchflossener Spule	172
Abbildung 91: Längsmagnetisierung mit stromdurchflossener Spule (Hochstromkabel)	172
Abbildung 92: Flachspule	173
Abbildung 93: Klappspule	174
Abbildung 94: Gelötetes Leitschaukelsegment bei der Eindringprüfung	182
Abbildung 95: Aufbau eines Shearografie-Systems	185
Abbildung 96: Anzeige eines inneren Defekts in Form lokaler Verformungsinhomogenität [1].....	186
Abbildung 97: CFK-Tank als Prüfobjekt und das Ergebnis der Shearographie einer Delamination [3].....	189
Abbildung 98: (a) Kerbe, (b) Delle	194
Abbildung 99: links - Faser- bzw. Stabverbund, rechts - Fasermatten- bzw. Schichtverbund [5].....	204
Abbildung 100: Bruchbilder [2] links - zäher Werkstoff,	207
Abbildung 101: Wöhler-Diagramm.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 102: Wöhlerkurven vom Typ I und II	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 103: Haigh-Diagramm.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 104: Proben zur Rissfestigkeitsbestimmung.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 105: Kraft-Aufweitungsdiagramm eines Risszähigkeitsversuchs	234
Abbildung 106: Beispiel einer DCB-Probe	236
Abbildung 107: Beispiel einer ENF-Probe	236
Abbildung 108: Skizze Schäldiagramm	240
Abbildung 109: Kritische Risslänge an einem Flügel.....	248

Abbildung 110: Einfacher Lastpfad bei der schadenstoleranten Konstruktion	249
Abbildung 111: Mehrfacher Lastpfad bei der schadenstoleranten Konstruktion	250
Abbildung 112: Prozess zur Definition des Wartungsprogramms	252
Abbildung 113: Strukturinspektion-Programm	253
Abbildung 114: Ermittlung der Strukturinspektionen	254
Abbildung 115: Querstöße - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden	257
Abbildung 116: Flügelunterdecke - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden	257
Abbildung 117: Pylon - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden	258
Abbildung 118: Beispiel einer POD-Kurve	266
Abbildung 119: Normalverteilungsfunktion (Dichteverteilung)	268
Abbildung 120: Tabelle für die maximal übersehenen Fehler	273
Abbildung 121: \hat{a} über a-Diagramm und die daraus resultierende Dichtefunktion ..	275
Abbildung 122: Beispiel für \hat{a} über a Datenset	279
Abbildung 123: Mögliche Darstellungsarten der \hat{a} über a Daten	279
Abbildung 124: Regressionsgerade und Konfidenzintervall	281
Abbildung 125: POD-Kurve	281

1. Metallische Werkstoffe

1.1. Einführung in die Metallkunde

Stahl befindet sich seit über 3500 Jahren im Einsatz. Moderne metallische Werkstoffe wie Aluminium oder Titan werden erst seit dem 20-igsten Jahrhundert eingesetzt.

Die wichtigsten metallischen Werkstoffe im Flugzeugbau sind:

1. Aluminium und -legierungen
2. Titan und -legierungen
3. Stahl und dessen Legierungen
4. Nickel und dessen Legierungen (Triebwerk)

Erwünschte Eigenschaften der Werkstoffe sind im Allgemeinen:

- leicht, fest und nichttoxisch
- kostengünstig und gut beschaffbar
- korrosionsbeständig, leicht bearbeitbar

1.2. Festigkeitssteigerung

Metallische Werkstoffe werden aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit verwendet. Durch verschiedene Verfahren kann deren Festigkeit zusätzlich gesteigert werden. Zu den gängigsten Verfahren gehören:

Kaltverfestigung

Die bei der Kaltverformung auftretende Verfestigung ist darauf zurückzuführen, dass während des Umformvorganges neue Versetzungen erzeugt werden. Versetzungen sind linienförmige Baufehler des Gitters, welche sich an Hindernissen wie beispielsweise Korngrenzen und Einschlüssen im Gefüge aufstauen.

Die deutliche Festigkeitszunahme geht zu Lasten der Zähigkeit.

Legierungen

Reine Metalle sind meist sehr weich und besitzen eine geringe Festigkeit. Durch Legieren, das heißt durch Zusetzen von einem oder mehreren Elementen, können die Werkstoffeigenschaften von reinen Metallen gezielt beeinflusst werden.

Dispersionshärtung

Die Dispersionshärtung ist eine spezielle Form der Ausscheidungshärtung.

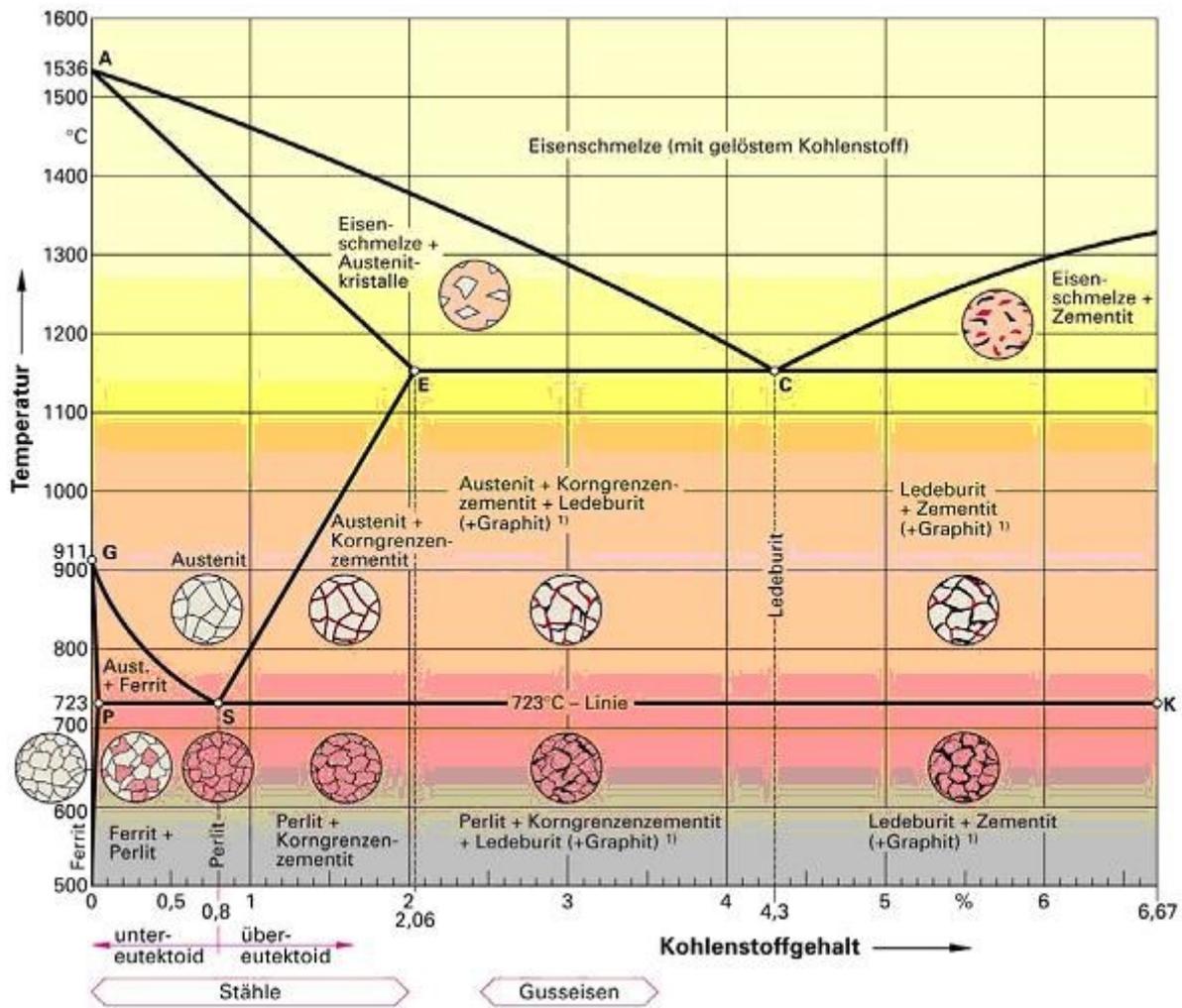
Durch Primärkristallisation, innere Oxidation und pulvermetallurgische Verfahren verteilen sich Dispersoide fein im Kristallgitter.

Umwandlungshärtung

Ein weiteres wichtiges Härtungsverfahren ist die Umwandlungshärtung. Hierbei wird das Werkstück soweit erwärmt, dass sich der bei Raumtemperatur vorliegende kubisch-raumzentrierte (krz) - Ferrit in kubisch-flächenzentriertes (kfz) - Austenit umwandelt. In der freiwerdenden Würfelmittle des kfz-Gitters lagert sich ein Kohlenstoffatom aus dem Zementit (Fe_3C) ein. Wird der kohlenstoffreichere Austenit abgeschreckt, so kann das Eisengitter aufgrund des „eingeklemmten“ Kohlenstoffatoms nicht mehr in das krz-Ferrit umgewandelt werden. Es entsteht ein tetragonal-verzerrtes Gitter, der sogenannte Martensit.

Bei der Umwandlungshärtung spielt die Temperaturdifferenz eine große Rolle. Je größer die Temperaturdifferenz, desto mehr Martensit wird gebildet.

Es können nur Stähle gehärtet werden, die mindestens 0,2% Kohlenstoff enthalten.



[© Verlag Europa-Lehrmittel]

Abbildung 1: Eisen-Kohlenstoff- Diagramm [1]

1.3. Elektrische Leitfähigkeit

Bei der Betrachtung eines einzelnen Atoms ist festzustellen, dass sich die Elektronen stets auf einem diskreten Energieniveau befinden. Die Annäherung von zwei Atomen bis auf einen bestimmten Abstand führt dazu, dass die Elektronen in den Wirkungsbereich des jeweils anderen Atomkerns geraten. Somit besitzt ein Elektron kein diskretes Energieniveau mehr, sondern es sind mehrere Energiezustände möglich. Es entstehen sogenannte Energiebänder. Für die elektrische Leitfähigkeit sind das Valenzband

und das Leitungsband, die zwei äußersten Energiebänder, entscheidend. Das Valenzband ist das letzte Band, das noch mit zwei Elektronen besetzt ist. Das Leitungsband ist ausschlaggebend für die elektrische Leitfähigkeit. Am besten ist die Leitfähigkeit, wenn dieses Band mit einem Elektron besetzt ist. Dies ist beispielsweise bei Kupfer und Silber der Fall. Ist hingegen das Leitungsband nicht mit Elektronen besetzt, handelt es sich um einen Isolator.

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt mit steigendem Verformungsgrad ab, da aufgrund der höheren Versetzungsdichte die Elektronen behindert werden.

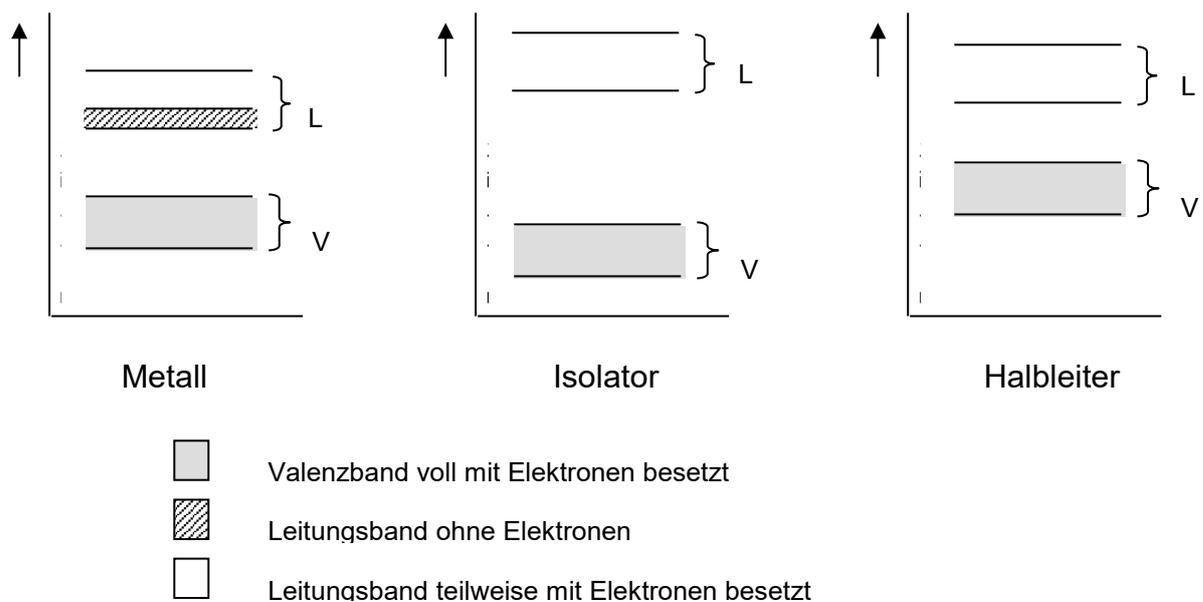


Abbildung 2: Anordnung der äußeren Energiebänder

1.4. Werkstoffauswahl

Die Werkstoffauswahl sollte der beste Kompromiss zwischen der Qualität des Werkstoffes und den Kosten sein.

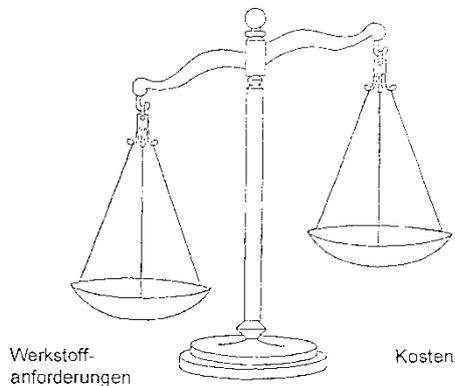


Abbildung 3: Werkstoffauswahl

Funktion eines Werkstoffes

Nachfolgende Werkstoffkennwerte sind vom Werkstoff-Hersteller garantierte Eigenschaften, die für die Auslegung des Bauteils von Bedeutung sind.

- Festigkeitswerte
- Steifigkeit
- Bruchzähigkeit
- Ermüdungsverhalten

Die Gebrauchseigenschaften eines Werkstoffes sind für den Flugzeugbetreiber von Bedeutung. Die relevanten Qualitäten sind Grundlage für die Konstruktion und Entwicklung bei der Zertifizierung des Flugzeuges bzw. der Triebwerke:

- Korrosionsbeständigkeit; insbesondere Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit
- Ermüdungsfestigkeit
- Inspektionshäufigkeit
- Reparatur und Wartung

Werkstoffkosten

Die Werkstoffauswahl ist Teil des Entwicklungsprozesses eines Flugzeuges und dessen Triebwerke. Diese Kosten lassen sich folgendermaßen aufteilen:

Der Preis des Flugzeuges bzw. der Triebwerke errechnet sich aus:

- Werkstoffkosten
- Fertigungskosten
- Entwicklungskosten für neue Technologien
- Verwaltung und Vertrieb

Für den Benutzer fallen folgende Kosten an:

- Transportkosten in Abhängigkeit vom Gewicht des Bauteils
- Reparatur- und Wartungskosten
- Lagerhaltungskosten

Aus dieser kurzen Aufstellung geht hervor, dass beispielsweise durch die Verwendung von teuren Werkstoffen der Gesamtpreis eines Triebwerks steigt. Die Folge daraus sollte jedoch sein, dass die Waage auf der Benutzerseite wieder ausgeglichen wird. Beispielsweise indem der teure Werkstoff eine bessere Qualität liefert und somit der Reparatur- und Wartungsaufwand gesenkt werden kann.

1.5. *Hauptsächlich verwendete Flugzeugwerkstoffe*

Im Wesentlichen werden in der Luftfahrt Aluminium, Titan, Stahl und Nickel, sowie deren Legierungen verwendet. Zu den neueren Werkstoffen zählen hierbei die Faserverbundwerkstoffe, z. B. CFK, GFK und GLARE. Auch die Bedeutung von intermetallischen Phasen, wie beispielsweise TiAl, nimmt aufgrund deren Vorteile gegenüber Titan immer mehr zu. Auf die Eigenschaften und Einsatz von Titan, -legierungen und deren intermetallischen Phasen wird in Kapitel 5 eingegangen.

Die nachfolgende Grafik gibt einen Überblick über die Verwendung der Werkstoffe im Triebwerk.

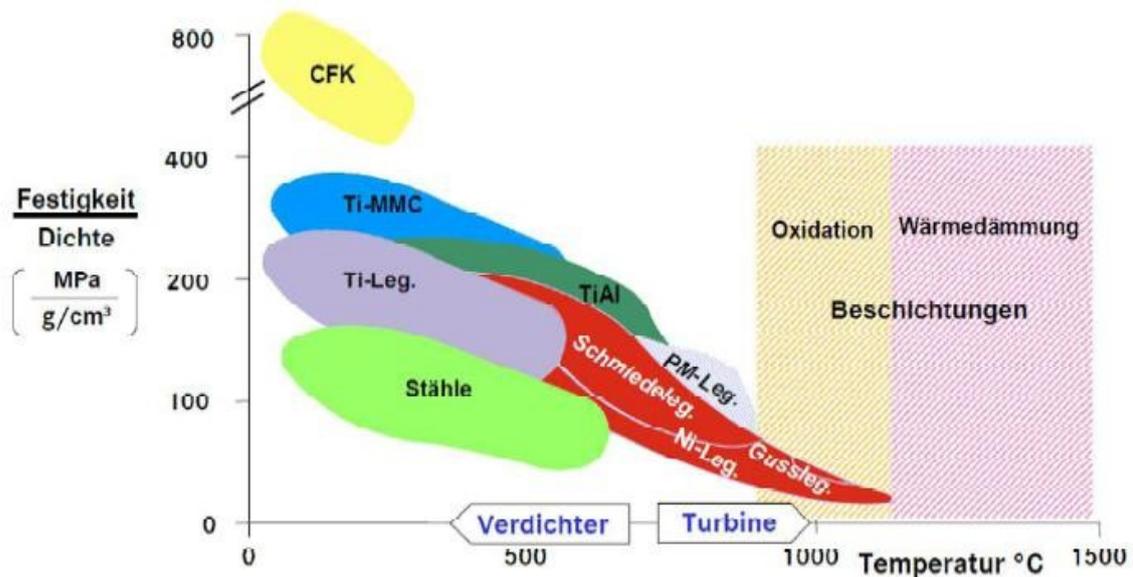


Abbildung 4: Werkstoffeinsatz im Triebwerk [2]

Aluminium und -legierungen

Wie schon erwähnt, sind reine Metalle, also auch Aluminium, sehr weich und haben eine geringe Festigkeit. Durch Zulegieren von Kupfer, Zink, Magnesium, Silizium oder Mangan, werden die Eigenschaften gegenüber dem reinen Aluminium wesentlich verbessert.

Eigenschaften

- + günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Dichte
- + korrosions- und witterungsbeständig
- + hohe elektrische Leitfähigkeit
- schwer schweißbar aufgrund der hohen Affinität zu Sauerstoff

Einsatzgebiete Flugzeugzelle

- Rumpf
- Außenhaut
- Anbauteile

- Innenausstattung

Einsatzgebiete Triebwerk

- Anbauteile
- Triebwerksgondel

Titan und -legierungen

Titan ist ein sehr junger Gebrauchswerkstoff. Erst in den 30er Jahren ist ein technischer Herstellungsprozess für Titan entwickelt worden. Brauchbare Titan-Legierungen gibt es seit ca. 1950.

Eigenschaften

- + geringe Dichte von $4,5\text{g/cm}^3$ (entspricht etwa 60% der Dichte von Stahl)
- + hohe spezifische Festigkeit im Vergleich zu Stahl
- + sehr gute Korrosionsbeständigkeit
- + gute Kompatibilität mit CFK
- relativ hoher Preis
- schwer umformbar bei Raumtemperatur
- höhere Zerspanungskosten als bei Aluminium
- Aufnahme von Gasen bei relativ niedrigen Temperaturen, d.h. ab ca. 450°C
- Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff bilden versprödende Gefügebereiche wie Oxide, Nitride oder auch Wasserstoffversprödung
- mittlere Steifigkeit; der E-Modul beträgt ca. 50-60% des E-Moduls von Stahl

Einsatzgebiete Flugzeugzelle

- hochbelastete Beschläge
- Befestigungselemente wie Nieten und Schrauben
- Teile, die mit CFK verbunden werden

- Rissstopper in der Aluminiumaußenhaut
- Hydraulik-, Luft-, und Wasserleitungen
- feuerhemmende Wände

Einsatzgebiete Triebwerk

- Fan-Schaufeln
- Verdichterschaufeln – und Scheiben im gesamten Niederdruckverdichter-Bereich, sowie auch teilweise in den vordersten Stufen des Hochdruckverdichters
- Rohrleitungen im Triebwerk

Stahl und Nickel sowie dessen Legierungen

Im Flugzeug- bzw. Triebwerksbau wird Stahl in seiner reinen Form nur selten verwendet. Stahl hat den Nachteil des hohen Gewichtes und der Korrosionsempfindlichkeit. Im Allgemeinen werden in der Luftfahrt rostbeständige Stähle verwendet. Hierbei handelt es sich um Stähle, die durch Zulegieren größerer Mengen an Chrom und Nickel korrosionsunempfindlich sind. Durch das Zulegieren dieser Elemente ändern sich die Eigenschaften der Stähle und die Kosten steigen.

Übersteigt der Nickelanteil den Stahlanteil, so wird von einer Nickel-Basis-Legierung gesprochen.

Eigenschaften

- + höhere spezifische Festigkeit im Vergleich zu Aluminium
- + Einsatz bei hohen Temperaturen ist möglich
- Stahl, insbesondere nichtrostender Stahl, ist teuer
- Dichte ist dreimal so hoch wie die von Aluminium

Einsatzgebiete Flugzeugzelle

- Bremsen
- Fahrwerk

- Lager, Federn oder Schrauben

Einsatzgebiete Triebwerk

- Scheiben und Schaufeln bei den letzten Stufen im Hochdruckverdichter-Bereich und im gesamten Hoch- und Niederdruckturbinen-Bereich
- Lagergehäuse, Lager
- Wellen

1.6. Wichtige Werkstoffbezeichnungen am Beispiel: Triebwerksbau

Nachfolgend ein kurzer Überblick über die wichtigsten beim Triebwerksbau verwendeten Materialien und Legierungen und deren Anwendungsgebiete.

Werkstoffbezeichnung	Anwendung, Besonderheiten
X10CrNiTi1810 (Stahl)	Hydraulikrohre, Blechteile (bis 800°C)
X8CrCoBiMo11 (Stahl)	Verdichter- und Turbinenscheiben (bis 500°C), bedingt rostbeständig
24CrMo12 (Stahl)	Wellen, Stirnräder (bis 450°C), nicht korrosions- beständig
Waspaloy (Nickel-Legierung)	Turbinen- und Verdichterscheiben (bis 700°C)
Inconel 718, Guss und Schmiede (Nickel-Legierung)	Turbinen- und Verdichterscheiben, Verdichter- schaufeln, Wellen (bis 650°C)
C263 (Nickel-Legierung)	Blechteile, Flammrohre (bis 800°C)
Inconel 100 (Nickel-Legierung)	Turbinenschaufeln und -räder (1000°C)

Nimonic 90 (Nickel-Legierung)	Verdichter- und Turbinenschaufeln (bis 700°C)
X40CrMoV 5-1 (Stahl)	Turbinenschaufeln (bis 1000°C)
TiAl6V4 (Titan-Legierung)	Verdichterschaufeln und -scheiben (bis 450°C)
Ti6242, Schmiede (Titan-Legierung)	Verdichterscheiben, Ringe (bis 600°C)
Udimet 720, Pulvermetall (Nickel-Legierung)	Turbinenscheiben, Ringe (bis 1000°C)
Nimonic 90 (Nickel-Legierung)	Verdichter- und Turbinenschaufeln (bis 700°C)

Besonders hervorzuheben ist der Werkstoff Inconel 718. Dieser ist einer der wichtigsten Vertreter unter den hochfesten Nickel-Basis-Legierungen. Die Flugzeugindustrie ist einer der größten Abnehmer für diesen Werkstoff.

Quellenangaben:

Bargel/ Schulze (Hrsg.): Werkstoffkunde, Berlin, Springer, 2005

<http://www.darmstadt-tu.de/Studium/MawiGrund%20II/Fe-C.pdf>

Dr. Ignatowitz/ Röhrer T./ Schilling K./ Röhrer W./ Strecker D.: Fachkunde Metall, 53.

[1] Auflage, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 1999

[2] W. Buchmann und R. Michl: TL-University_Titan-Vortrag.pdf

2. Fertigungsverfahren

2.1. Gießen

Bei der Einteilung in die sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren zählt Gießen zu der Gruppe des Urformens.

Maßgeblich für den Einsatz von Guss im Flugzeugbau war die Erfindung der Schmelzflusselektrolyse im Jahr 1886, da erst seitdem die Leichtmetalle Aluminium und Magnesium industriell hergestellt werden konnten. Relativ jung angesiedelt ist das Feingießen von Titan, welches sich erst seit einigen Jahrzehnten etabliert hat.

Gusselemente machen jedoch nur einen relativ kleinen Anteil im Flugzeugbau aus.

2.1.1. Übersicht der Werkstoffgruppen

Magnesium-, Aluminium- und Titanguss bilden die Gruppe der Leichtmetallgusslegierungen. Auf der Schwermetallseite steht der Stahlguss und Nickelbasisguss.

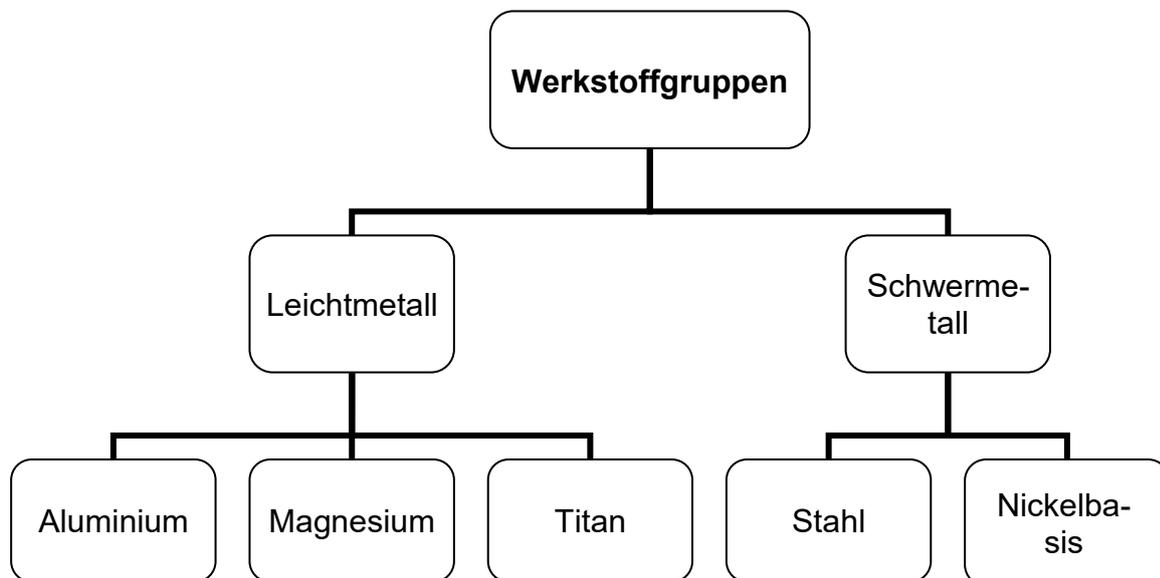


Abbildung 5: Übersicht über die Werkstoffgruppen

Wie schon bekannt, bildet Aluminium in der Luftfahrtindustrie den größten Anteil an verarbeiteten Werkstoffen, wodurch auch dem Aluminiumguss eine herausragende Rolle zukommt.

2.1.2. Gießverfahren

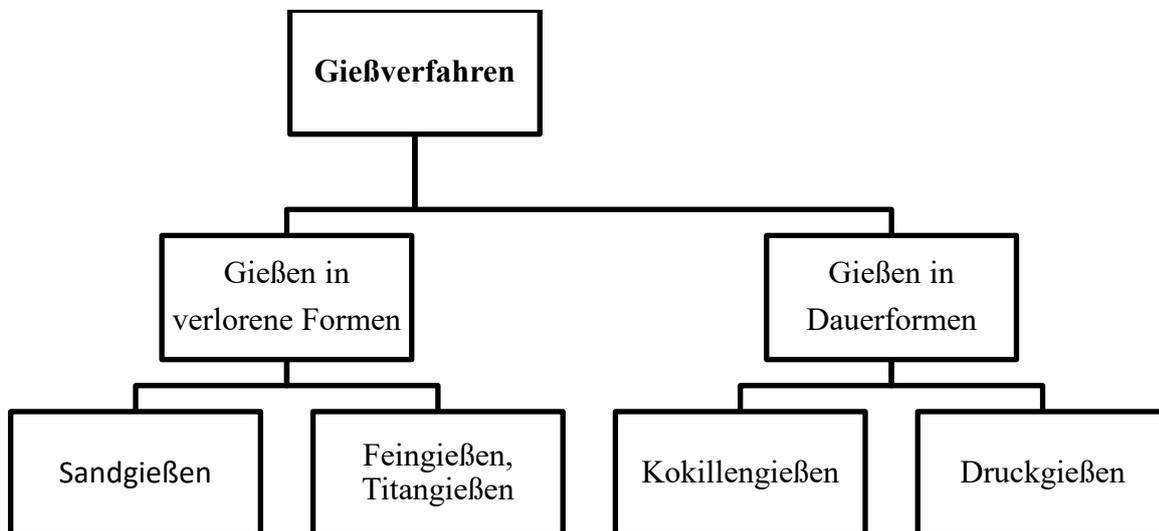


Abbildung 6: Übersicht der Gießverfahren

Dauerformen bestehen aus Stahl oder Eisen-Gusswerkstoffen und können im Gegensatz zu den verlorenen Formen erneut zur Herstellung von Gussteilen verwendet werden.

Verlorene Formen bestehen meist aus Sand (SiO_2), der mit Kleber vermischt wird. Die verlorenen Formen werden nach der Erstarrung der Schmelze vom Gussteil entfernt und somit zerstört. Für Gussteile, die mit verlorenen Formen hergestellt werden, wird immer ein Modell des späteren Gussstücks benötigt.

Wie auch bei den Formen gibt es bei den Modellen, Dauermodell und verlorene Modelle.

Dauermodelle werden meist aus Kunststoff oder Holz hergestellt. Damit das Modell vor dem Abguss wieder entnommen werden kann, besteht die Form aus zwei Formkästen, die mit Formsand aufgefüllt und verdichtet werden.

Verlorene Modelle bestehen meist aus Wachs, Polystyrol oder Kunstharz und werden vor dem Abguss der Form nicht entnommen und können daher auch einteilig sein. Sie

werden nach dem Eingießen des Gusswerkstoffes durch Ausschmelzen oder Verdampfen zerstört. Mit verlorenen Formen sind auch Hinterschneidungen möglich.

Sandgießen

Die älteste Gießart ist das Sandgießen. Die Gießform wird hierbei mit Hilfe eines Formsandess hergestellt. Da Sandformen keine großen Kräfte aushalten, wird die Form allein durch die Schwerkraft mit der Schmelze aufgefüllt.

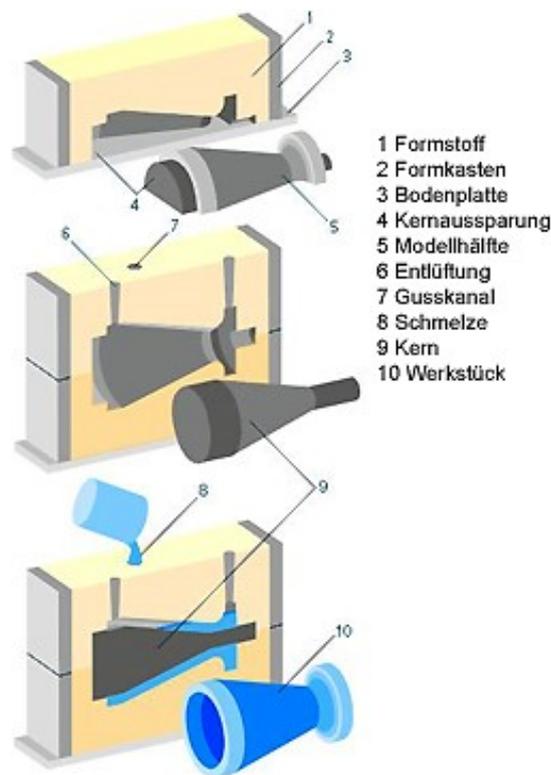


Abbildung 7: Grafische Darstellung des Sandgießens [1]

Vorteile:

- geringer Gusspreis
- Möglichkeit kurzfristiger Änderungen an der Gussform ohne großen Aufwand
- große Formen gießbar

Nachteil:

- Einhaltung Mindestwandstärke (z.B. 3,5mm bei Aluminium)

Feinguss

Das Modell wird beim Feingießen aus Wachs oder einem anderen niedrigschmelzenden Werkstoff hergestellt. Je nach Größe des Teiles werden ein oder mehrere Wachsmodelle mit einem Klebewachs zur einer Wachstraube zusammengefügt. Diese wird durch mehrmaliges Eintauchen in flüssige Keramik und anschließendes Besanden gleichmäßig beschichtet. Dann muss das Wachs in einem Autoklaven unter hohem Druck und unter hoher Temperatur aus der Form geschmolzen werden. Die entwachste Keramikform durchläuft in einem Brennofen mehrere Temperaturstufen und wird auf Endhärte gebracht, um dem späteren Abguss standzuhalten. Nach dem Brennen der Keramikform kann dann in die so entstandene Hohlform das flüssige Metall, welches in einem Tiegel mittels Induktion verflüssigt worden ist, gegossen werden. Der Abguss erfolgt an Luft oder im Vakuum. Der Keramiküberzug wird nach dem Erstarren der Schmelze durch Abschlagen entfernt.

Vorteile:

- gekrümmte Flächen, Hohlräume sowie Hinterschnitte gießbar
- hohe Oberflächengüte und Maßgenauigkeit

Nachteil:

- aufwändiges Verfahren

Titanfeinguss inklusive HIP (Hot isostatic pressing)

Aufgrund der hohen Reaktivität von Titan muss das Schmelzen und Gießen in einer Vakuumanlage erfolgen. Um die Reaktionszeit zu reduzieren wird überwiegend im Schleuderverfahren gearbeitet. Die Aufschmelzung erfolgt meistens im Lichtbogen mit einer selbstverzehrenden Elektrode. Infolge einer Reaktion zwischen keramischer Formschale und flüssigem Metall muss die sauerstoffangereicherte Oberfläche anschließend abgebeizt werden. Des Weiteren werden Titangussteile immer mit dem HIP (hot isostatic pressing) – Verfahren nachbearbeitet, um Gefügehohlräume wie Poren und Lunker zu schließen. Dabei heilen die Gefügefehler aus und hinterlassen oft eine Einfallstelle auf der Oberfläche.

Vorteil:

- porenfreier Abguss
- lunkerfreier Abguss

Nachteile:

- Guss muss in einer Vakuumanlage oder unter Schutzgas erfolgen
- Schmelze ist sehr reaktionsfreudig → Kaltwandtigel erforderlich

Kokillenguss

Dieses Verfahren wird in der Luftfahrt seltener eingesetzt, da die Kokille aus Metall höhere Kosten erfordert, was nur bei einer großen Stückzahl wirtschaftlich ist. Bei komplizierten Gussstücken werden auch Gemischtkokillen verwendet, bei denen nicht ausformbare Innenkerne bzw. Außenformpartien aus Sand gebildet werden. Durch die Abschreckwirkung der Kokille wird ein sehr feines Gefüge erreicht. Gießleistung und Maßgenauigkeit sowie mechanische Eigenschaften und Oberflächenqualität sind in der Regel besser als beim Sandgussverfahren.

Es gibt verschiedene Arten von Kokillenguss, zum einen den Schwerkraftkokillenguss, bei dem, ähnlich wie beim Sandguss, die Formfüllung und Erstarrung ausschließlich unter der Wirkung der Schwerkraft erfolgt. Außerdem gibt es noch Spezialverfahren wie beispielsweise Kipp-Kokille, Niederdruck- und Gegendruckverfahren.

Vorteile:

- sehr feine Gefüge möglich
- mechanische Eigenschaften und Oberflächengenauigkeit besser als beim Sandgießen

Nachteil:

- hohe Kosten durch den Einsatz der teuren Metallform

Druckguss

Bei dieser Art von Gussverfahren wird das flüssige Metall mit hohem Druck und mit hoher Geschwindigkeit in eine metallische Dauerform gepresst, wobei der Druck auf die Metallschmelze während der Erstarrung aufrechterhalten wird. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung dünnwandiger Gussstücke mit komplexer Geometrie, hoher Maßgenauigkeit und glatter Oberfläche. Häufig werden diese Teile ohne jegliche Nacharbeit verwendet.

Bei der Konstruktion eines Druckgussteiles muss berücksichtigt werden, dass die Druckgießform aus mindestens zwei Hauptteilen besteht, die den Formhohlraum bilden. Die Lage der Formteilungsebene ist mit dem Gießer abzustimmen, ebenso auch die Lage der notwendigen Auswerfmarkierungen. Bedingt durch die hohen Maschinen- und Werkzeugkosten ist eine Wirtschaftlichkeit nur bei großen Serien gewährleistet. Nachteilig für die Qualität des Gussstückes ist, dass systembedingt durch die turbulente Formfüllung Trenn- und Schmiermitteldämpfe in das Gefüge eindringen. Dies hat zur Folge, dass das Gefüge aufgelockert wird und eine Reparaturschweißung sowie eine anschließende Wärmebehandlung unmöglich ist.

Vorteile:

- hohe Gussfrequenz
- gute Oberflächengüte

Nachteile:

- Reparaturschweißen oder anschließende Wärmebehandlung nicht möglich
- hohe Maschinen- und Werkzeugkosten

2.1.3. Gussfehler und geeignete Prüfverfahren

Beim Gießen und Erstarren können diverse Fehler auftreten, wie zum Beispiel:

Lunker

Lunker sind Hohlräume, die dann entstehen, wenn beim Erstarren der Volumensprung zwischen flüssig und fest nicht durch eine ausreichende Nachspeisung ausgeglichen werden kann.

Nachweis durch Röntgen und Ultraschall.

Seigerungen

Seigerungen sind Entmischungen einer Schmelze. Diese Entmischungen können beispielsweise durch stark unterschiedliche Dichten von Legierungselementen hervorgerufen werden und führen zu unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften im Gussteil.

Nachweis durch Seigerungsätzen.

Gussspannungen

Gussspannungen können durch unterschiedliche Wanddicken und extreme Geometrieübergänge entstehen. Sichtbar werden Gussspannungen durch Risse oder durch Verzug des Gussteils.

Nachweis von Rissen durch Eindringprüfung, Magnetpulver und Wirbelstrom.

Nachweis von Verzug durch Sichtprüfung und Maßprüfung.

Gasblasen

Gasblasen entstehen, wenn Gase während des Erstarrens nicht mehr entweichen können. Durch Einhalten der richtigen Gießtemperatur können diese Fehler vermieden werden.

Nachweis durch Röntgen und Ultraschall.

Schlackeneinschlüsse

Schlackeneinschlüsse treten auf, wenn die Schmelze nicht ausreichend entschlackt wurde. Flache, glatte Oberflächenvertiefungen am Gussteil deuten auf Schlackeneinschlüsse hin.

Nachweis durch Röntgen und Ultraschall.

Keramische Einschlüsse

Kleine Bruchstücke der Gießformen brechen beim Einguss ab und werden in das Bauteil geschwemmt.

Nachweis durch Röntgen und Eindringprüfung.

2.1.4. Anwendungen im Triebwerksbau

Bei der MTU Aero Engines in München werden beispielsweise Panels, Fairings, Turbinaustrittsgehäuse oder auch Ölrohre als Gussteile angeliefert. Leit- und Laufschaufeln werden mit Hilfe des „lost wax“ – Verfahren, d.h. Feinguss hergestellt. Bei den Leitschaufeln wird jeweils noch unterschieden zwischen den einzeln gegossenen Schaufeln, Leitschaufelsegment oder dem im ganzen gegossenen Leitschaufelkranz.



Abbildung 8: Gegossene Laufschaufeln [2]

Quellenangaben:

Koether R./ Rau W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2005

A Herbert Fritz, Günter Schulze (Hrsg): Fertigungstechnik, Springer Verlag, 2010

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

[1] http://www.metallguss-herpers.de/uploads/pics/Form_Kopie_06.jpg

[2] MTU Intranet

2.2. Schmieden

2.2.1. Grundlagen

Das Schmieden ist wie das Gießen ein spanloses Fertigungsverfahren. Bei der Einteilung in die Hauptgruppen ist dieser Prozess unter „Umformen“ zu finden.

Beim Schmieden wird das herzustellende Werkstück meist im glühenden Zustand durch Schlag oder Druck umgeformt.

Die erforderliche Schmiedetemperatur ist über die Formänderungsfestigkeit des Werkstückes definiert. Diese ist abhängig vom Werkstoff und der Umformgeschwindigkeit.

2.2.2. Warm-, Halbwarm- und Kaltschmieden

Abhängig von der Umformtemperatur unterscheidet man:

Warmschmieden

- Arbeitstemperatur liegt oberhalb der Rekristallisationstemperatur
- geringe Umformkräfte
- große Umformbarkeit der Werkstoffe

Halbwarmschmieden

- Arbeitstemperatur liegt für Stahl bei 750 - 950°C
- kein bzw. geringes Verzundern an der Oberfläche
- geringere Umformkräfte als beim Kaltumformen
- engere Maßtoleranzen als beim Warmumformen

Kaltschmieden

- Arbeitstemperatur liegt bei Raumtemperatur
- enge Maßtoleranzen sind erreichbar
- keine Verzunderung der Oberfläche

2.2.3. Freiformen

Beim Freiformen kann der Werkstoff während des Umformvorgangs frei fließen. Das Freiformen wird vor allem für die Herstellung von Einzelstücken eingesetzt. Charakterisierend für das manuelle Freiformen ist die Arbeit am Amboss. Das damit wohl bekannteste herzustellende Werkstück ist das Hufeisen.

2.2.4. Gesenkformen

Im Gegensatz zum Freiformen kann beim Gesenkformen der Werkstoff nicht frei fließen. Gesenke (= Werkzeug) bestehen aus warmfestem Stahl, in die Hohlräume eingearbeitet sind. Diese Hohlräume entsprechen der Form des zu fertigen Werkstücks.

Der vorgewärmte Rohling wird in das Untergesenk eingelegt.

Danach wird das Obergesenk nach unten verfahren und es kommt zum Schluss des Werkzeuges. Durch den entstehenden Druck wird der Gesenkraum vollständig vom Werkstück ausgefüllt.

Beim Gesenkformen kann man Gesenkformen ohne Grat und mit Grat unterscheiden. Beim Gesenkformen ohne Grat muss das Rohteilvolumen genau berechnet werden. Beim Gesenkformen mit Grat muss der Grat in einem nachfolgenden Arbeitsgang mit Schneid- oder Schleifwerkzeugen entfernt werden.

2.2.5. Schmiedefehler und geeignete Prüfverfahren

Beim Schmiedevorgang treten vor allem zwei Arten von Fehlern auf:

- Schmiedeüberlappung
- Kernzerschmieden/ Schmiederisse

Schmiedeüberlappung

Eine Überlappung ist eine Materialtrennung, die durch Hineindrücken von dünnem Material in die Schmiedeoberfläche entsteht.

Eine Möglichkeit, wie Überlappungen entstehen, ist das Nichtfluchten der beiden Gesenkhälften. Dadurch kann Metall in die Trennung der Gesenkhälften gedrückt werden. Beim nächsten Schlag kann dieses Blech in die heiße Oberfläche hineingedrückt werden. Überlappungen sind immer offen zur Oberfläche.

Eine andere Möglichkeit ist dort gegeben, wo ein abrupter Richtungswechsel der Fasersrichtung stattfindet. Überlappungen können auch durch schlechte Konstruktion des Gesenks entstehen.

Kernerschmieden/ Schmiederisse

Diese Art von Schmiedefehler tritt auf, wenn das Material bei ungeeigneten Temperaturen verformt wird. Die Folge daraus ist die Entstehung von Aufreißungen im Inneren des Werkstückes. Das hängt damit zusammen, dass das umzuformende Teil zwar außen bereits die richtige Temperatur hat, aber durch zu kurze Verweilzeit im Ofen im Kern noch zu kalt ist. Die entstehenden Brüche sind zur Oberfläche hin nicht offen. Diese Erscheinung wird als Kernerschmieden bezeichnet. Es besteht auch die Möglichkeit, dass das Material an der Oberfläche reißt. In diesem Fall spricht man von Schmiederissen.

Ein geeignetes zerstörungsfreies Verfahren zur Prüfung des Schmiedegefüges ist die Ultraschallprüfung. Zur Detektion von oberflächennahen Rissen findet die Eindringprüfung Verwendung.

2.2.6. Vor- und Nachteile des Schmiedens

Vorteile:

- Verdichtung des Werkstücks
- Steigerung der Festigkeit
- grobkristallines Gefüges geht in feinkörniges über

Nachteile:

- Geringe Genauigkeit

- ungeeignet zur Herstellung von komplexen Geometrien

2.2.7. Anwendungen im Triebwerksbau

Bei der MTU Aero Engines in München werden ebenfalls geschmiedete Teile bearbeitet. Hierzu zählen beispielsweise die Verdichter- und Turbinenscheiben, rotierende Dichtringe oder das Rohteil der späteren Blisk, um nur einige zu nennen.

Des Weiteren werden Verdichterschaufeln und Triebwerksgehäuse geschmiedet bzw. gewalzt. Bei den dafür verwendeten Werkstoffen handelt es sich meistens um Titan oder Nickelbasislegierungen. Deren Verwendung variiert je nach Anwendungsgebiet, z. B. Brennkammer, Hochdruck- oder Niederdruckbereich.

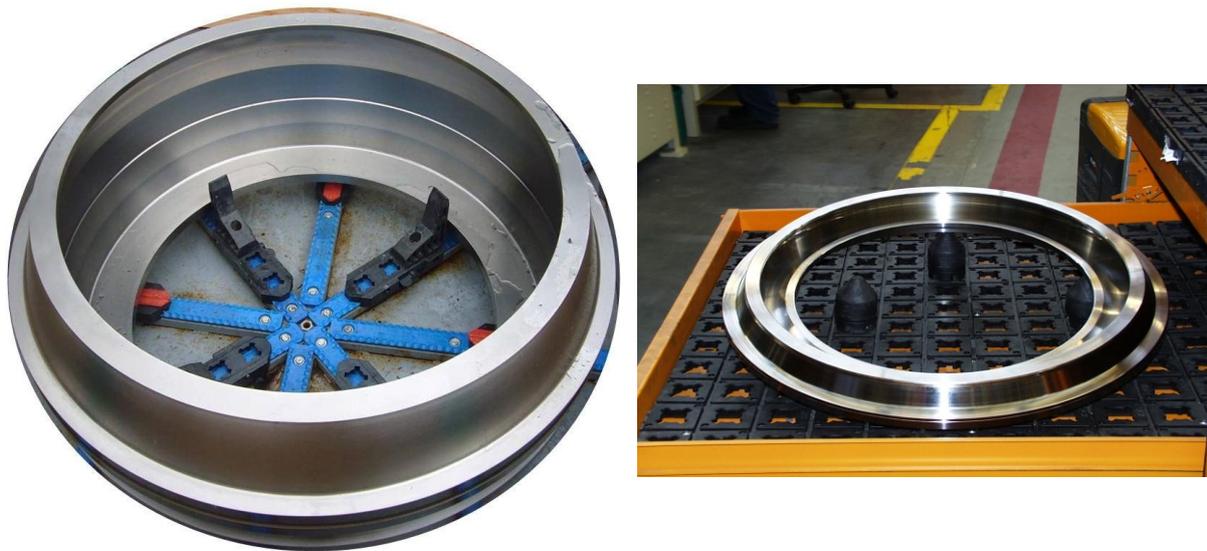


Abbildung 9: Geschmiedetes Gehäuse und Dichtring

Quellenangaben:

Koether R./ Rau W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2005

A Herbert Fritz, Günter Schulze (Hrsg): Fertigungstechnik, Springer Verlag, 2010

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

[1] W. Buchmann: Schmieden im Triebwerksbau Grundlagen.ppt, 12.08.2010

2.3. Faserverbundwerkstoffe

2.3.1. Grundlagen

Ein Verbundwerkstoff ist ein Werkstoff, der gebildet wird durch eine natürliche oder synthetische Zusammenstellung von zwei oder mehreren Werkstoffen, damit gewünschte spezifische Eigenschaften erreicht werden.

Ein Verbundwerkstoff besteht aus:

Verstärkung (z.B. Fasern) + Matrix (z.B. Kunstharz)

Verbundwerkstoffe, bei denen die Verstärkung durch Fasern erreicht wird, heißen Faserverbundwerkstoffe.

Bei den Faserverbundwerkstoffen besteht die Matrix entweder aus einer Reaktionsharzmasse oder einem thermoplastischen Harzsystem.

Die Reaktionsharzmasse ist eine verarbeitungsfähige Mischung eines Harzes mit den zum Härten erforderlichen Reaktionsmitteln (Härter, Beschleuniger, usw.).

Zum Härten ist gegebenenfalls Wärmezufuhr erforderlich.

Entsprechend der Art der Faserverstärkung unterscheidet man zwischen:

- Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)
- Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK)
- Aramidfaserverstärkter Kunststoff (AFK)

Im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen wie Metallen, lassen sich bei Faserverbundwerkstoffen durch die Variationsmöglichkeiten bei der Orientierung und Verteilung der Verstärkungsfasern gezielte Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften eines Bauteils konstruieren.

2.3.2. Matrixsysteme

In der Luftfahrtindustrie kommen am häufigsten die nachfolgenden Matrixsysteme zum Einsatz:

Epoxidharze (EP-Harze)

Harze, die mit Härtungsmitteln durch eine bestimmte chemische Härtungsreaktion in den festen Zustand übergehen. Die Härtungsreaktion verläuft ohne Abspaltung von Reaktionsprodukten. Hierbei entsteht ein räumliches Netzwerk aus Molekülketten, das nicht mehr schmelzbar ist und keine Warmumformung mehr zulässt. Epoxidharze weisen gute mechanische Eigenschaften auf und sind gegen alle im Flugzeug vorkommenden Medien sehr gut beständig.

Die hohe chemische Reaktivität der Epoxide verleiht ihnen außerdem sehr gute Klebeeigenschaften untereinander und mit anderen Werkstoffen.

Für die Herstellung von Strukturbauteilen werden nahezu ausschließlich warmhärtende Systeme mit Aushärtungstemperaturen von 125°C bzw. 180°C eingesetzt.

Phenolharze

Diese Harze zählen zu den Kunstharzen, welche durch die Kondensation eines aromatischen Alkohols mit einem Aldehyd entstehen, insbesondere von Phenol mit Formaldehyd. Die freiwerdenden Kondensationsprodukte können sich nachteilig auf die Qualität der Bauteile auswirken.

Aufgrund der guten thermischen Beständigkeit werden sie vorwiegend für die Herstellung von Bauteilen der Innenausstattung eingesetzt, die strengen Brandschutzanforderungen unterliegen.

Thermoplaste

Im Gegensatz zu den Reaktionsharzsystemen benötigen die Thermoplaste keinen aufwendigen Härtungszyklus. Die Molekülketten sind untereinander nicht vernetzt, die Verarbeitung kann daher durch einen thermischen Formgebungsprozess erfolgen, der

nur wenige Minuten beansprucht. Damit eignen sich Thermoplaste in Verbindung mit Kurzfasern (1-10 mm Faserlänge) hauptsächlich für kleinere Bauteile, die in Pressen oder auf Spritzgussmaschinen hergestellt werden können.

2.3.3. Fasern

Die in Strukturbauteilen zum Einsatz kommenden Fasern sind im allgemeinen Endlosprodukte mit rundem Querschnitt und je nach Fasertyp mit Durchmessern von 5-12 μm . Eine einzelne Faser wird auch als Filament bezeichnet. Jeweils 3000 (3K), 6000 (6K) oder 12000 (12K) Fasern werden für die Verarbeitung zu Faserbündeln, sogenannten Rovings zusammengefasst. Die Rovings werden häufig auf Textilmaschinen zu einem Gewebe, Geflecht oder einem Gelege weiterverarbeitet.

Im Flugzeugbau vorwiegend eingesetzte Verstärkungsfasern bestehen aus folgenden Werkstoffen:

Glas

Ein anorganisches Schmelzprodukt, das ohne Kristallisation zu einem harten Zustand abgekühlt ist. Glasfasern werden aus geschmolzenen Glas gezogen. Glasfasern haben einen Schmelzpunkt von ca. 800°C. Wegen des relativ hohen Gewichts und der niedrigen Steifigkeit ist das Leichtbaupotential im Vergleich zu den anderen Verstärkungsfasern geringer. Vorteilhaft ist der niedrige Preis, die Durchlässigkeit für elektromagnetische Strahlung, die Unempfindlichkeit gegen Medien (z. B. Wasser) und das gutmütige Versagensverhalten.

Kohlenstoff

Carbonfasern werden aus Kunststofffasern durch thermischen Abbau hergestellt.

Kohlenstofffasern haben hohe Zugfestigkeiten und Steifigkeiten, niedrige Bruchdehnung und sind an Luft bis etwa 350°C gegen Oxidation stabil. Die Verbindungen mit Leichtmetallen sind durch Korrosion gefährdet. Carbonfasern sind elektrisch leitend und deshalb für Antennenabdeckungen nicht geeignet.

Aramid

Mit Aramid werden aromatische Polyamide bezeichnet. Ein Handelsname ist KEVLAR oder TWARON.

Fasern aus Aramid weisen einen hohen Orientierungsgrad der Einzelfilamente und daher im Vergleich zu anderen Fasern gute gewichtsbezogene Eigenschaften in Faserlängsrichtung, jedoch niedrige Festigkeiten senkrecht zur Faserrichtung auf.

Zudem haben diese die größte Bruchdehnung und das niedrigste spezifische Gewicht von allen Verstärkungsfasern. Die Fasern lassen sich nur mit speziellen Werkzeugen schneiden. Als Polymer nimmt die Faser selbst Feuchtigkeit aus der Umgebung auf, was sich nachteilig auf die Eigenschaften auswirken kann. Die Aramidfasern haben eine relativ schlechte Haftung zur Kunststoffmatrix im Vergleich zu den anderen Verstärkungsfasern.

2.3.4. Halbzeuge

Die Ausgangsmaterialien für die Herstellung der Bauteile sind bei Flugzeugbauteilen überwiegend Prepreg.

Prepreg ist eine Wortschöpfung aus dem Englischen und bedeutet preimpregnated. Bei diesem Halbwerkzeug sind die Fasern bereits mit der Harzmatrix vorgetränkt.

Die Matrix liegt in einem vorreagierten Zustand vor, durch Kühlung bei -18°C wird die Weiterreaktion weitgehend unterbunden. Bei Raumtemperatur sind die Prepregs jedoch nur eine begrenzte Zeit, ca. 20 bis 30 Tage, verarbeitungsfähig.

Je nach Faserhalbzeug im Prepreg unterscheidet man zwischen:

UD -Tape

Hierbei liegen alle Fasern parallel in einer Richtung. Dieses Tape kann beispielsweise mittels Wickelverfahren oder eines Webprozesses zu einem Gewebe verarbeitet werden.

Gewebe Prepreg

Hierbei sind zwei Faserbündel als Kett- und Schussfaden flächig miteinander verwoben. Abhängig von Bindungsart und Anzahl der Faserbündel in der jeweiligen Richtung sind Gewebe mit unterschiedlichen Eigenschaften erhältlich.

Trockene Faserhalbzeuge

Trockene Faserhalbzeuge (Rovings) werden vor allem beim Wickelprozess verwendet, bei denen das Harz erst im Fertigungsprozess zugeführt wird. Bei neuen Fertigungsverfahren mit sehr niedrig viskosen Harzen kommen ebenfalls trockene Faserstrukturen vermehrt zum Einsatz. Hierbei wird von sog. Harzinjektionsverfahren (Resin Transfer Molding = RTM) gesprochen. Des Weiteren können auch komplizierte, dreidimensional verwobene oder geflochtene Halbzeuge eingesetzt werden, die in einem Prepregprozess nicht mit Harz eingetränkt werden können.

2.3.5. Bauweisen

Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen werden nach zwei grundsätzlichen Bauweisen unterscheiden:

- Monolithische Bauteile
- Kernverbund- oder Sandwichbauteile

Monolithische Bauteile

Monolithische Bauteile werden ausschließlich unter Verwendung von Fasern und Harz, d.h. aus einem Faserverbundwerkstoff hergestellt. Der Werkstoff wird vergleichbar einem Blech eingesetzt, wobei die einzelnen Lagen sowie örtliche Versteifungen auch in räumlicher Geometrie durch das Harz miteinander verbunden sind. Diese Bauweise wird vorzugsweise bei hochbelasteten Bauteilen eingesetzt.

Kernverbund- oder Sandwichbauteile

Kernverbund- oder Sandwichbauteile bestehen aus zwei Decklagen und einem Kern. Die Anbindung des Kerns erfolgt entweder durch das Prepregharz selbst oder, falls die

Decklage schon in einem vorhergehenden Fertigungsschritt ausgehärtet wurde, durch zusätzlich aufgetragenen Klebefilm. Die Decklagen bestehen aus CFK-, GFK- oder AFK-Laminaten. Als Kernwerkstoffe kommen im Flugzeugbau entweder Schaumstoffe oder in den meisten Fällen Wabenkerne zum Einsatz. In Sandwichbauteilen mit CFK-Decklagen werden aus Korrosionsschutzgründen ausschließlich nichtmetallische Waben, meist NOMEX-Waben eingesetzt. NOMEX ist eine Produktbezeichnung für Waben aus phenolharzgetränktem Polyamidpapier.

Für niedrigbelastete, flächige Bauteile mit hohen Anforderungen an die Formsteifigkeit wird die Kernverbund- oder Sandwichbauweise angewandt.

Innerhalb der Kernverbund- oder Sandwichbauteile wird nochmals zwischen zwei Bauweisen, integral und differentiell, unterschieden.

Integrale und differentielle Bauweisen

Von einer integralen Bauweise spricht man, wenn eine Gesamtstruktur mit allen örtlichen Versteifungen, z.B. Doppler, Stringer usw. in einem einzigen Arbeitsgang hergestellt wird.

Im Gegensatz hierzu werden für eine in differentieller Bauweise gefertigte Gesamtstruktur die Einzelkomponenten separat gefertigt und in weiteren Fertigungsschritten durch Kleben oder Nieten zusammengefügt.



Abbildung 10: Sandwichstruktur in Differential- und Integralbauweise [1]

Viele strukturelle Faserverbundbauteile werden heute aus Prepreg hergestellt, man spricht deshalb auch vom Prepregverfahren. Die Prepregs werden zum größten Teil im Autoklavverfahren bei 125°C oder 180°C und einem Druck von 4 -6 bar ausgehärtet, seltener und nur für ebene Bauteilgeometrien auch in der Heizpresse.

Grundsätzlicher Fertigungsablauf

1. Zuschnitt der benötigten Prepreg Einzellagen nach Bauunterlage von Hand oder mittels Schneidemaschine.
2. Ablegen (Laminieren) der zugeschnittenen Prepreglagen, direkt in eine Vorrichtung oder auf entsprechende Laminierkerne manuell oder von Robotern.
3. Kompaktieren und Entlüften von Lagenpaketen durch Vakuumziehen sowie falls erforderlich Umformen der laminierten Prepreglagen bei einer Temperatur von maximal 80°C, um eine Vorhärtung zu Vermeiden.
4. Verschließen der Form mit Vakuumfolien zum Härten im Autoklaven.

Härten unter Temperatur und Druck. Die Vorgaben für die Prozessparameter sind abhängig vom eingesetzten Werkstoffsystem und in den jeweiligen Datenblättern verankert.

5. Entformen des gehärteten Bauteils
6. ggf. Tempern des Bauteils außerhalb der Form
7. mechanische Bearbeitung

Prozessparameter für die Aushärtung

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen entsteht bei Faserverbundbauteilen der eigentliche Werkstoff erst während des Fertigungsprozesses, genauer noch während des Aushärtungsvorganges im Autoklaven oder in der Presse. Der kritischste (und häufigste) Fehler ist eine lokale Trennung von zwei Faserschichten, die „Delamination“ genannt wird.

Drei Faktoren stellen die späteren mechanischen Eigenschaften und damit die Leistungsfähigkeit des Bauteils sicher:

- ausreichende Vernetzung der Reaktionsharzmatrix
- fehlstellenfreie Verbindung der einzelnen Faserschichten
- geringe Porosität (keine Lufteinschlüsse)

Die chemische Reaktion selbst ist nicht an einen bestimmten Druck gebunden, ein ausreichender Vernetzungsgrad ist daher druckunabhängig. Die Druckbeaufschlagung ist jedoch wesentlich für die fehlstellenfreie Verbindung der Faserschichten, d.h. Vermeidung von Delaminationen und eine geringe Porengröße.

Während der Aufheizung wird das Harz verflüssigt, unter Druck stellt sich im Harz eine hydrostatische Druckverteilung sowie ein gewisser Harzfluss in Richtung druckärmerer Bereiche ein. Beides zusammen ermöglicht zum einen die Konsolidierung (Verdichtung) des Laminataufbaus und zum anderen das Austreten von Lufteinschlüssen und sind somit Voraussetzungen für ein porenfreies Laminat.

Der Harzgehalt der Prepregsysteme ist so eingestellt, dass stets ein Anteil überschüssiges Harz vorhanden und deshalb ein Minimum an Harzfluss sichergestellt ist. Die Viskosität der Harze muss andererseits so eingestellt sein, dass der Harzfluss nicht zu groß wird. Sonst kann es zu Verschiebung und Verwerfung der Lagen, Aufschwemmen von Fasern in Randbereichen sowie lokalen Überschreitungen des maximal zulässigen Faseranteils von 64 Vol-% kommen.

Mit der üblichen Prepregbauweise sind großflächige (bis zu 100 m²) Einzelbauteile bis zu eine Dicke von mehreren Zentimetern herstellbar. Diese Teile werden zu komplexen Strukturen, z B. Tanks, Druckbehälter, Rümpfe zusammengeführt.

Die folgenden Fertigungsverfahren kommen seit kurzem vermehrt im Flugzeugbau zum Einsatz.

Resin Transfer Molding (RTM)

Hierbei handelt es sich um ein Harzinjektionsverfahren. Trockene Faserhalbzeuge werden in die offene Negativvorrichtung eingelegt, diese wird anschließend auf Endmaß geschlossen. In die evakuierte Vorrichtung wird dann das Harz unter geringem Überdruck mit einer Pumpe injiziert. Das Harz kann entweder als fertige Mischung (Einkomponentensystem) oder als getrennte Komponenten (Harz, Härter) vorliegen. Vor dem Einspritzen wird das Harz häufig auf bis zu 60 °C erwärmt, um die Viskosität abzusenken. Über einen Auslauf aus der Form wird ein gewisser Harznachlauf ermöglicht, um eine porenfreie und vollständige Durchtränkung des Trockengeleges zu gewährleisten. Die Harzzufuhr und der Überlauf können über Ventile gesteuert werden. Das Harz kann über die Pumpe während der Aushärtung mit Druck beaufschlagt werden. Die Aushärtung erfolgt in einem Ofen mit einer Druckbeaufschlagung bis ca. 6 bar. Die erforderlichen Temperaturen und Zeiten liegen in der Größenordnung von Prepregsystemen.

Das Prinzip bietet wirtschaftliche und fertigungstechnische Vorteile für Bauteile mit großen Dicken und komplizierten Geometrien.

Resin Infusion (RI)

Auch bei diesem Verfahren werden Harze und Fasern als getrennte Halbzeuge eingesetzt. Sowohl die Faserhalbzeuge für das RTM Verfahren, als auch die dort verwendeten Harze können eingesetzt werden. Der wesentliche Unterschied in der Technik besteht darin, dass keine geschlossenen Vorrichtungen verwendet werden und das Harz nicht eingespritzt wird. Das Faserhalbzeug wird in die Vorrichtung eingelegt, das Harz z.B. als Harzfilm aufgebracht. Der Aufbau zur Härtung im Autoklaven gleicht weitgehend einem Prepregaufbau. Die Durchtränkung erfolgt während des Härtungszyklus.

Das Verfahren eignet sich zur Herstellung großer, flächiger Schalenbauteile.

2.3.6. Prüfung von Kernverbunden

Bei Kernverbunden werden Prüfungen durchgeführt, die darauf abzielen, nur die Wabe oder den gesamten Verbund zu prüfen. Die Prüfung kann beispielsweise mit Hilfe nachfolgender Versuche durchgeführt werden.

Wabenzugversuch

Die Wabe wird an zwei metallische Zugblöcke angeklebt. Zur Ermittlung der Wabenzugfestigkeit werden die Blöcke in Wabenrichtung auf Zug belastet.

Wabendruckversuch

Die normalerweise durch Decklagen stabilisierte Wabe wird in Wabenrichtung auf Druck belastet.

Biegeversuch

Beim Biegeversuch kann durch Veränderung des Auflagerabstandes eine reine Biegebeanspruchung auf die Wabe gebracht werden oder eine Schubbeanspruchung. Sandwichproben werden im 3- oder 4-Punkt-Biegeversuch geprüft.

Plattenscherversuch

Hierbei wird die mit einer Decklage versehene Wabe zwischen zwei Metallplatten geklebt und auf Schub beansprucht. Es tritt Schubversagen der Wabe auf.

Trommelschälversuch

Ähnlich wie bei Klebeverbindungen wird hier eine Decklage von der Wabe abgeschält und so die Schälfestigkeit der Verbindung Wabe/Decklage ermittelt.

Druckversuch senkrecht zur Wabe

Beim Druckversuch senkrecht zur Wabe wird die mit Decklagen stabilisierte Wabe an den Enden zur Kraffteinleitung in einen Kunststoff eingegossen und auf Druck belastet. Versagen kann nicht durch Wabencrash, sondern auch durch Knickung, Einknicken oder Beulen der Decklage erfolgen.

Auf geeignete Methoden zur Prüfung der Klebeverbindung von Faserverbundwerkstoffen wird detailliert in Kapitel 5.8 eingegangen.

2.3.7. Anwendungen in der Luftfahrt

Der Anteil an Faserverbundteilen in der Luftfahrt steigt kontinuierlich an. Komponenten wie z. B. das Seitenleitwerk, Landeklappen oder Spoiler werden bereits seit einigen Jahren aus Verbundwerkstoffen hergestellt.

An der neuen Boeing 787 „Dreamliner“ ist sogar der komplette Rumpf aus diesem nichtmetallischen Werkstoff hergestellt.

In Abbildung 11 sind die einzelnen Komponenten des A380 aufgezeigt, bei denen Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz kommen.

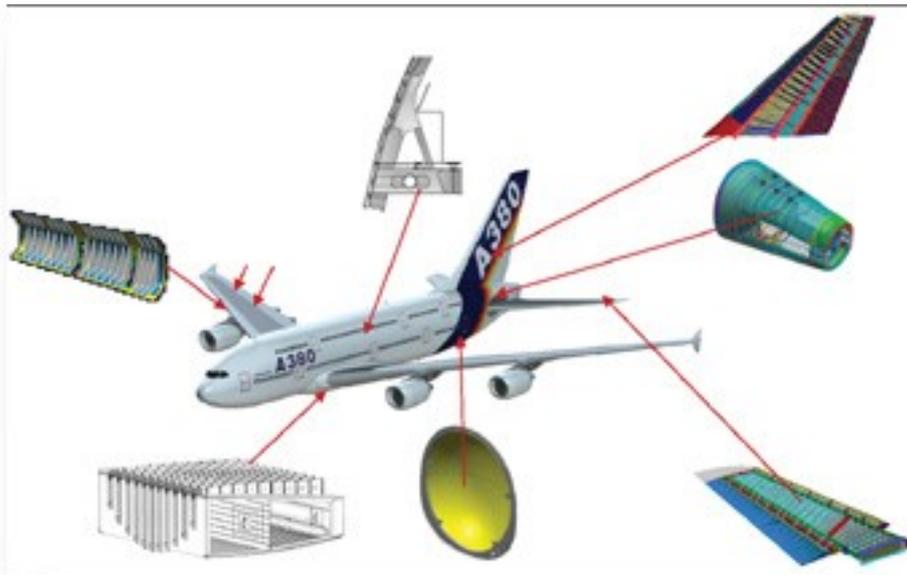


Abbildung 11: Faserverbundbauteile am A380 [2]

Bei Flugtriebwerken setzt vor allem die Firma General Electric Faserverbundwerkstoffe im FAN Modul ein (Abbildung 12). Bei dem GENx ist neben den Fan-Schaufeln auch das Fan-Gehäuse aus faserverstärktem Kunststoff (FVK).



Abbildung 12: GE90 Fan-Schaukel, FVK-Schaukelblatt mit Ti-Vorderkante [3]

Quellenangaben:

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

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

M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth: Faserverbundbauweisen Halbzeuge und Bauweisen, Springer, 1996

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

[1] M. Flemming, G. Ziegmann, S. Roth: Faserverbundbauweisen Halbzeuge und Bauweisen, Springer, 1996

[2] <http://www.uni-stuttgart.de/aktuelles/science/2004/02/text.html>

[3] MTU: Herr Siegfried Sikorski

2.4. Billetherstellung von Titan und Titanlegierungen

2.4.1. Grundlagen

Titan zählt mit 0,6% nach Eisen, Aluminium und Magnesium zum vierthäufigsten Metall der in der Erdkruste vorkommenden Elemente. In der Häufigkeit der Elemente steht Titan an neunter Stelle, genauer gesagt wird davon ausgegangen, dass zur Zeit Vorkommen von Titanoxidreserven von 650 Millionen Tonnen zur Verfügung stehen.

Eine Übersicht über die globale Verteilung der Vorkommen zeigt Abbildung 13.

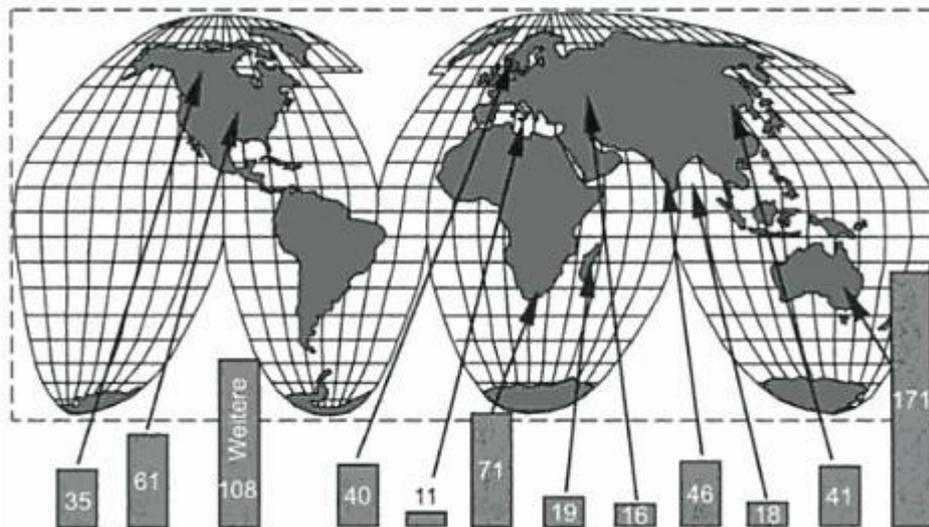


Abbildung 13: Verteilung der globalen Vorkommen von TiO_2 [1]

Bereits im Jahre 1825 stellte J. J. Berzelius durch Reduktion von TiO_2 mit Na unreines, metallisches Titan her. Erst 1910 reduziert der Amerikaner M. A. Hunter $TiCl_4$ mit Hilfe von Na zu Titan mit einem Reinheitsgrad von 99,9%. Die industrielle Produktion wurde ab 1938 durch das von W. Kroll entwickelte Verfahren ermöglicht, das aber erst seit 1946 großtechnisch angewendet werden kann.

Der Herstellungsprozess vom Titanerz zum Titanbillet wird nachfolgend beschrieben.

2.4.2. Herstellung von Titanschwamm

Als Ausgangsmaterial dient das in der Natur vorkommende Rutil (TiO_2) und Ilmenit (FeTiO_3).

Zu Beginn ist eine Vorreinigung des Ilmenit nötig, dabei wird das Eisen vom preiswerten Ilmenit getrennt. Die entstehende Titanschlacke wird angereichert, sodass diese eine vergleichbare Konzentration mit dem Rutil (TiO_2) aufweist.

Die Herstellung von Titanschwamm lässt sich mit Hilfe des „Kroll-Prozesses“ realisieren. Um zum Endprodukt zu gelangen, bedarf es vieler Verfahrensschritte. Dieser zeit- und energieaufwändige Prozess hat sich dennoch über die Jahre hinweg durchgesetzt und stellt heute immer noch das Standardverfahren zur Titangewinnung dar.

In Abbildung 14 ist der durchzuführende Reduktionsablauf (erweiterter „Kroll-Prozess“) für Ilmenit und Rutil dargestellt.

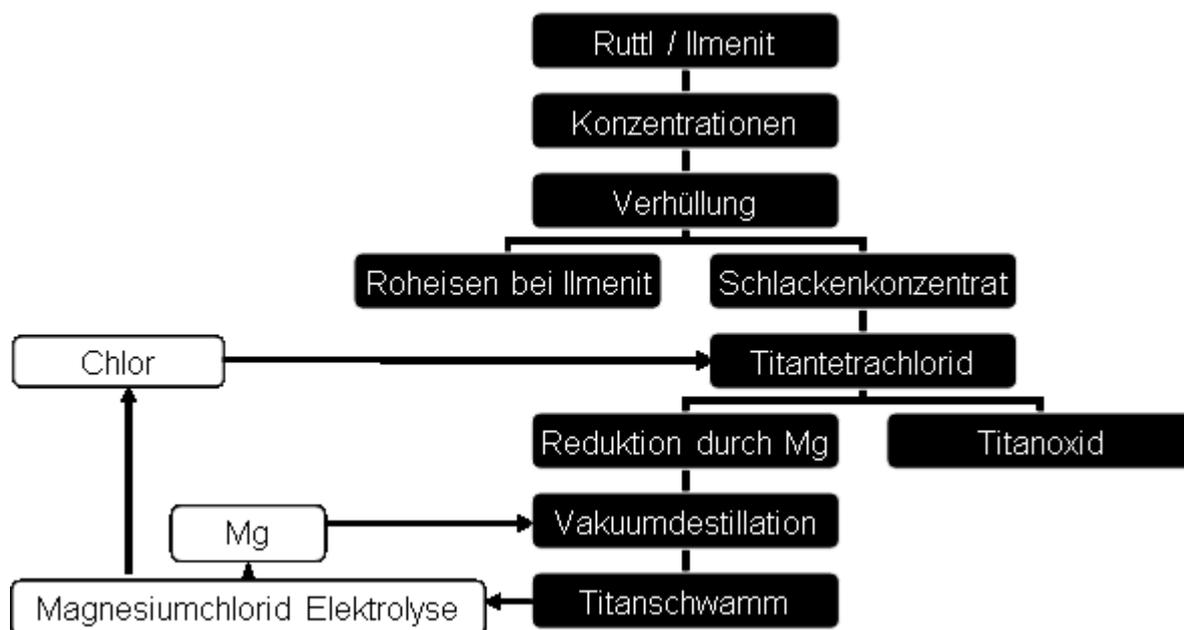


Abbildung 14: Erweiterter Kroll-Prozess zur Herstellung von Titanschwamm

Bei diesem Prozess wird TiO_2 in mehreren Schritten zu TiCl_4 umgewandelt. Die Endreduktion erfolgt mit Magnesium. Die dabei verbleibenden Rückstände von Mg und MgCl_2 werden durch Vakuumdestillation aus dem TiCl_4 herausgelöst. Als Endprodukt

bleibt der sogenannte Titanschwamm, dessen Reinheit von der Menge an Verunreinigungen (z. B. Mg) bestimmt wird. Die Zunahme des Anteils an Verunreinigungen hat den Anstieg der Brinellhärte von $TiCl_4$ zur Folge.

Zum Schluss wird der Titanschwammkuchen mechanisch aus dem Reaktionsgefäß entfernt und zerkleinert. Hierzu werden zunächst in der Grobstufe mit Hilfe einer Guillotine grobe Stücke vom Schwammkuchen abgetrennt und anschließend in der Feinstufe zwischen rotierenden Walzen zerkleinert.



Abbildung 15: Titanschwammkuchen [2] und zerkleinerter Titanschwamm [3]

Titanschwamm stellt die Ausgangsbasis für die Herstellung jeglicher Halbzeugfabrikate auf Titanbasis dar, aber auch zur Auflegung von titanstabilisierten Edelstahlsorten.

2.4.3. Herstellung von Titaningot

Aufgrund der Morphologie des Schwammes und zur Einstellung von Legierungszusammensetzungen ist ein Umschmelzen notwendig. Dabei werden aus dem Titanschwamm zudem leicht flüchtige Reduktionsrückstände (z. B. Chloride) beseitigt.

Der Schmelzvorgang liefert je nach Schmelzverfahren ein Produkt in Guss-, Block- und/oder Brammenform mit geforderter Homogenität.

Bei den Schmelzverfahren ist zwischen dem Vakuumlichtbogenofen (VAR), dem „Cold-Hearth-Melters“-Verfahren und dem „Skull-Melters“-Verfahren zu unterscheiden.

Vakuumlichtbogenofen (VAR)

Zu Beginn wird der Schwamm vorverdichtet, es entstehen sogenannte „Compacts“, aus denen die zur Schmelze vorgesehenen Elektroden zusammengesetzt werden. Für Titanlegierungen ist der entsprechende Gehalt von Legierungselementen in Form von Vorlegierungen oder elementar diesen Compacts zu zugeben. Es können durchaus auch kleinstückige Schrotte beigemischt werden.

Wegen der hohen Sauerstoffaffinität des Titans werden die Compacts in einer Plasmaschweißanlage unter Argon-Schutzgasatmosphäre zur Elektrode zusammengeführt. Dies ist erforderlich, damit sich das beim Schweißen auf über Schmelztemperatur erhitzte Titan nicht mit dem Luftsauerstoff zu TiO_2 verbindet.

Im klassischen Fall wird die entstandene Elektrode im Vakuumlichtbogenofen mindestens zweimal umgeschmolzen. Zwischen der Elektrode und dem mit Zündspänen versehenen wassergekühlten Tiegelboden wird ein Lichtbogen gezündet. Aufgrund dieser Wärmeenergie schmilzt die Elektrode tropfenförmig ab. Das Schmelzbad wird wassergekühlt und es bildet sich im Tiegel der gewünschte Block bzw. Ingot.

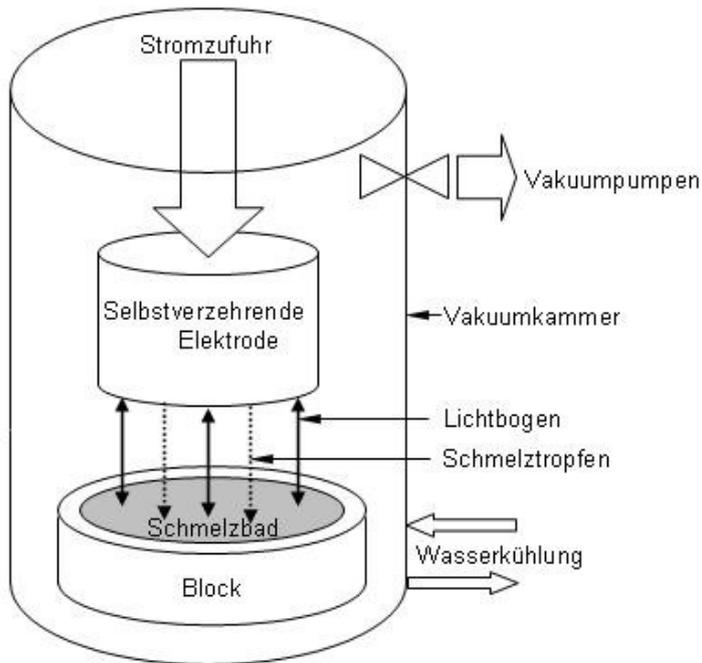


Abbildung 16: Prinzipskizze eines Vakuumlichtbogenofens

Das „Cold-Hearth-Melters“- und „Skull-Melters“-Verfahren sind als Weiterentwicklungen im Bereich der Schmelztechnologien zu nennen.

Beide Verfahren werden hauptsächlich für hohe Schrotteinsätze (bis zu 100%) verwendet. Des Weiteren bieten diese die Möglichkeit, brammenförmige Formate zu erschmelzen. Als Wärmequelle werden bei dem „Cold-Hearth-Melters“-Prinzip Elektrodenstrahl- bzw. Plasmakanonen eingesetzt. Die klassische Lichtbogentechnologie kommt beim „Skull-Melters“-Verfahren zum Einsatz.

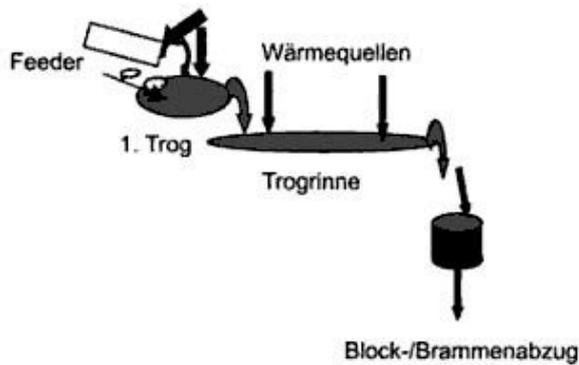


Abbildung 17: Prinzipskizze eines "Cold-Hearth-Melters"-Prozesses [4]

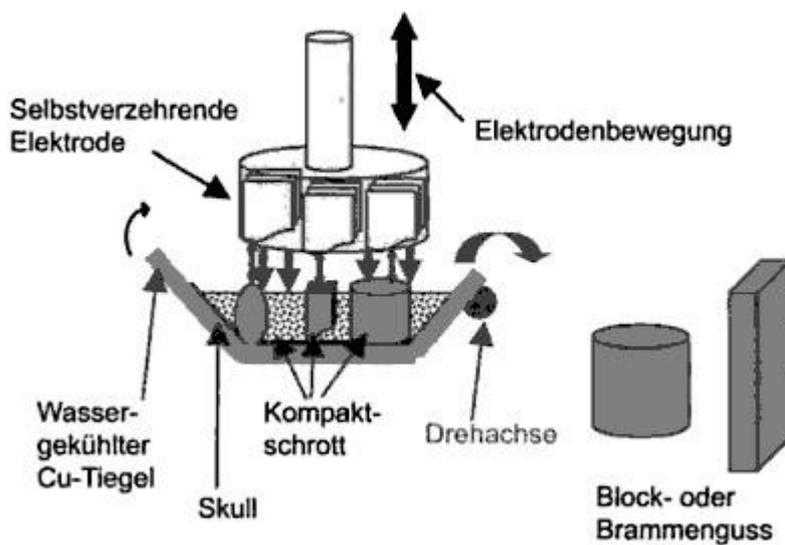


Abbildung 18: Prinzipskizze eines "Skull-Melters"-Prozesses [5]

2.4.4. Herstellung von Titanbillet

Anschließend wird der zylindrische Ingotblock auf Freiformschmiedpressen und/oder Radialumformmaschinen zu Vormaterialstangen bzw. Billets umgeformt, d.h. der Ingot wird gestaucht und gereckt. Das Schmieden erfolgt abwechselnd oberhalb und unterhalb der β -Umwandlungstemperatur, um die Gussstruktur aufzubrechen und ein möglichst feinkörniges globulares ($\alpha + \beta$)-Gefüge zu erhalten. Die Einstellung des benötigten Enddurchmessers für das spätere Freiform- oder Gesenkschmieden kann im letzten α/β -Umformschritt eingestellt werden.

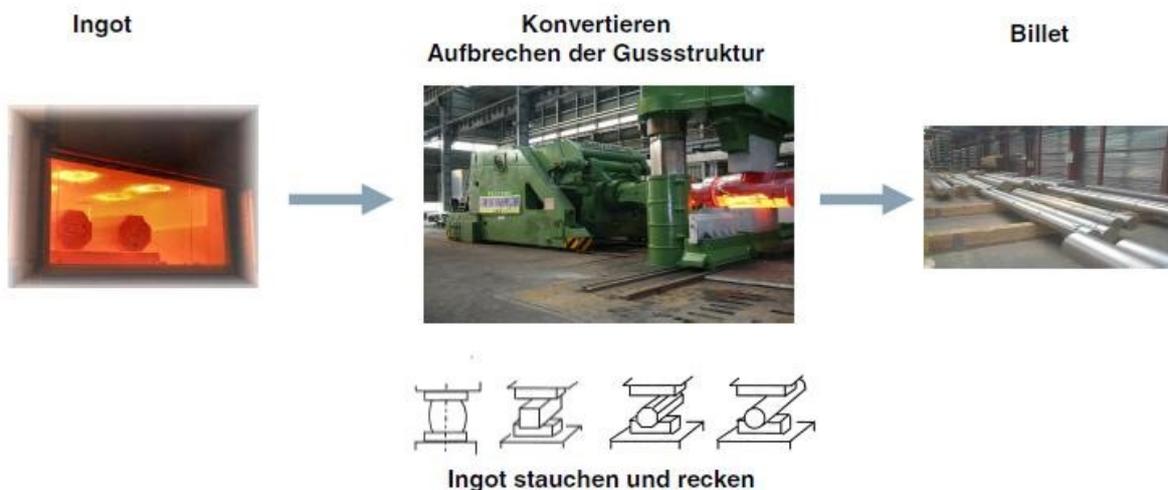


Abbildung 19: schematische Darstellung des Herstellungsprozess vom Ingot zum Billet [6]

Diese thermomechanische Behandlung im Vormaterialwerk beeinflusst wesentlich die späteren Eigenschaften.

Als Weiterverarbeitungsprozess nach dieser Billetherstellung folgt i. d. R. der Schmiedeprozess.

2.4.5. Fehler und geeignete Prüfverfahren

Bei der Herstellung von Titanbillets kann es zu Seigerungen, Einschlüssen oder auch Lunkern kommen. Um die Qualität sicherstellen zu können, bedarf es diese Schmelzfehler durch geeignete Prüfverfahren erkenntlich zu machen. Dabei findet vor allem die Ultraschallprüfung ihre Anwendung.

2.4.6. Anwendungen im Triebwerksbau

Die Gewichtsersparnis, galvanische Kompatibilität, wie auch die Korrosionsbeständigkeit des Titans sind nur einige Eigenschaften, die den Einsatz dieses Werkstoffes in der Luftfahrt ansteigen lassen.

Derzeit werden Titanlegierungen, z. B. Ti64, Ti6242 und Ti6246, im thermisch gering belasteten Verdichterbereich (ca. 600°C) eingesetzt.

Zukünftig sollen Nickelschaufeln in den letzten Stufen im Turbinenbereich (ca. 800°C) durch leichtere Schaufeln mit intermetallischen Phasen, z. B. TiAl (Titanaluminid), ausgetauscht werden. Die höhere Warmfestigkeit gegenüber den „normalen“ Titanlegierungen ermöglicht den Einsatz dieser neuen Schaufeln in dem hinteren Bereich der Niederdruckturbinen. Zur Herstellung dieser TiAl-Schaufler werden Billets als Rohmaterial verwendet.

Die MTU Aero Engines plant zukünftig an die Titanbilletherstellung einen Schmiedeprozess anzuschließen und diese Teile anschließend weiterzubearbeiten. Hiermit wird das obengenannte Ziel verfolgt, Nickelschaufler durch TiAl-Schaufler auszutauschen.

Quellenangaben:

M. Peters und C. Leyens: Titan und Titanlegierungen, WILEY-VCH Verlag, 2002

<http://andy-reiche.de/Download/Herstellung%20von%20Titan.pdf>

E. Moeller: Handbuch Konstruktionswerkstoffe, Carl Hanser Verlag, 2008

W. Buchmann und R. Michl: TL-University_Titan-Vortrag.pdf

[1], [4], [5] M. Peters und C. Leyens: Titan und Titanlegierungen, WILEY-VCH Verlag, 2002

[2], [3], [6] W. Buchmann und R. Michl: TL-University_Titan-Vortrag.pdf

2.5. Schweißen

2.5.1. Grundlagen

Gemäß DIN-Norm 1910-100 Teil1 versteht man unter Schweißen die Verbindung von Bauteilen unter Anwendung von Druck oder Wärme mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff. Dabei wird der Grundwerkstoff in der Regel aufgeschmolzen und nach Erhaltung entsteht ein unlösbarer Verbund.

Man unterscheidet zwei verschiedene Arten des Schweißens, zum einen das Verbindungsschweißen und zum anderen das Auftragsschweißen. Letzteres kommt im Bereich der Beschichtung zum Einsatz und wird in diesem Kapitel nicht behandelt. Nachfolgend wird auf die unterschiedlichen Fügearten des Verbindungsschweißens eingegangen.

2.5.2. Schweißverfahren

In der Luft- und Raumfahrt werden überwiegend nachfolgende Schweißverfahren eingesetzt.

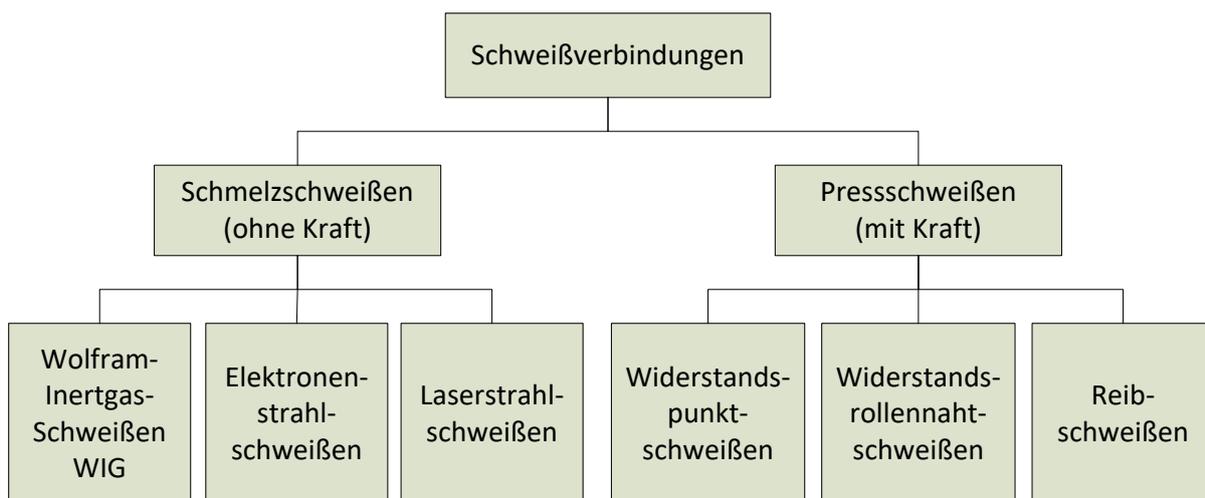


Abbildung 20: Übersicht über die Schweißverfahren

Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)

Der Lichtbogen brennt zwischen einer nichtabschmelzenden Wolframelektrode und dem Bauteil. Als Schutzgas werden die inerten Gase Helium oder Argon verwendet, diese schützen den Schweißvorgang vor Luftzutritt und somit vor Oxidation der Werkstückoberfläche. Der Schweißzusatz wird über einen getrennten Zusatzstab zugeführt.

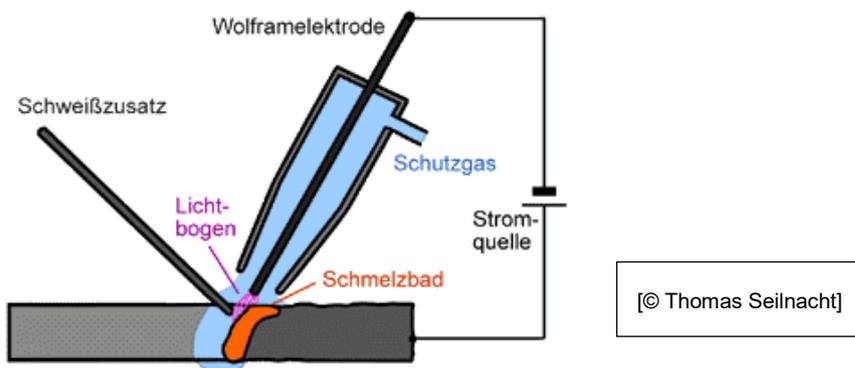


Abbildung 21: WIG-Schweißen [1]

Verfahrensmerkmale:

- für fast alle Metalle geeignet, inklusive Aluminium
- abhängig vom Material sind Blechstärken von 0,1mm bis mehrere mm schweißbar
- hohe Schweißnahtgüte

Elektronenstrahlschweißen

Durch das Beschleunigen von Elektronen in einer Vakuumkammer trifft ein gebündelter Elektronenstrahl auf das Werkstück. Die kinetische Energie des Elektronenstrahls wird beim Auftreffen auf das Werkstück in thermische Energie umgewandelt und schmilzt somit den Werkstoff auf. Durch Bündelung des Elektronenstrahls auf Brennfleckdurchmesser unter 0,1mm begrenzte örtliche Erhitzung mit großer Tiefenwirkung.

Die ganze Anordnung muss sich im Vakuum befinden oder der Schweißvorgang findet unter Schutzgas statt. Dadurch werden Energieverluste, die durch die Ionisation der Luft entstehen würden, minimiert.

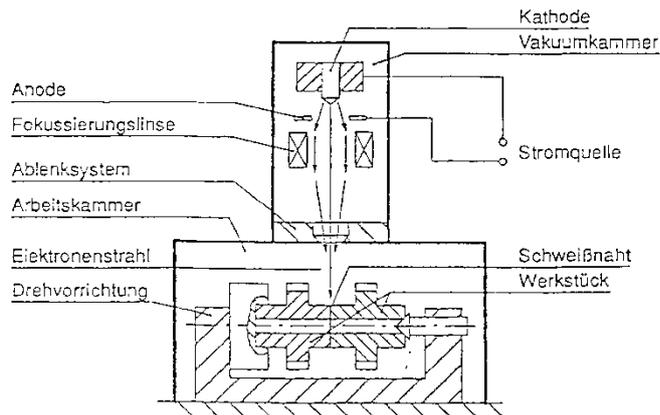


Abbildung 22: Elektronenstrahlschweißen

Verfahrensmerkmale:

- nur elektrisch leitfähige Werkstoffe können mit dem Elektronenstrahl bearbeitet werden
- geringer Verzug des Bauteils durch schmale Wärmeeinbringzone
- durch das Schweißen im Vakuum kommt es zu einer besonderen Reinheit der Schweißnaht

Laserstrahlschweißen (LA)

Ein in einem Festkörper oder Gas-Laser erzeugter Laserstrahl erwärmt bzw. schmilzt nach Fokussierung das Werkstück an der Schweißstelle auf. Zum Schutz des Schweißgutes wird ein Schutzgas durch eine Düse auf die Schweißstelle geleitet.

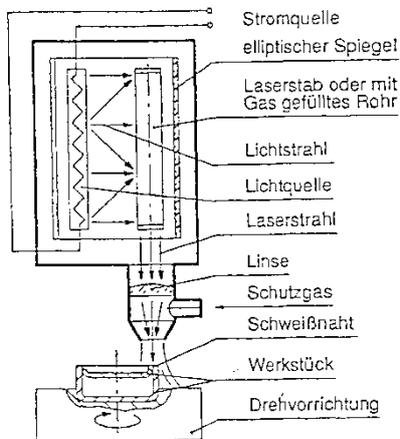


Abbildung 23: Laserstrahlschweißen

Verfahrensmerkmale:

- großes Tiefen zu Breiten-Verhältnis der Schweißnaht bis 10:1 möglich
- geringer Verzug des Bauteils durch schmale Wärmeeinbringzone
- sehr gut automatisierbar

Widerstands- Punktschweißen (RP)

Beim Widerstands-Punktschweißen werden dünne aufeinanderliegende Bleche mit einzelnen Schweißpunkten verbunden. Dabei werden die Bleche durch zwei Elektroden zusammengedrückt. Kurzzeitig fließt ein hoher Strom von der einen Elektrode durch die Bleche zur anderen Elektrode. Durch den hohen elektrischen Widerstand wird die erforderliche Schweißtemperatur erreicht. Die erforderliche Schweißtemperatur ist über die Parameter Kraft, Strom und Schweißzeit einzustellen.

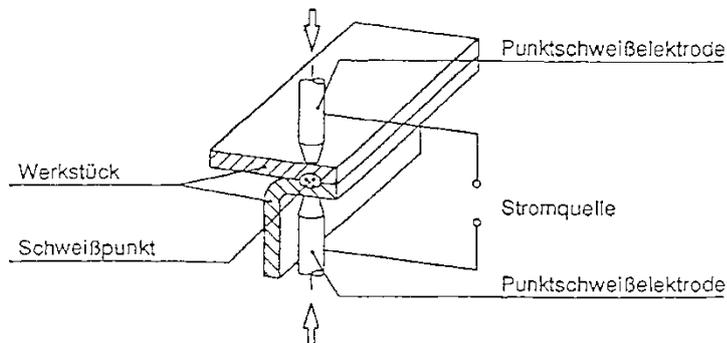


Abbildung 24: Widerstands-Punktschweißen

Verfahrensmerkmale:

- Blechdickenverhältnis nicht größer als 4:1
- geringer Schweißverzug
- verschweißen von gleichartigen Materialien

Widerstands- Rollennahtschweißen (RR)

Dieses Verfahren unterscheidet sich vom Widerstands-Punktschweißen nur durch die eingesetzten Elektroden. Bei dem RR werde zwei gegenüberliegende Rollenelektroden eingesetzt, die eine „punktförmige“ Schweißnaht erzeugen. Die Punkte werden so dicht gesetzt, dass sie sich selbst überlagern und damit eine Steppnaht ergeben.

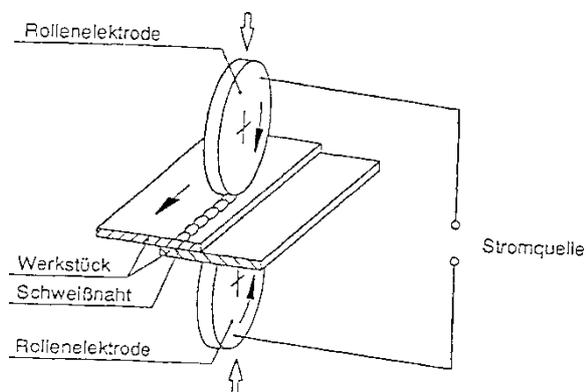


Abbildung 25: Widerstands-Rollnahtschweißen

Verfahrensmerkmale:

- ununterbrochene Naht (Steppnaht)
- geringer Schweißverzug
- Blechdickenverhältnis nicht größer als 4:1

Reibschweißen

Man spricht beim Reibschweißen meist von einem Schmieden im weitesten Sinne, da die Verbindung nicht über die schmelzflüssige Phase, welche für das Schweißen typisch ist, erreicht wird, sondern über Reibung und Druck unterhalb der Schmelztemperatur. Die durch die Reibung entstehende Wärme wird zum Schweißen bzw. Fügen der Werkstoffe genutzt. Hierzu wird eines der zu verbindenden Bauteile in Drehung versetzt und gegen das andere Bauteil gedrückt. Die Bauteile werden unterhalb der Schmelztemperatur erwärmt. Innerhalb von Sekunden erreicht der Werkstoff diesen plastischen Zustand. Daraufhin wird das drehende Bauteil gestoppt und beide Bauteile gegeneinander gedrückt.

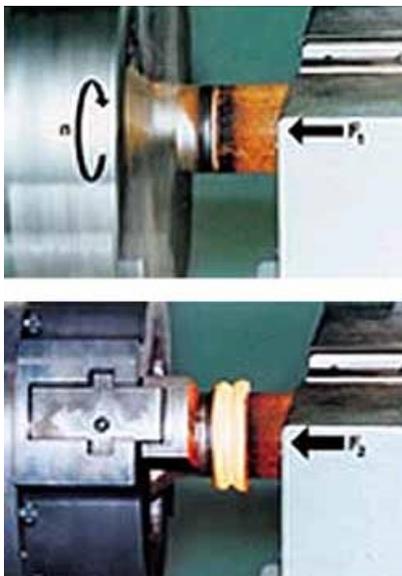


Abbildung 26: Reibschweißen [2]

Verfahrensmerkmale:

- Verbinden verschiedener Materialien ohne Zusatzwerkstoff
- hauptsächlich Verschweißen von rotationssymmetrischen Teilen
- Verbinden von schweißempfindlichen Werkstoffen möglich

2.5.3. Probleme beim Schweißen der unterschiedlichen Werkstoffe

Im Folgenden wird auf die Schweißproblematik der wichtigsten Werkstoffe Aluminium, Titan, Stahl, Nickel und deren Legierungen innerhalb des Flugzeugbaus hingewiesen.

Aluminium

Nach wie vor ist Aluminium mit seinen zahlreichen Legierungen wegen seines günstigen Verhältnisses von Festigkeit zu Dichte sowie des günstigen Anschaffungspreises als der dominierende Werkstoff anzusehen. Leider lassen sich seine metallurgischen Eigenschaften nicht leicht zum Positiven modifizieren. Bekannte Probleme sind:

- hochschmelzende Oxidhaut
- Porenbildung an der Werkstoffoberfläche sowie im Inneren
- hohe Wärmeleitfähigkeit
- Neigung zu Heißrissen bei bestimmten Legierungsanteilen

Abhängig vom Schweißverfahren und der Schweißaufgabe ist ein mehr oder weniger großer Aufwand zur Vorbereitung der Fügeteile notwendig. Beispielsweise vermindert die dünne, nicht elektrisch leitende Oxidschicht die Schweißseignung von Aluminium. Um ein gutes Schweißergebnis zu erhalten, sollte deshalb eine Vorbehandlung, welche die Entfernung dieser Schicht auf der Oberfläche vorsieht, erfolgen.

Titan und –Legierungen

Generell ist Titan ein gut schweißbarer Werkstoff, solange bestimmte Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden.

Bekannte Problematiken beim Titanschweißen sind vor allem:

- Gasaufnahme

- Porenbildung

Die Empfindlichkeit Titans zur Gasaufnahme lässt das Hauptaugenmerk beim Schweißen auf einen entsprechenden Gasschutz richten. Wasserstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffeinschlüsse würden die Eigenschaften des Werkstoffes negativ beeinflussen. Beispielsweise muss beim Verfärben des Nahtbereichs eine schädliche Gasaufnahme angenommen werden.

Stähle

Im moderne Flugzeugbau sind geschweißte Stähle selten zu finden.

Niedriglegierte Stähle verlangen teilweise definiertes Wärmeführen beim Schweißen, um zum einen Risse zu vermeiden und zum anderen hohe Endfestigkeiten ohne Wärmebehandlungen zu erreichen. Manche Stähle lassen sich nur im lösungsgeglühten Zustand verarbeiten und sind nach den Endarbeiten wärmezubehandeln.

Nickel

Im Allgemeinen gilt Nickel als gut schweißbarer Werkstoff. Entsprechend nach DIN EN ISO 4063 wurde festgelegt, dass Nickel und dessen Legierungen mit den nachfolgenden Schmelzschweißverfahren „problemlos“ schweißbar ist.

- Lichtbogenhandschweißen mit umhüllter Stabelektrode (LBH)
- WIG
- MIG und MAG
- Wolfram-Plasmaschweißen
- Unterpulverschweißen
- Laserschweißen

Bei der Schweißnahtvorbereitung ist vor allem auf die beiden werkstoffspezifischen Eigenschaften – geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Wärmeausdehnung - zu achten. Die Wurzelspalte bzw. Stegabstände sind somit entsprechend den Ausdehnungs- und Schrumpungsreaktionen dieses Werkstoffes vorzubereiten.

Zudem muss aufgrund der hohen Viskosität und der starken Erstarrungsschrumpfung der Nickelschmelze mit größeren Nahtöffnungswinkeln gearbeitet werden.

Wurde das Nickel-Bauteil kaltverformt, beispielsweise durch Abkanten, Biegen oder Tiefziehen, muss das Teil vor der Schweißung weichgeglüht werden.

Des Weiteren stellen niedrigschmelzende Verunreinigung im Nickel eine erhöhte Gefahr für extreme Heißrissigkeit und/oder Versprödung bei höheren Temperaturen dar. Daraus lässt sich schließen, dass beim Schweißen von Nickel hohe Anforderungen an die Sauberkeit des Werkstoffes gestellt werden. Bereits geringste Mengen von beispielsweise Pb, P, Cb, Zn, Sn, B oder S führen zu den obengenannten Schäden.

2.5.4. Geeignete Prüfverfahren

Zur Sicherstellung einer ordnungsgemäß ausgeführten Schweißnaht sind nachfolgende zerstörungsfreie Prüfverfahren geeignet:

- Röntgen
- Risseindringprüfung
- Sichtprüfung

Bei überdrehten Schweißverbindungen ist ebenfalls die Prüfung durch Ultraschall oder Wirbelstrom möglich.

2.5.5. Vor- und Nachteile des Schweißens

Vorteile:

- Werkstoff- und Gewichtseinsparung
- keine Werkstoffschwächung durch Bohrungen

Nachteile:

- Gefügeänderung in der Schweißzone (Gussgefüge)
- Verzug und Schrumpfungen am Bauteil durch örtliche Erwärmung

- Schweißspannungen, die ggf. ein nachfolgendes Spannungsarmglühen erfordern

2.5.6. Anwendungen in der Luftfahrt

Reintitan und Titanlegierungen werden im Flugzeugbau vielfach geschweißt.

Beispielsweise werden in der MTU Aero Engines in München Verdichterrotoren von PW6000, EJ200 und TP400-D6 verschweißt oder auch, wie in Abbildung 27 gezeigt, der Verdichterläufer für das CF6 Triebwerk. Die Einzelteile werden mittels Reibschweißen miteinander verbunden und bilden somit den Verdichterläufer. Die dafür eingesetzte Reibschweißmaschine besitzt einen max. möglichen Stauchdruck von 1.000 Tonnen und ist im Besitz der MTU Aero Engines.



Abbildung 27: Verdichter-Läufer (CF6 Stufe 3-9) [3]

Das Schweißen von Aluminium und -legierungen hingegen beschränkt sich auf wenige Anwendungsfälle. Gründe sind die ungenügende Schweißbarkeit der bisher verwendeten hochfesten Al-Legierungen und die hohen Anforderungen an die Sicherheit im Flugwesen.

Quellenangaben:

Koether R./ Rau W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2005

G. Schulze: Die Metallurgie des Schweißens, 3. Auflage, Springer, 2004

U. Heubner, J. Klöwer: Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle, 3. Auflage, Expert-Verlag, 2008

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

[1] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/tnwig.gif>

[2] <http://www.xpertgate.de/produkte/Reibschweissmaschinen.html>

[3] MTU Intranet

2.6. Löten

2.6.1. Grundlagen

Das Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen. Genauer gesagt, ein komplizierter physikalischer - chemischer Prozess, bei dem durch Diffusion zwischen dem zu lötenden festen Werkstoff und dem geschmolzenen Zusatzwerkstoff eine unlösliche Verbindung entsteht. Unter Diffusion versteht man die Wanderung von Atomen, Ionen oder Molekülen in festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen.

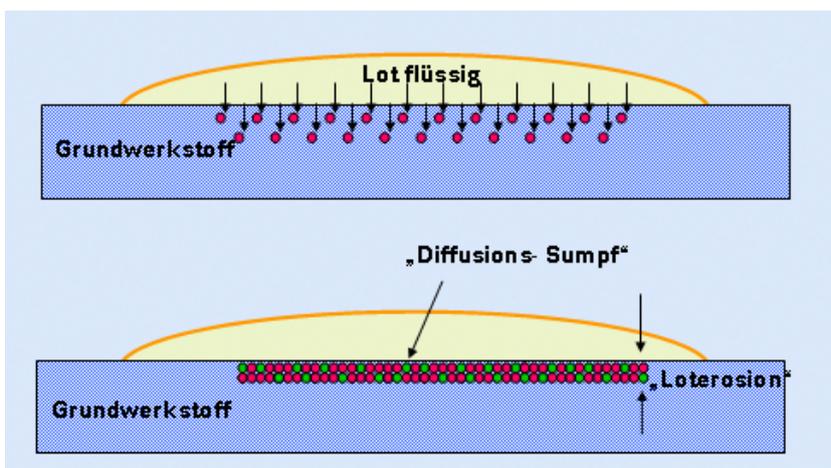


Abbildung 28: Diffusionsvorgang während des Lötens [1]

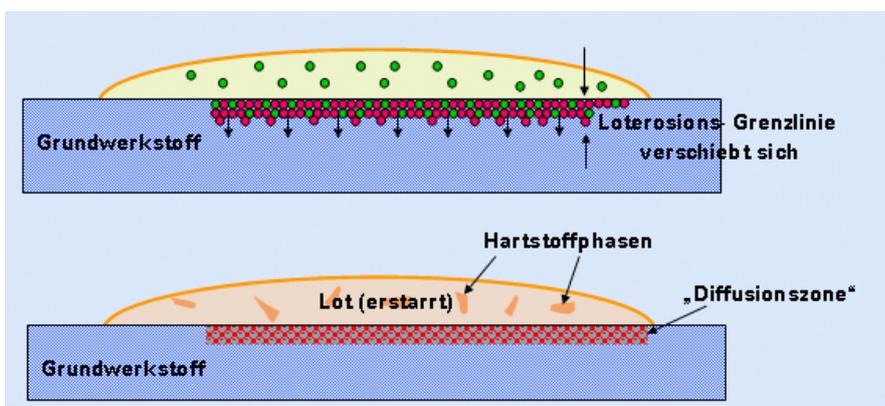


Abbildung 29: Schematische Darstellung der Diffusionszone [2]

Abhängig von der Arbeitstemperatur, die unterhalb der Solidustemperatur des zu verbindenden Werkstoffes liegt, unterscheidet man Weichlöten, Hartlöten und Hochtemperaturlöten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ab einer bestimmten Temperatur nicht mehr mit Flussmittel gearbeitet werden kann.

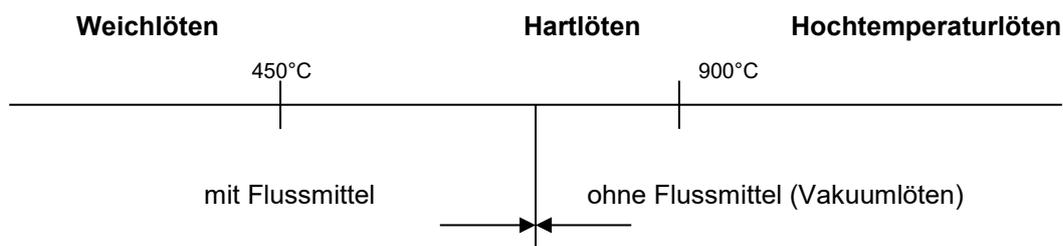


Abbildung 30: Solidustemperaturen

Lote bestehen in der Regel aus geeigneten Legierungskomponenten, deren Schmelzpunkt unter dem Schmelzpunkt der zu verbindenden Werkstücke liegt.

Sie sind als Drähte, Bänder, Stäbe, Folien, Pulver oder Pasten erhältlich.

Ausreichende Benetzung und Fließen des Lotes setzen metallisch blanke Oberflächen voraus. Dies kann durch Schleifen und Feinstdrehen erreicht werden. Abschließend muss sorgfältig gereinigt werden.

Die folgenden Bilder zeigen keine Benetzung bis hin zu guter Benetzung.

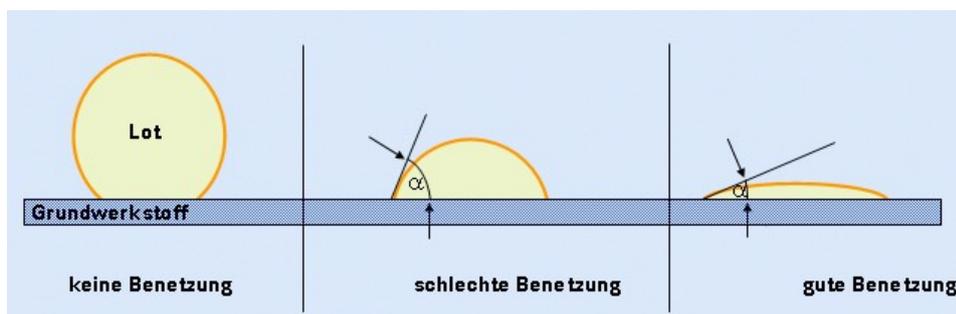


Abbildung 31: Benetzung des Grundwerkstoffes [3]

Hauptursachen für schlechte Benetzung sind:

- Mangelnde bzw. falsche Erwärmung

- Ungeeignetes Lot
- Oxide und Verunreinigungen

Bei der Konstruktion einer Lötverbindung müssen einige Randbedingungen im Vorfeld ermittelt werden:

Einsatz der Lötverbindung:

- Einsatztemperatur
- Festigkeitsanforderungen (statisch/ dynamisch)
- Korrosive Belastung

Randbedingen, die sofort zu klären sind:

- Lötspalt, Toleranzen
- Mehrstufige Lötung erforderlich
- Ausdehnungsverhalten der Bauteile
- Kosten des Lotes

2.6.2. Lötverfahren

Im folgenden Abschnitt soll auf die gängigen Lötverfahren kurz eingegangen werden.

Zu diesen gehören:

- Flammlöten
- Induktionslöten
- Ofenlöten
- Hochtemperaturlöten

Flammlöten

Als Wärmequelle beim Flammlöten dient ein gasbeheizter Brenner. Zur Erwärmung benötigt man ein Brenngas-Luft oder Brenngas-Sauerstoff-Gemisch.

In der Regel wird ein Schweißbrenner mit einer sehr heißen Acetylen-Sauerstoff-Flamme benutzt. Je nach Lötaufgabe ist die Flamme neutral oder leicht reduzierend einzustellen.

Zum Löten muss der Grundwerkstoff an der Lötstelle auf Arbeitstemperatur erwärmt werden. Dabei sollte das Lot nicht mit der Flamme in Berührung kommen. Die zum Schmelzen benötigte Wärme liefert das erhitzte Werkstück.

Induktionslöten

Die Induktionserwärmung wird vor allem dann angewandt, wenn es darum geht, einen festgelegten Bereich schonend zu erwärmen. Wesentliches Merkmal der Induktionserwärmung ist die direkte Wärmezeugung im Werkstück.

Im Generator wird Wechselspannung erzeugt, in einem Transformator umgesetzt und anschließend dem Lötinduktor zugeführt. Der den Induktor durchfließende Wechselstrom lässt ein Magnetfeld entstehen, das im Werkstück Wirbelströme erzeugt. Diese bewirken im Werkstück die Erwärmung auf Löttemperatur. Induktor und Werkstück berühren sich dabei nicht.

Ofenlöten

Ein wesentliches Merkmal beim Ofenlöten ist, dass die Erwärmung auf Löttemperatur sowie die nachfolgende Abkühlung auf Raumtemperatur oder kurz darüber, unter kontrollierter Atmosphäre erfolgt. Dazu werden die zu lötenden Werkstücke sowie das Lot in den Ofen gebracht. Zuvor müssen die Teile in einer Vorrichtung fixiert werden. Heftschweißpunkte können hierbei wertvolle Hilfe leisten. Beim Ofenlöten unterscheidet man zwischen dem Löten unter Schutzgas und dem Löten unter Vakuum. Zur Erzielung einer kontrollierten Atmosphäre muss der Luftsauerstoff mit Hilfe eines Schutzgases aus der Ofenkammer verdrängt werden. Im anderen Falle erfolgt die Evakuierung durch Abpumpen der Luft.

Hochtemperaturlöten

Das Hochtemperaturlöten (HT) erfolgt bei Temperaturen über 900°C. Zur Sicherstellung einer lötgerechten Umgebung findet der Lötprozess in Öfen statt. Hierbei werden die zu lötenden Werkstücke sowie das Lot in einem Ofenraum auf die erforderliche Löttemperatur gebracht. Das Aufheizen erfolgt mit großer Gleichmäßigkeit. Durch die Einwirkung einer Vakuum- oder Schutzgasatmosphäre wird die bei der Erwärmung einsetzende Oxidation im Lötbereich verhindert.

Der große Vorteil des HT-Lötens unter Vakuum wird dort sichtbar, wo es darum geht, solche Werkstoffe zu löten, deren Metalloxide eine Benetzung des flüssigen Lotes unmöglich machen. Dies sind die stabilen Metalloxide wie Titanoxid, Zinkoxid und Aluminiumoxid, die sich in reduzierten Schutzgasen nicht auflösen.

Da bei diesem Lötverfahren kein Flussmittel zum Einsatz kommt, entstehen in der Regel fehlerfreie Lötverbindungen. Wegen der hohen Sauberkeit der Löt Nähte ist eine chemische oder mechanische Nachbehandlung nicht erforderlich.

Charakteristische Verfahrensparameter des Hochtemperaturlötens zusammengefasst:

- Löten im Vakuum (10^{-2} bis 10^{-4} Pa) oder in Schutzgas (Ar, N₂, H₂)
- Schutzgas: Verwendung von Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 900°C liegen und denen, die Komponenten mit niedrigem Dampfdruck haben.
- kein Flussmittel mehr möglich

2.6.3. Reparatur und Prüfung

Eine Reparatur (auch Nachlöten genannt) ist nur zulässig, wenn dies in den Unterlagen festgelegt ist. Eine gesonderte Löt- bzw. Reparaturanleitung muss zu diesem Zwecke erstellt werden.

Lötverbindungen können bzw. müssen zerstörend oder zerstörungsfrei geprüft werden. Bei der zerstörenden Prüfung findet überwiegend die Schliiff-Lichtmikroskopie ihren Einsatz. Röntgen, Risseindringprüfung, Ultraschall oder Thermographie dienen der zerstörungsfreien Überprüfung der Lötverbindung.

2.6.4. Vor- und Nachteile des Lötens

Vorteile:

- Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe, beispielsweise auch nichtmetallischer Werkstoffe
- große Fügeflächen realisierbar (mit Lotfolien)
- geringer Verzug und geringe Gefügeänderung des Bauteils durch moderate und homogene Wärmeeinbringung
- gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit der Lötnaht

Nachteile:

- Korrosionsgefahr durch Potenzialunterschiede zwischen Lot und Grundwerkstoff
- Festigkeitseinbußen der Lötverbindungen bei hohen Temperaturen
- Werkstücke müssen genau definiertes Spaltmaß für die Kapillarwirkung haben (> Fließgeschwindigkeit des Lotes)

2.6.5. Anwendungen im Triebwerksbau

Das Lötens (vor allem das Hochtemperaturlöten) findet in einem Triebwerk viele Anwendungsgebiete. Bei der MTU Aero Engines in München werden beispielsweise die Segmente der Leitschaufeln (Abbildung 31) und die Spitzenpanzerung der Laufschaufel der Stufen 1 bis 4 gelötet. Dieses Fügeverfahren findet des weiteren Einsatz beim Verbinden der Waben am Innendeckband von Leitschaufelsegmenten (Abbildung 32) sowie beim Zusammenfügen von diversen Leitungen.

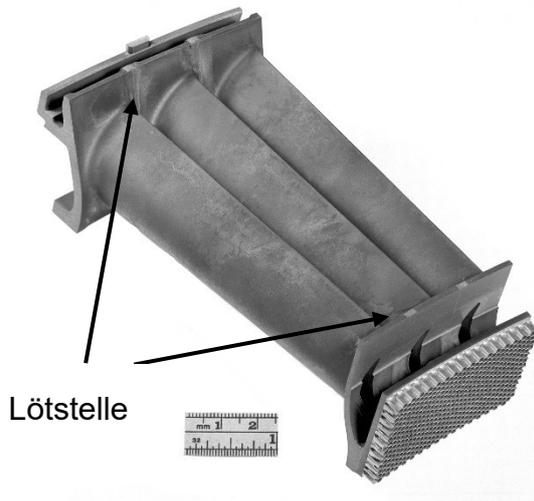


Abbildung 32: Zusammengelötetes Leitschaufelsegment mit Waben [4]

Quellenangaben:

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

Koether R./ Rau W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2005

Dr. U. Knott: Schulung Lötten MTU Polska 2010.ppt, 24.08.2010

[1], [2], [3], [4]: Dr. U. Knott: Schulung Lötten MTU Polska 2010.ppt, 24.08.2010

2.7. Kleben

2.7.1. Grundlagen

Beim Kleben werden gleiche oder verschiedenartige Stoffe durch die Oberflächenhaftung geeigneter Klebstoffe miteinander verbunden. Die Verbindung entsteht durch Adhäsions- und Kohäsionskräfte.

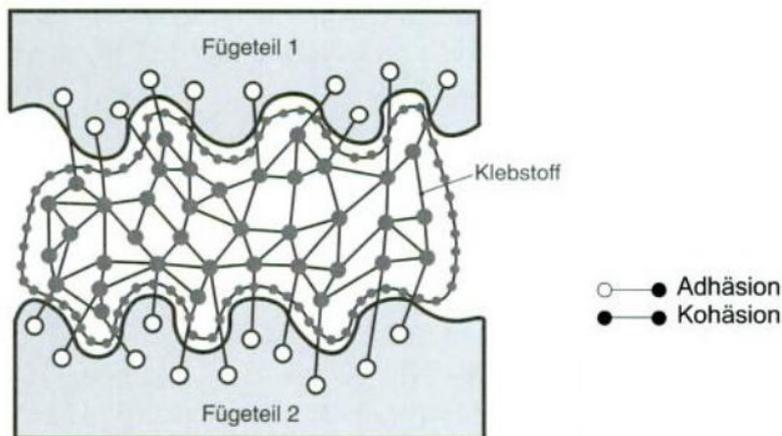


Abbildung 33: Adhäsions- und Kohäsionskräfte bei einer Klebeverbindung [1]

Hohe Adhäsionskräfte können nur dann erzielt werden, wenn die Klebeflächen trocken, sauber und fettfrei sind. Außerdem sollen die Klebeflächen leicht aufgeraut sein. Am besten ist es, wenn die Klebeverbindung auf Abscherung und nur im geringen Maß auf Zug beansprucht wird. Schäl- und Biegebeanspruchungen sind nicht zulässig.

2.7.2. Klebstoffarten

- Schmelzklebstoffe: Die Erstarrung tritt allein durch Abkühlung ein.
- Nassklebstoffe: Der Kleber härtet durch Verdunsten des Lösungsmittels aus.
- Reaktionsklebstoffe: Durch eine chemische Reaktion härtet der Kleber aus. Abhängig von der Zusammensetzung werden sie in Ein- und Zweikomponentenkleber unterteilt.

2.7.3. Klebefehler

Das Kleben ist ein hochkomplexes Fügeverfahren, für das sehr viel Know-how und Erfahrung erforderlich ist. Wie bei jedem anderen Fertigungsverfahren können auch hier diverse Fehler auftreten. Beispielsweise sind hier Bondline-Korrosion und Kissing-Bonds zu nennen.

Bei der Bondline-Korrosion diffundieren Chloride unter Feuchtigkeitseinfluss in die Klebefuge ein. Die Folge ist die Grenzflächenkorrosion, eine der gefährlichsten adhäsiven Schadensformen. Dabei wird die adhäsive Bindung zwischen Fügepart und Kleber zerstört. Diese Bondline-Korrosion wird durch ungeschützte bzw. stark verletzte Bauteilkanten und Bohrungen begünstigt.

Unter Kissing Bonds ist die stellenweise Verklebung bzw. nicht Verklebung zu verstehen. Dadurch kann keine Adhäsion zwischen dem Fügepart und Kleber stattfinden.

2.7.4. Prüfung der Fügeverbindung

Zu den gängigsten zerstörenden Prüfverfahren zählt der Zug- und Scherversuch, doch auch mit dem Schälversuch können Klebeverbindungen überprüft werden.

Die Thermografie, Shearografie wie auch Ultraschall werden zur zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt.

2.7.5. Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe
- keine Gefügeänderung
- dichte Verbindungen
- Schwingungsdämpfung
- Verbindung von hitze- bzw. wärmeempfindlichen Bauteilen

Nachteile:

- Vorbehandlung, z.B. Entfetten; Reinigen; Aufrauen der Fügeteile
- große Fügeflächen nötig
- Qualitätsprüfung schwierig; meist nur zerstörende Prüfung möglich
- komplizierter Aushärtungsprozess

2.7.6. Anwendungsbeispiele in der Luftfahrt

Im Triebwerk finden Klebeverbindungen beispielsweise bei Dichtungen Verwendung, an denen Metallfilze angebracht werden. Des Weiteren werden die Einlaufbeläge am Fanghäuse geklebt.

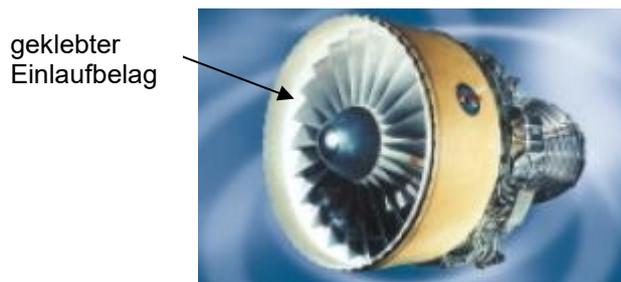


Abbildung 34: PW 4000 [2]

Geklebte Verbindungen am Flugzeug sind vor allem im Rumpfbereich bzw. der Zelle zu finden.

Quellenangaben:

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

Koether R./ Rau W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2005

[1] Koether R./ Rau W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. Auflage, München, Carl Hanser Verlag, 2005

[2] MTU Intranet

2.8. Niete und Schrauben

2.8.1. Grundlagen

Nieten ist ein Fügen durch Umformen eines Verbindungselementes, wobei eine im Allgemeinen unlösbare und überwiegend formschlüssige Verbindung entsteht.

Im Gegensatz zur Nietverbindung handelt es sich bei Schrauben um eine lösbare Verbindung.

2.8.2. Nieten

Generell werden in die zu verbindenden Bauteile Bohrungen eingebracht, die einen etwas größeren Durchmesser als der Niet haben. Der Niet wird hindurch geschoben, sodass dessen Nietschaft über das Bauteil hinaus steht. Mit Hilfe des Nietstempels wird dieser Nietschaft zu einem Schließkopf geformt und es entsteht eine unlösbare Verbindung.

Es wird unterschieden zwischen dem „direkten“ und dem „indirekten“ Nieten.

Das direkte Nieten kommt überwiegend bei harten Nietwerkstoffen zum Einsatz, dabei wird der Nietstempel auf den Nietkopf gepresst. Das „indirekte“ Nieten ist das Standardverfahren, hierbei wird der Nietstempel auf den Nietschaft gedrückt.

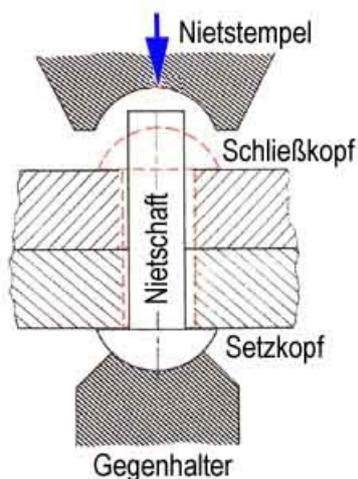


Abbildung 35: Funktionsprinzip Nieten [1]

2.8.3. Nietarten

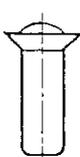
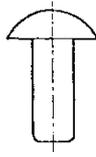
Im Flugzeugbau werden unterschiedliche Arten von Nieten verwendet. Zu ihnen gehören:

- Vollniet
- Passniet
- Blindniet
- Stanzniet

Vollniet

Hergestellt aus unterschiedlichen Al-Legierungen ist der Vollniet das am meisten verwendete Verbindungselement im Flugzeugrumpf, im Leitwerk sowie den Steuer- und Antriebshilfen am Flügel.

Bei dem Vollniet werden zwei unterschiedliche Setzkopfgeometrien verwendet:

100° Senkkopf	Universalkopf
	
Anwendungsgebiet: Flächen mit aerodynamischen bzw. geometrischen Bündigkeitsanforderungen	Anwendungsgebiet: Heckbereich des Rumpfes, Innenstruktur

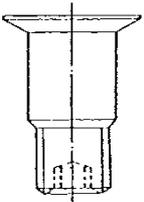
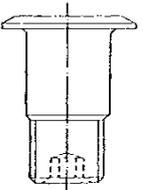
Mit Aluminium-Vollnieten werden Aluminiumbleche und -bauteile mit geringer Gesamtbaueteildicke genietet. Diese Niete werden bei Temperaturen bis 80°C eingesetzt. Das Setzen eines Vollnietes erfolgt überwiegend mit Hilfe der Nietquetsche, d.h. der Kraftschluss wird durch Quetschen des Niefschaftes hergestellt. Des Weiteren findet auch

der Niethammer Verwendung, wenn die Nietquetsche aus Zugänglichkeitsgründen nicht verwendet werden kann.

Passniet

Hergestellt aus der Titan-Legierung Ti6Al4V ist der Passniet das am häufigsten vorkommende, härteste Verbindungselement im Flugzeug.

Wie bei dem Vollniet gibt es auch bei dem Passniet zwei verschiedene Senkkopfgeometrien.

100° Senkkopf	Universalkopf
	
<p>Anwendungsgebiet: Flächen mit aerodynamischen bzw. geometrischen Bündigkeitsanforderungen</p>	<p>Anwendungsgebiet: Innenstruktur</p>

Der Passniet wird ebenfalls zum Nieten von Aluminiumblechen und -bauteilen verwendet; kann aber auch zum Nieten von Mischaufbauten aus Aluminium/Stahl/Titan bei mittlerer bis dicker Bauteildicke verwendet werden. Meist wird eine Presspassung angewendet. Eingesetzt wird der Passniet bei Temperaturen bis 80° C. Die Montage erfolgt entweder per Handratsche oder per Druckluftschrauber.

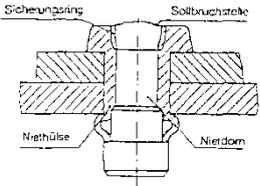
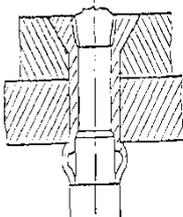
Blindniet

Diese Nietart wird überwiegend für das Herstellen von geschlossenen nicht zugänglichen Strukturen wie z.B. Steuer- und Auftriebshilfen am Flügel verwendet. Der Blindniet ist eine spezielle Form von Niet, welche nur den Zugang zu einer Seite der zu verbindenden Teile erfordert.

Es wird zwischen zwei Funktionsprinzipien bei den Blindnietensystemen unterschieden.

- *Zugblindniet*: Der Schließkopf wird durch Ziehen an einem Zugdorn ausgebildet. Es gibt Zugblindnietensysteme, die beim Setzvorgang zusätzlich die Niethülsen ausweiten, um die Bohrung wie ein Vollniet auszufüllen.
- *Schraubblindniet*: Der Schließkopf wird über das Herausschrauben eines Gewindedornes hergestellt. Der Durchmesser der Niethülse ändert sich nicht.

Auch bei den Blindnieten unterscheidet man zwei verschiedene Arten:

Zugblindniet mit Universalkopf	Schraubblindniet mit Senkkopf
	

Stanzniet

Stanznieten haben gegenüber Voll-, Pass- und Blindnieten den Vorteil, dass das Vorlochen entfällt.

Diese Nieten werden hauptsächlich aus Vergütungsstählen oder rostfreiem Stahl hergestellt. Unter vorwiegend schwingender Belastung weist diese Art von Verbindung eine höhere Festigkeit auf als das vergleichbare Punktschweißen.

Anwendung findet das Stanznieten vor allem im Leichtbau zum Fügen höherfester Stahlbleche bis zu einer Dicke von ca. 2mm.

Es ist zwischen Stanznieten mit Vollniet und Stanznieten mit Halbhohlniet zu unterscheiden.

Beim *Stanznieten mit Vollniet* wirkt dieser als Schneidstempel. Durch die Geometrie des Niets und der Matrize bildet sich der Werkstoff als Hinterschneidung aus und ein beidseitig oberflächenebenes Fügeteil entsteht. Der Werkstoff des stempelseitigen Blechs muss nicht plastisch umformbar sein.

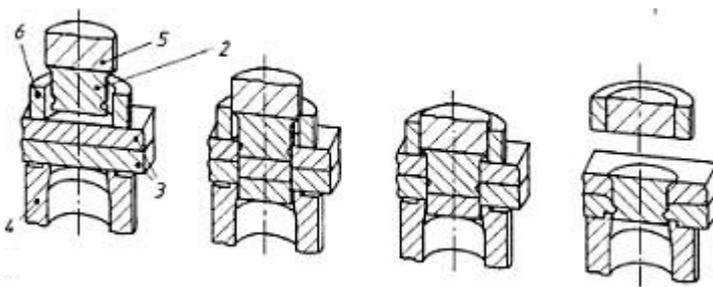


Abbildung 36: Stanzniet mit Vollniet (2 Vollniet mit Ringnut, 3 Fügeteil, 4 Matrize, 5 Nietstempel, 6 Niederhalter) [2]

Beim *Stanzniet mit Halbhohlniet* wirkt der Niet anfangs als Schneidstempel und bildet anschließend durch plastische Verformung mit dem matrizen seitigen Blech den Schließkopf aus. Somit entsteht ein matrizen seitig geschlossenes Nitelement, das den Stanzbutzen des oberen Bleches einschließt. Das Blech wird nicht durchgeschnitten und es entsteht ebenfalls ein einseitig oberflächenebenes Fügeteil, welches gas- und flüssigkeitsdicht ist.

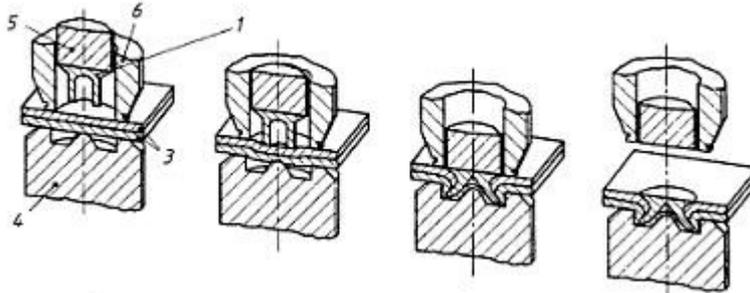


Abbildung 37: Stanzniet mit Halbholniet (1 Halbholniet, 3 Fügeblech, 4 Matrize, 5 Nietstempel, 6 Niederhalter) [3]

2.8.4. Nietfehler und geeignete Prüfverfahren

Bei keiner ausreichenden Klemmung der Bauteile, z. B. ein Vollniet mit zu großer Senkung, verläuft die Lastübertragung nur durch die Lochleibung. Die Folge daraus ist, dass bei dynamischer Belastung vorzeitig Risse auftreten. Vorzeitiges Versagen der Nietverbindung ist möglich, wenn die zulässige Spaltbreite im Nietbereich überschritten wird. Im Extremfall kann es zu einer starken Nietausstülpung kommen. Mögliche Ursachen für diesen Fehler kann nichtausreichende Heftung oder Späne zwischen den Fügeflächen sein. Falsche Nietwerkzeugauswahl, nicht achsparalleles Schlagen oder Quetschen des Niets führen zur Beschädigung der Bauteiloberfläche. Diese Nietverbindung gilt als fehlerhaft und muss entfernt und erneuert werden.

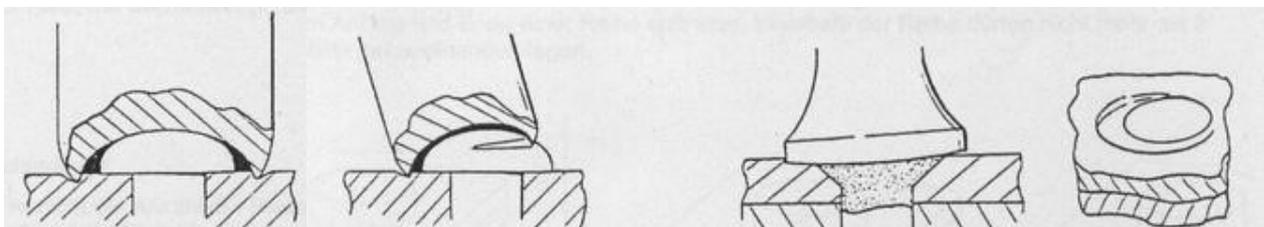


Abbildung 38: Beschädigung der Bauteiloberfläche durch falsches Nieten [4]

Geeignete Verfahren zur Prüfung von Nietverbindungen sind das Ultraschall- und Wirbelstromverfahren.

2.8.5. Nietanwendungen in der Luftfahrt

In der Vergangenheit wurde der komplette Aluminium-Rumpf und -Zelle wie auch andere Bereich im Flugzeug mit Hilfe von Nieten miteinander verbunden. Doch schon seit einiger Zeit ist ein Umschwung zu erkennen. Das Fügen durch Schweißen z. B. Laserstrahlschweißen ist bereits Standard und verdrängt das altbewährte Nieten immer mehr. Als Beispiel ist hier der neue A380 zu nennen, dieser Super Airbus kommt „ganz“ ohne Nieten aus. Man vermutet jedoch, dass noch ein paar Nieten für „das gute Gefühl“ eingesetzt wurden, welche jedoch nicht mehr der Stabilität dienen. Die Bleche an der - immer noch - aus Metall bestehenden unteren Rumpfschale werden mit Laserstrahl geschweißt. Die Schale wird dadurch stabiler und leichter.

Zusätzlich ist als weiterer Trend ersichtlich, dass der Einsatz von faserverstärkten Verbundwerkstoffen kontinuierlich steigt. Diese Bauteile werden vorwiegend durch das Fügeverfahren Kleben miteinander verbunden. Diese Kombination aus Schweißen und Kleben wird beispielsweise beim Bau des Airbus 380 eingesetzt.

2.8.6. Schrauben und Muttern

Schrauben sind prinzipiell lösbare Verbindungen, die entweder von beiden Seiten (Schrauben mit Mutter) oder einseitig setzbar sind (Gewindeschneidschrauben oder Gewindeeinsätze). Beim Einsatz von einseitig setzbaren Verbindungen sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Schrauben nicht mehrmals ins gleiche Gewinde geschraubt werden. Besteht die Notwendigkeit die verbundenen Füge Teile oft auseinander zu schrauben, sollte die Variante Schraube mit Mutter gewählt werden, um stabile Festigkeitswerte sicherzustellen.

Des Weiteren wird diese Fügeart an Stellen eingesetzt, an denen die Betriebslast auf Grund der Bauteilgeometrie über Kopfzug übertragen werden muss.

Schraubenverbindungen werden fast ausschließlich mit festgelegtem Drehmoment angezogen.

2.8.7. Schrauben- und Mutterarten

Wie auch bei den Nieten wird auch hier zwischen verschiedenen Schrauben, passend zum Einsatzgebiet, unterschieden. Nachfolgend ein kleiner Auszug:

Passschraube

Diese Art von Schraube überträgt zusätzlich Kräfte quer zur Schraubenachse und dient zur Lagesicherung.

Kopfschrauben

Finden ihre Anwendung mit Gewinde in einem der zu verspannenden Teile ohne Mutter.

Gewindestifte

Diese Schrauben besitzen durchgehendes Gewinde, einen Schlitz oder Innensechskant auf der einen Seite und Kugelkuppe, Zapfen, Ringschneide oder Spitze auf der anderen Seite.

Schaftschrauben

Kopfschrauben mit Teilgewinde, wobei der Bolzendurchmesser gleich Kerndurchmesser ist.

Bei der Schraubenkopfform wird unterschieden zwischen Sechskantschraube, Zylinderschraube mit Innensechskant oder Innenzahnprofil, Senk-, Rundschrauben und Linsensenkschraube mit Innensechskant, Schlitz oder Kreuz-Schlitz.

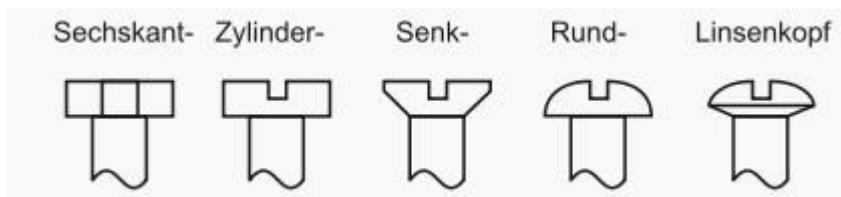


Abbildung 39: genormte Schraubenkopfformen [5]

Bei hoch beanspruchten Schraubverbindungen sollte ein gestauchter Kopf verwendet werden, um einen stetigen bzw. ununterbrochenen Faserlauf zu erreichen.

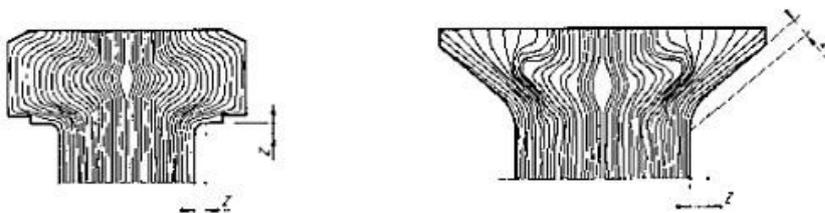


Abbildung 40: Faserverlauf im Schraubenkopf [6]

Die am häufigsten verwendete Mutterform ist die Sechskantmutter, welche mit ihren Abmessungen von M1 bis M150 in DIN 943 festgelegt ist. Hutmuttern bieten mitunter Verletzungsschutz und werden vor allem in Verbindungen mit Dichtungsscheiben verwendet, um Aus- oder Eindringen von Flüssigkeiten zu verhindern. Zur axialen Kraftübertragung oder zur axialen Lagersicherung von Naben und Ringen auf Wellen finden

Nutmuttern ihre Verwendung. Für einen gleichmäßigen Übergang des Kraftflusses vom Zug im Bolzen zu Druck in der Mutterauflagefläche sorgt die Zugmutter.

2.8.8. Prüfung von Schraubverbindungen

Mit Hilfe eines speziellen Schraubenprüfstandes ist es möglich, den Anziehvorgang für eine bestimmte Schraubverbindung exakt zu simulieren und so den Einfluss einzelner Parameter zu optimieren.

Die Reibungsverhältnisse an Schrauben sind abhängig vom Schraubenwerkstoff, vom Oberflächenschutz, Schmiermittel, Werkstoff der Verbindungsteile, Oberflächenrauigkeit, Härte der Gleitflächen und schließlich von der Häufigkeit des Anziehens. Die Reibungsverhältnisse bestimmen bei vorgegebenem Anzugsmoment die Größe der Spannkraft.

Schraubverbindungen werden i. d. R. auf Dauerschwingfestigkeit geprüft. Das ermittelte Prüfergebnis wird mit den bestehenden, genormten Werkstoffkennwerten des verwendeten Schraubenwerkstoffes verglichen. Bei Unterschreitung der Normwerte der Schraube muss eine Neuauslegung bzw. Berechnung der Schraubverbindung erfolgen. Zusätzlich ist eine Prüfung durch Scher- und Biegebeanspruchung möglich.

2.8.9. Schraubanwendungen im Triebwerksbau

Je nach Anwendungsbereich, Art der mechanischen Beanspruchung und Korrosionsschutzanforderungen kommen Schrauben aus verschiedenen Materialien zum Einsatz. Meist werden in der Luftfahrt Schrauben aus rostfreiem Stahl oder Titan-Legierungen (z.B. Ti6Al4V) oder Inconel verwendet.

Das Turbinenzwischengehäuse des GP7000 Triebwerks und der GENx besteht aus 12 Fairings. Diese werden mit Hilfe einer Schraube-Mutter Verbindung (Abbildung 41) zusammengesetzt und bilden somit den TCF (Turbine Center Frame), welcher sich zwischen der Hoch- und Niederdruckturbine befindet.

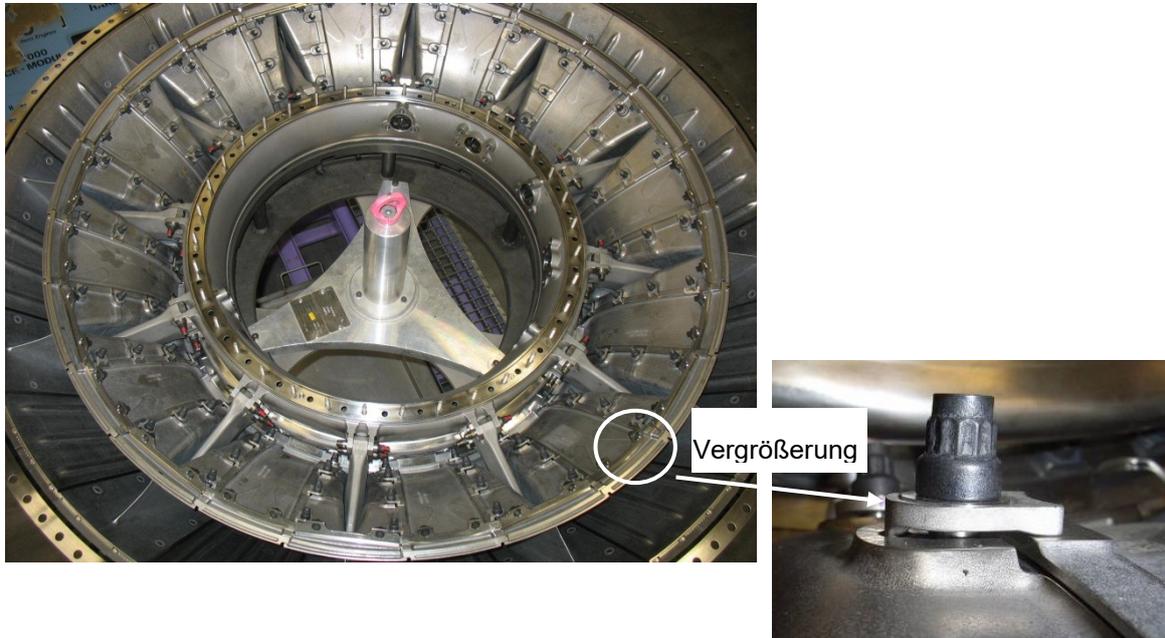


Abbildung 41: Schraube-Mutter-Verbindung [8]

Quellenangaben:

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

D. Muhs; H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek: Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung, 18. Auflage, Vieweg Verlag, 2007

H. Wiegand, K.-H. Kloos, W. Thomala: Schraubverbindungen, 4. Auflage, Springer Verlag, 2007

M. Menke: Fügen im Leichtbau, Beuth Verlag GmbH, 2009

[1] <http://www.xpertgate.de/gfx/bilder/27-LP-Niettechnik-Pressnieten-Prinzip.jpg>

[2], [3] D. Muhs; H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek: Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung, 18. Auflage, Vieweg Verlag, 2007

[4] <http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php/Bild:Nietfehler.JPG>

[5] [http://de.wikipedia.org/wiki/Schraube_\(Verbindungselement\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Schraube_(Verbindungselement))

[6] M. Menke: Fügen im Leichtbau, Beuth Verlag GmbH, 2009

[7], [8] MTU Bilderarchiv – Montage TCF GP7000

3. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wird die Qualität eines Bauteils getestet, ohne das Material selbst zu beschädigen.

Folgende ZfP-Verfahren werden in den nächsten Kapiteln genauer beschrieben:

- Thermografie
- Ultraschall
- Röntgen
- Computertomographie
- Wirbelstromverfahren
- Magnetpulververfahren
- Eindringprüfung
- Shearografie
- Sichtprüfung

3.1. Thermografie

3.1.1. Historie

Im Jahre 1800 hat Wilhelm Herschel nachgewiesen, dass sich das Spektrum eines Temperaturstrahlers über die Grenzen des sichtbaren Lichtes hinaus fortsetzt. Er ließ Sonnenlicht durch ein Prisma fallen, dabei wird das Licht in seine Spektralfarben aufgeteilt. Die Strahlung jenseits des sichtbaren Lichts wies er mit einem Thermometer nach.

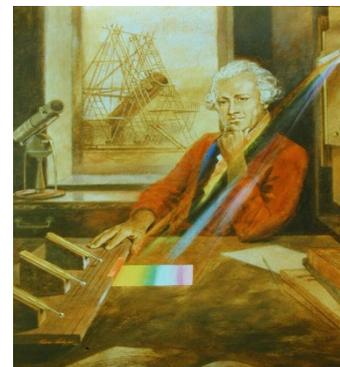


Abbildung 42: Wilhelm Herschel [11

3.1.2. Grundlagen

Die Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren, das mit Hilfe einer IR-Kamera das für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotlicht eines Objektes oder Körpers sichtbar macht. Mit Hilfe der Thermografie lassen sich Temperaturverteilungen flächenförmig erfassen und bildhaft darstellen. In der Anfangszeit wurde dieses Verfahren hauptsächlich zur Temperaturkontrolle von industriellen Anlagen genutzt. Durch die Entwicklung leistungsfähiger Sensoren gewinnt die Thermografie nun aber auch bei der Qualitätskontrolle immer mehr an Bedeutung.

Bei der Thermografie werden die Bilder mit Hilfe von Infrarotkameras gemacht. Dabei werden die Aufnahmen in sogenannte Graustufen aufgeteilt. Mit Hilfe von Computerprogrammen können die „Graustufenaufnahmen“ farbig dargestellt werden. Man nennt dies „Falschfarben-Darstellung“. Der Vorteil liegt vor allem in der hohen Darstellbarkeit des Kontrastes.

Elektromagnetische Strahlung

Infrarot-Strahlung (IR-Strahlung) - auch als Wärmestrahlung bezeichnet - ist ein Teil des elektromagnetischen Spektrums. Die Infrarot-Strahlung schließt sich in Richtung längerer Wellenlängen an das sichtbare Licht an. Der Wellenlängenbereich reicht von ca. 780 nm bis 1 mm.

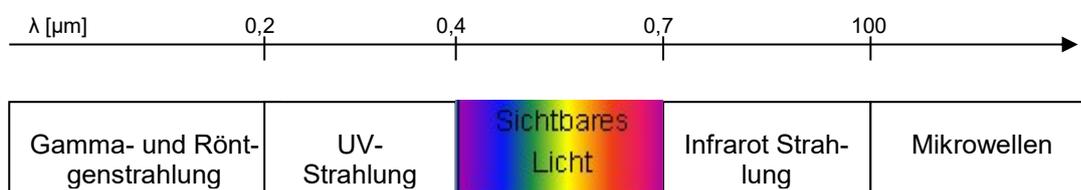


Abbildung 42: Elektromagnetisches Spektrum

Emissions-Koeffizient

Der Emissions-Koeffizient ϵ ist ein Faktor, der beschreibt, wie stark ein erwärmter Körper Wärmestrahlung aussendet.

- Ist der Emissionskoeffizient „hoch“, wird bei gleicher Temperatur mehr Wärmestrahlung (Energie) ausgesendet.
- Ist der Emissionskoeffizient „niedrig“, wird bei gleicher Temperatur weniger Wärmestrahlung (Energie) ausgesendet.

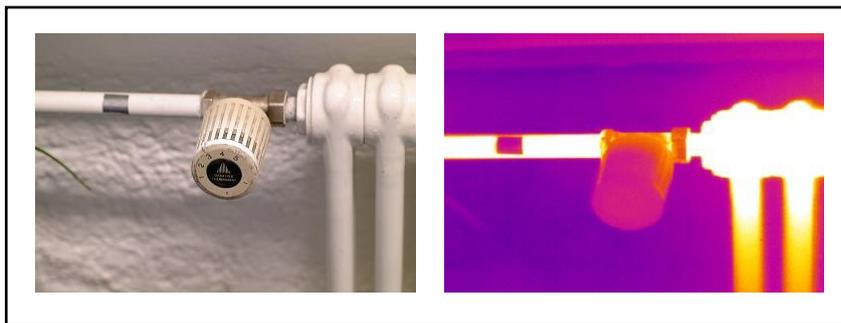


Abbildung 43: Bild warmer Heizkörper - Thermogramm

Dies soll an folgendem Beispiel näher erläutert werden. Zu sehen ist in Abbildung 43 ein Teilbereich eines warmen Heizkörpers mit Zuleitung und Thermostat. Die rechte Abbildung zeigt die gleiche Szene als Thermogramm (Wärmebild). In diesem Beispiel stellen helle Farben warme Bereiche dar. Dunklere Bereiche sind kälter.

Dabei fällt auf, dass in der Zuleitung scheinbar eine Kaltstelle ist. Dieses Phänomen kann mit Hilfe des Emissionskoeffizienten beantwortet werden. Moderne Heizkörper werden lackiert, wodurch eine Erhöhung des Emissionskoeffizienten erreicht wird. Das heißt ein entsprechend angestrichener Heizkörper strahlt mehr Wärme ab, als ein metallisch blanker. An der Kaltstelle wurde der Lack entfernt und somit der Emissionskoeffizient deutlich gesenkt. Deshalb erscheint diese Stelle, obwohl sie gleich warm ist wie deren Umgebung „kälter“.

Es ist also besonders wichtig, dass der Thermograf Kenntnis über die verschiedenen Emissionskoeffizienten hat. Ist dies nicht der Fall, so führt dies zu Fehlinterpretationen.

3.1.3. Passive und aktive Thermografie

Passive Thermografie

Mit einer Thermografiekamera, deren Sensoren Infrarotstrahlung in ein sichtbares Bild umwandeln, kann die Wärmeverteilung auf der Objektoberfläche geprüft und gemessen werden. Wird die Temperaturstrahlung eines Objekts gemessen, das bereits warm ist bzw. erwärmt aus einem Herstellungsprozess kommt, so wird von einer passiven oder Abkühlungs-Thermografie gesprochen. Es wird die Strahlung aufgenommen, die das Bauteil aufgrund seiner Eigenwärme emittiert.

Abbildung 44 zeigt schematisch die Messanordnung einer passiven Thermografie eines Kraftwerks sowie das dazugehörige Messergebnis (Thermogramm). An den Kühltürmen und dem Rauch erkennt man die Temperaturverteilung.

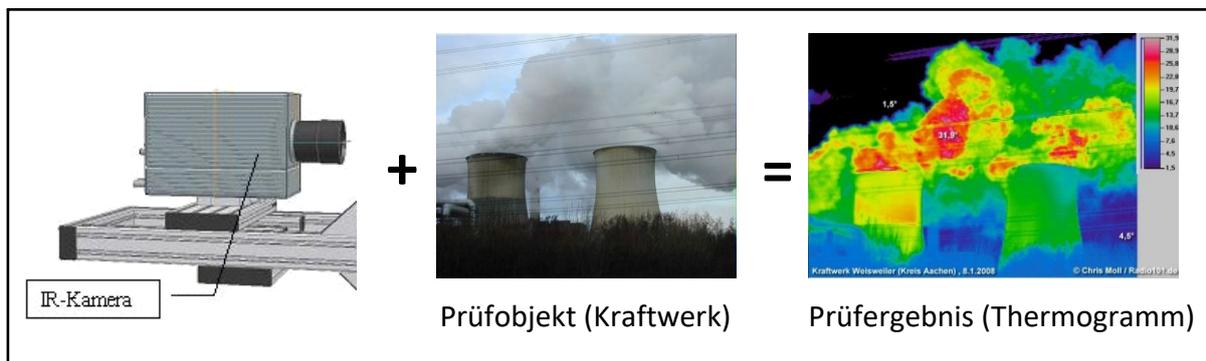


Abbildung 44: Messanordnung einer passiven Thermografie [2]

Aktive Thermografie

Bei der aktiven Thermografie wird das thermische Gleichgewicht des zu prüfenden Objekts gezielt gestört. Dies kann durch definiertes Erwärmen oder Abkühlen erfolgen. In den meisten Fällen wird gezielt erwärmt. Dazu stehen den Anwendern mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Nach Art der thermischen Anregungstechnik wird meist das Verfahren bezeichnet.

Folgende thermische Anregungstechniken werden angewendet:

Optische Erwärmung (mit Licht) → Puls - oder Puls – Video - Thermografie

Induktive Erwärmung → Induktions-Thermografie

Erwärmung durch Ultraschall → Ultraschall-Thermografie

Abbildung 45 zeigt schematisch das Prüfsetup der Impuls-Thermografie sowie das erzielte Prüfergebnis. Zusätzlich zur passiven Thermografie ist hier eine thermische Anregungsquelle in Form von Blitzlampen vorhanden. Im Gegensatz zur passiven Thermografie kann bei der aktiven Thermografie über das zeitliche Verhalten der Temperatur in das Objekt oberflächennah geschaut werden. Im gezeigten Fall (Abbildung 45) ist ein Materialfehler (rötliche Färbung) im Prüfobjekt zu erkennen.



Abbildung 45: Messanordnung einer aktiven Thermografie

3.1.4. Thermografieverfahren

Impuls-Thermografie

Bei der MTU Aero Engines wird serienmäßig die Impuls-Thermografie eingesetzt. Das Prüfverfahren beruht auf der Störung des thermischen Gleichgewichts des Prüfobjektes durch die von Blitzlampen ausgesandte Wärmestrahlung. Bei homogenem, fehlerfreiem Material fließt die Wärme gleichförmig in das Bauteilinnere ab.

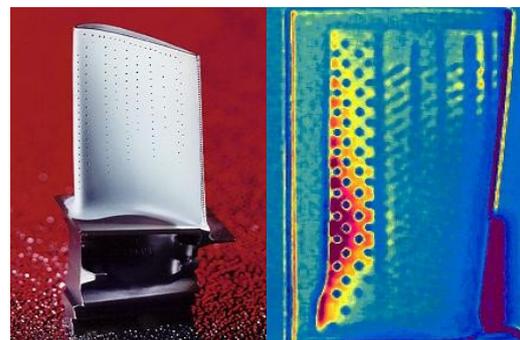


Abbildung 46: links- hohlgegessene Turbinenschaufel, rechts- qualitatives Wanddickenbild

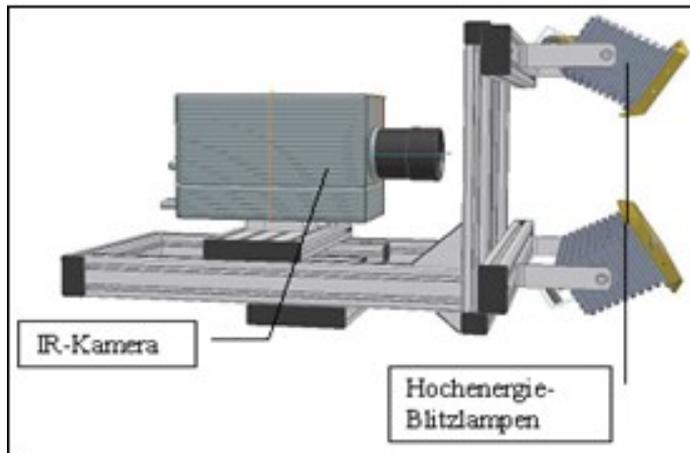


Abbildung 47: Thermografie System

Fehler im Material oder Dickenunterschiede beeinflussen jedoch den Wärmefluss ins Bauteilinnere und daraus resultiert ein Temperaturgradient auf der Bauteiloberfläche. Dies kann mit der Infrarotkamera sichtbar gemacht werden.

Anhand von Beispielen soll das Verfahren nun näher erläutert werden.

Die Impuls-Thermografie wird in der MTU Aero Engines unter anderem zur Detektion von Ablösungen bei Schichtsystemen (z.B. Keramiksichten auf Leitschaufeln) eingesetzt.

Abbildung 47 zeigt das Thermografie Prüfsystem. Es besteht zum einen aus der Infrarotkamera. Diese sendet die gemessenen Daten an den Computer, der für die eigentliche Auswertung und Steuerung des Systems verwendet wird.

Ein weiterer wichtiger Teil des Prüfsystems sind die Hochenergieblitzlampen. Die Lampen, welche von der MTU genutzt werden, erzielen eine maximale Blitzenergie von ca. 6 Kilojoule pro Lampe. Die Energie der Hochenergieblitzlampen ist regelbar. Dies ist wichtig, da für jeden Werkstoff und jede neue Bauteilgeometrie die Blitzenergie gegebenenfalls angepasst werden muss, um ein optimal auswertbares Ergebnis zu bekommen. Auftretende Störeffekte können z.B. reflektierte Wärmestrahlungen sein, die eine eindeutige Fehlerdetektion verhindern können.

Abbildung 48 zeigt den Temperatur-Zeit-Verlauf bei einer Impuls-Thermografie am Beispiel einer Turbinenschaufel mit Hohlraum. Das Ziel der Prüfung ist es, diesen Hohlraum zerstörungsfrei mit Impuls-Thermografie zu finden. Von den Blitzlampen wird Energie (Wärme) emittiert. Dieser Energieimpuls trifft auf die Konvexseite (Saugseite) der Turbinenschaufel. Dabei wird die Energie von der Bauteiloberfläche absorbiert. Die Oberfläche erwärmt sich impulsartig, was im Temperatur-Zeit-Diagramm von Abbildung 48 als sprunghafter Anstieg zu sehen ist. Die Wärme (Energie) fließt nun in das Bauteil hinein.

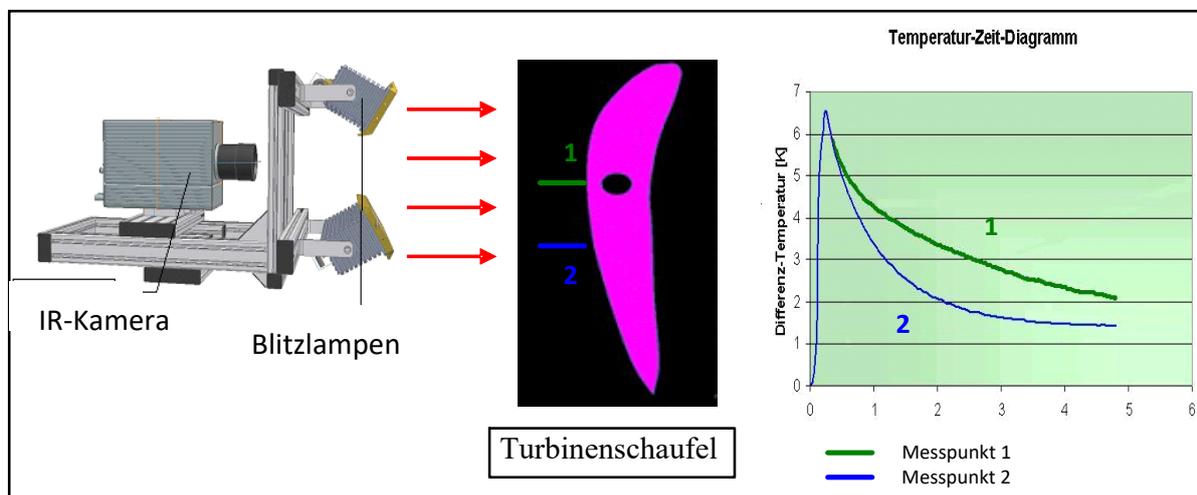


Abbildung 48: Temperatur- Zeitverlauf bei einer Impulsthermografie

Im Folgenden werden die zwei verschiedenen Fälle – Bereich mit Fehler und Bereich ohne Fehler- betrachtet.

Im fehlerfreien Bereich fließt die Wärme ungehindert in das Bauteil hinein. Die blaue Kurve (Messpunkt 2) zeigt den Temperatur-Zeit-Verlauf für den fehlerfreien Bereich. Im fehlerhaften Bereich trifft der Wärmefluss jedoch am Hohlraum auf ein Hindernis. Die Wärme muss um die Fehlstelle herum fließen, was einen kurzzeitigen Wärmestau zur Folge hat. Dieser Wärmestau führt dazu, dass es auf der Bauteiloberfläche an diesen Bereichen kurzzeitig wärmer bleibt als in der fehlerfreien Umgebung. Dieser Temperaturunterschied wird mit der IR-Kamera detektiert. Den Temperatur-Zeit-Verlauf im fehlerhaften Bereich zeigt die grüne Kurve (Messpunkt 1).

Liegen die Hohlräume allerdings zu tief im Bauteilinneren oder sind sie zu klein, ist der Temperaturgradient zu gering um die Hohlräume auf der Oberfläche mit der IR-Kamera sichtbar zu machen.

Induktions-Thermografie

Dieses Thermografieverfahren kann Fehler an oder in sehr oberflächennahen Bereichen detektieren. Mit Hochfrequenzgeneratoren und Induktionsspulen werden magnetische Wechselfelder erzeugt, die im Bauteil einen Stromfluss induzieren, wodurch eine Erwärmung des Bauteils hervorgerufen wird. Die Impulszeiten liegen meist zwischen 50 und 200 ms. Inhomogenitäten wie Risse und Lunker stören den Verlauf der induzierten Ströme und verändern die Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche. Diese veränderten Temperaturverteilungen können mit Hilfe einer geeigneten Thermografiekamera sichtbar gemacht werden.

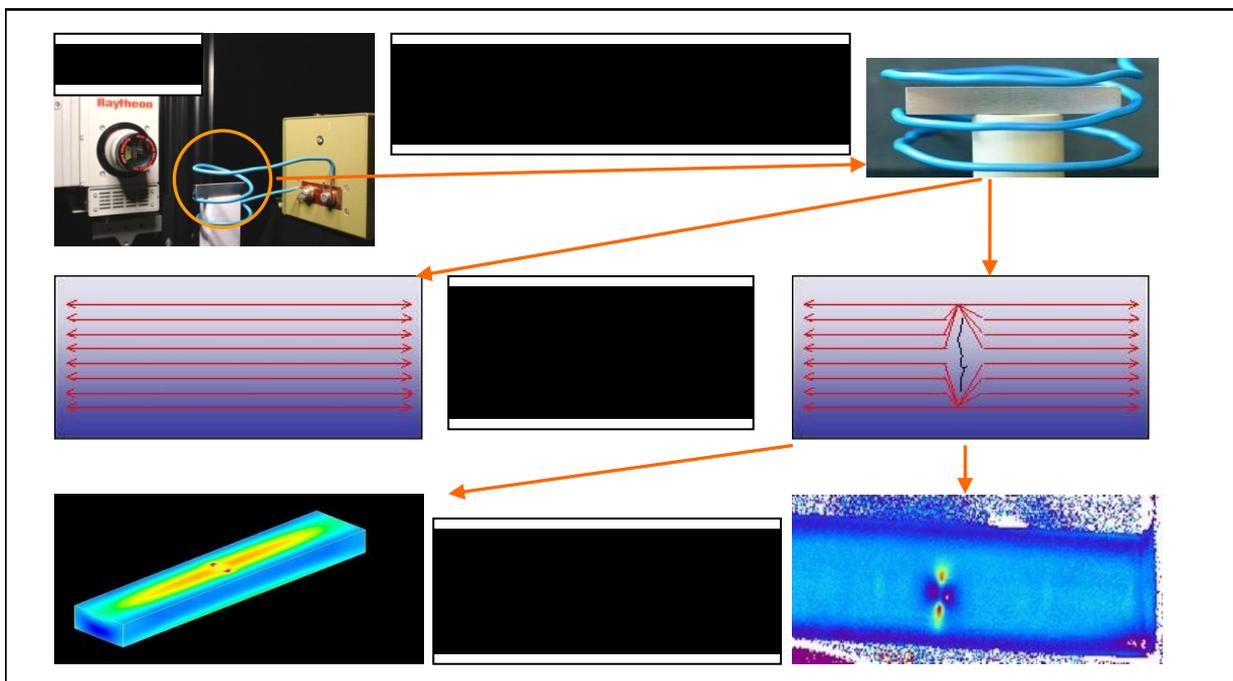


Abbildung 49: Thermografie System

Abbildung 49 zeigt ein Prüfsystem bestehend aus IR-Kamera, Spule und Transformator. Des Weiteren ist in dieser Abbildung der Verlauf der induzierten Ströme in einem fehlerfreien und einem Testkörper mit geöffnetem Riss zu sehen.

Zusätzlich werden von dem Testkörper mit Riss eine Simulation und ein reales Thermogramm gezeigt. Typische Merkmale sind hier die Bereiche höherer Stromdichte, die an den Rissspitzen entstehen. Durch die hohe Stromdichte erwärmt sich das Bauteil lokal an den Rissspitzen mehr. Diese erwärmten Bereiche können mit einer geeigneten IR-Kamera erkannt werden.

Ein großer Vorteil der Induktions-Thermografie liegt darin, dass oft auch verschmutzte Bauteile mit eventuell zugeschmierten Rissen geprüft werden können.

Es kann somit auch ohne großen Reinigungsaufwand nicht nur in der Fertigung, sondern auch in der Wartung eingesetzt werden. Ein Nachteil ist, dass nur elektrisch leitende Werkstoffe geprüft werden können.

Ultraschall-Thermografie (SonoTherm)

Mit Ultraschall- Thermografie können unter anderem oberflächennahe Risse detektiert werden. Ultraschall-Thermografie ist ein Verfahren, welches das Bauteil mit Hilfe von gezielt eingebrachten Ultraschallwellen anregt. Der Ultraschall wird mit einer Sonotrode, die mit einer Frequenz von 15 – 40 kHz schwingt, in das Bauteil eingeleitet, sodass vorhandene Rissflanken aneinander reiben und sich erwärmen. Diese Wärme wird von einer Infrarotkamera detektiert.

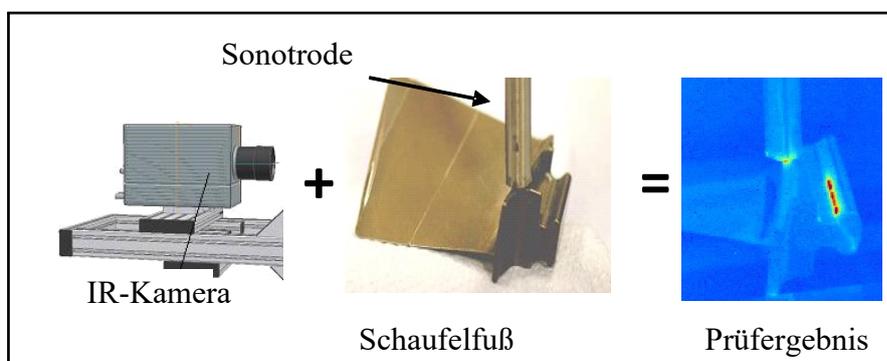


Abbildung 50: Messanordnung einer Ultraschallthermografie

Abbildung 50 zeigt eine Sono-Therm Prüfanordnung eines Turbinenschaufelfußes, sowie das erzielte Prüfergebnis. Die rötlichen Bereiche im Schaufelfuß kennzeichnen einen Riss.

Vorteile des Verfahrens sind unter anderem, dass der Emissionskoeffizient eine untergeordnete Rolle spielt und unter Umständen auch Fehler in einer Tiefe bis zu einigen Millimetern nachweisbar sind.

Nachteile sind jedoch, dass die Zerstörungsfreiheit nicht sichergestellt ist, da an der Bauteiloberfläche durch die Sonotrode mechanische Beschädigungen entstehen können.

3.1.5. Vor- und Nachteile der Thermografie

Die Thermografie ist in den letzten Jahren durch die immer verbesserten Technologien und Entwicklungen zu einer echten Alternative bei den zerstörungsfreien Prüfverfahren geworden.

Vorteile

- integrales Messverfahren, d.h. die Oberfläche benötigt keine spezielle Vorbehandlung
- Prüfung sowie Auswertung sind nicht besonders zeitaufwändig
- Keine Entstehung von Abfallprodukten
- Anwendung des Verfahrens ist kostengünstig
- Prüfverfahren ist „mobil“ einsetzbar

Nachteile

- teils einschränkende Sicherheitsvorkehrungen nötig, wie Schutz vor Verblitzungen der Augen und der Haut

- bei Bedarf Änderung des Emissionskoeffizienten, z.B. müssen glänzende Oberflächen geschwärzt werden
- „geringe“ Tiefenreichweite, nur oberflächennahe Fehler werden gefunden (wenige mm)

Quellenangaben:

http://www.dsi.uni-stuttgart.de/bildungsprogramm/ir-strahlung/was_ist_ir.html

http://www.mechatronik-cluster.at/files/3_FhG-TEG_Thermografie_Montmacher.pdf

MTU: Thermografie.doc – Problemorientierte Triebwerkstechnik, Teil 2 „Neue ZfP-Verfahren“ Thermografie

[1] <http://www.dsi.uni-stuttgart.de/bildungsprogramm/ir-strahlung/pics/herschel.gif>

[2] <http://www.radio101.de/thermographie/bilder.htm>

3.2. *Ultraschall*

3.2.1. Historie

Im Jahre 1826 haben der Mathematiker Charles-Francois Sturm und der Physiker Jean-Daniel Colladen eine Versuchsanordnung zur Messung der Schallgeschwindigkeit unter Wasser konstruiert. Im Genfer See brachten sie eine Glocke mit Schießpulver zum Schwingen. Den Schall im Wasser haben sie mit einem trompetenähnlichen Instrument gemessen. Trotz dieser

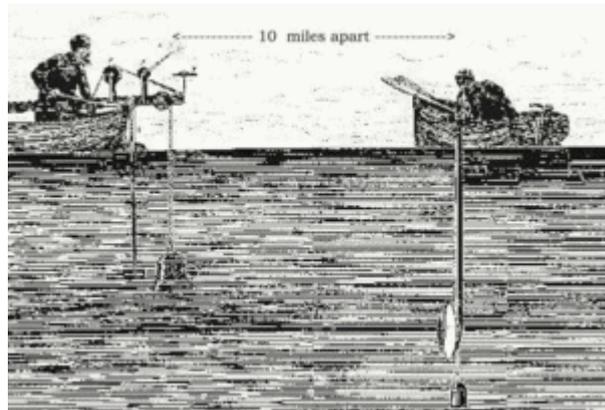


Abbildung 51: Messung der Schallgeschwindigkeit [1]

einfachen Versuchsanordnung war es den beiden Wissenschaftlern möglich, die Schallgeschwindigkeit unter Wasser zu ermitteln. Diese betrug in ihrem Experiment 1435 m/s und ist nicht weit von dem heutigen Literaturwert von 1485 m/s entfernt.

3.2.2. Grundlagen

Die Ultraschallprüfung eignet sich für den Nachweis von Fehlern wie Risse, Lunker und Einschlüsse. Die Fehler müssen eine Ausdehnung quer zur Schallausbreitung haben. Des Weiteren muss der Werkstoff möglichst ebene Oberflächen besitzen.

Piezoeffekt

Durch Verformung eines Piezo-Materials, wie beispielsweise Quarz, entstehen Dipole in den Elementarzellen, wodurch Spannung erzeugt wird.

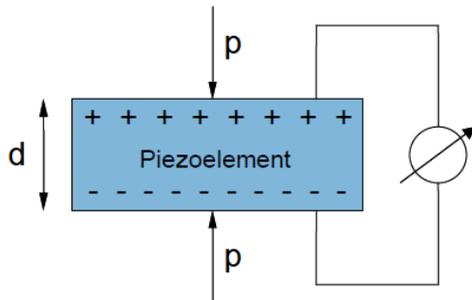


Abbildung 52: Direkter Piezoeffekt

Dieser Effekt ist auch umkehrbar (reziproker Piezo-Effekt). Dabei wird eine Verformung des Materials durch Anlegen einer elektrischen Spannung hervorgerufen. Eine angelegte Wechselspannung bewirkt eine zyklische Verformung des Bauteils. Auf diese Weise werden hochfrequente mechanische Wellen erzeugt.

Die Erzeugung von Ultraschallwellen erfolgt über den reziproken Piezo-Effekt, dass Empfangen der Ultraschallwellen mit dem Piezo-Effekt.

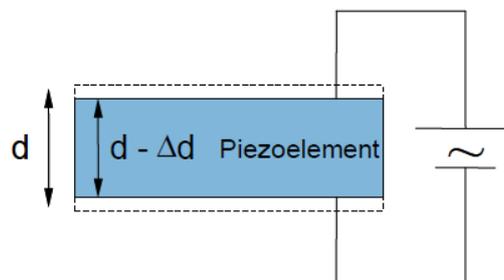


Abbildung 53: Reziproker Piezoeffekt

Ultraschallwellen

Es gibt verschiedene Wellenarten:

- Longitudinalwellen
- Transversalwellen
- Oberflächenwellen
- Plattenwellen

Bei den Longitudinalwellen ist die Schwingungsrichtung der Masseteilchen parallel zur Ausbreitungsrichtung.

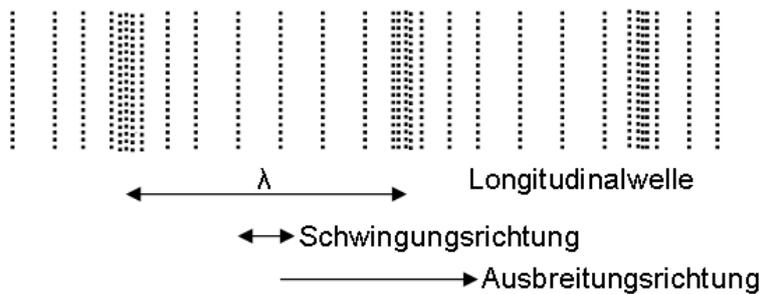


Abbildung 54: Longitudinalwellen

Bei den Transversalwellen ist die Schwingungsrichtung der Masseteilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Transversalwellen breiten sich allerdings nur in Festkörpern und nicht in Flüssigkeiten aus.

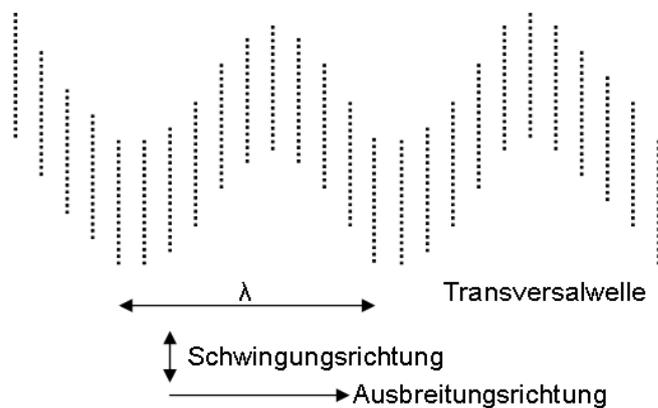


Abbildung 55: Transversalwellen

Die Ultraschallwellen breiten sich mit der Schallgeschwindigkeit c aus. Die vorherrschenden Umgebungsparameter wie Druck und Temperatur bilden eine sekundäre Abhängigkeit.

Der unter optimalen Prüfbedingungen kleinste aufzufindende Fehler ist stets größer oder gleich der halben Wellenlänge λ .

Für die Wellenlänge λ gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ = Wellenlänge [m]

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]

f = Frequenz [Hz]

3.2.3. Ultraschallprüfverfahren

Durchschallungsverfahren

Bei diesem Verfahren benutzt man zwei Prüfköpfe am selben Ultraschallgerät. Der eine Prüfkopf dient als Sender, der andere als Empfänger auf der gegenüberliegenden Seite des Werkstücks. Es wird die Schallenergie gemessen. Ungängen führen zu einer Reduzierung der am Empfänger auftreffenden Schallenergie. Mit dieser Methode kann man die Größe der Ungänze bestimmen, die genaue Tiefe und Winkel allerdings schwer.

Dieses Verfahren kommt allerdings nur selten zum Einsatz.

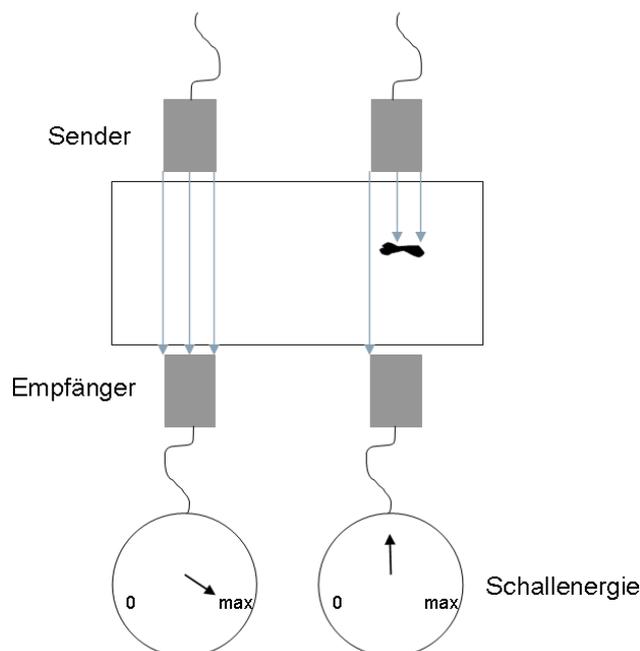


Abbildung 56: Durchschallungstechnik

Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren

Bei der Impuls-Echo Prüftechnik dient der Prüfkopf sowohl als Sender, als auch als Empfänger. Der ausgesendete Schallstrahl wird an Materialübergängen (Grenzflächen) reflektiert. Das reflektierte Signal wird mit dem Prüfkopf empfangen und die Laufzeit des Signals gemessen.

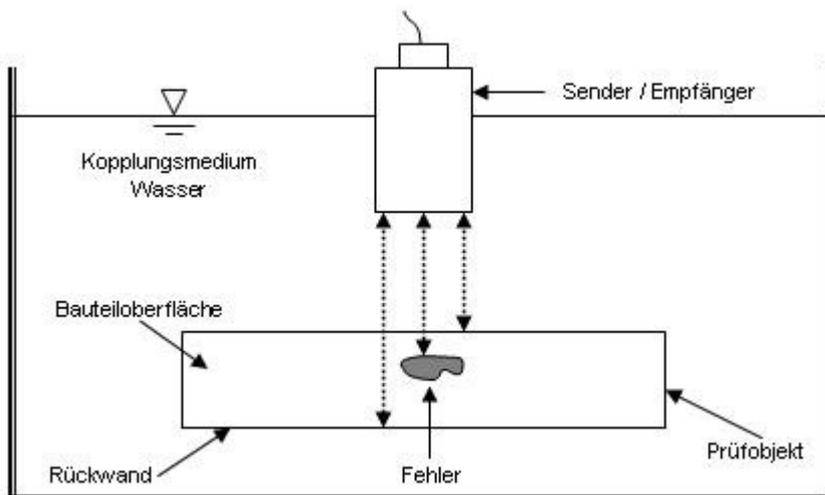


Abbildung 57: Impuls-Echo-Verfahren im Tauchbad

An der Bauteiloberfläche und der Rückwand des Bauteils entstehen immer Reflexionen. Falls ein Materialfehler im Bauteil ist, so erzeugt auch dieser eine Reflexion. Die Echosignale werden in einem sogenannten A-Bild, aus dem direkt die Tiefe des Fehlers abgelesen werden kann, angezeigt. Dabei wird die Amplitude des Echo-Signals (reflektiertes Signal) über der Laufzeit aufgetragen.

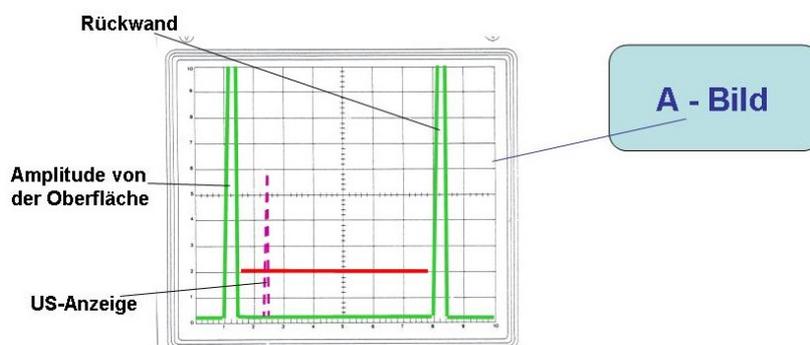


Abbildung 58: A-Bild [2]

Eine durch einen Materialfehler hervorgerufene Anzeige würde zwischen dem Oberflächenecho und dem Rückwandecho auftreten.

Aus dem A-Bild kann die Laufzeit des Echosignals abgelesen werden und über die Schallgeschwindigkeit des Materials kann dadurch die zurückgelegte Strecke berechnet werden.

Um die Größe eines Fehlers bestimmen zu können, ist ein C-Bild erforderlich. Das C-Bild stellt eine Draufsicht auf das Bauteil dar, in dem die Anzeigen in Falschfarben eingezeichnet werden.

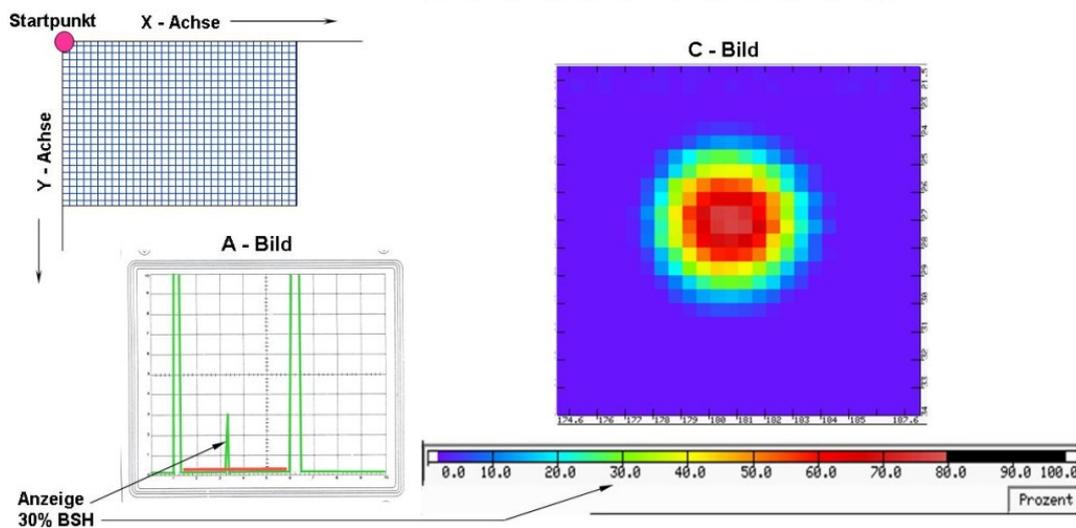


Abbildung 59: Ableitung eines C-Bildes

Dazu wird die Oberfläche in viele kleine Felder unterteilt. Die Größe der Felder (Auflösung) wird durch die Schallfeldbreite bestimmt. Die so aufgeteilte Oberfläche wird dann vom Prüfkopf abgefahren. Jedes einzelne Feld liefert je ein A-Bild. In dieses A-Bild wird eine Blende gesetzt. Durch die Blende wird nur ein bestimmter Ausschnitt aus dem A-Bild betrachtet. Dieser Ausschnitt wird dann für das C-Bild weiterverarbeitet. Im C-Bild werden die verschiedenen Amplitudenhöhen aus dem A-Bild in Falschfarben dargestellt. Dabei entspricht jede Farbe einer Amplitudenhöhe. Die Verstärkung wird anhand Vergleichskörper eingestellt (Kalibrierung). Dadurch wird die Empfindlichkeit der Prüfung bestimmt. Bei einer hohen Prüfempfindlichkeit wird die Verstärkung z. B.

an einem Vergleichskörper mit 0,8mm Flachbodenbohrungen eingestellt. Die Verstärkung wird so eingestellt, dass die Amplitude für diese Fehlergröße im A-Bild 80% der Skala entspricht. Somit kann jeder Anzeige von 80% die Fehlergröße des Vergleichskörpers zugeordnet werden. Bei einer höheren Amplitude ist der Fehler größer und bei einer kleineren Amplitude ist er geringer.

3.2.4. Methoden zur Anzeigen-Bewertung

Vergleichskörper-Methode

Die Vergleichskörper-Methode ist eine Methode zur direkten Bewertung von Anzeigen aus dem Prüfgegenstand durch Vergleich mit den Anzeigen von bekannten Reflektoren in einem Vergleichskörper. Ein Vergleichskörper ist ein an den Prüfgegenstand hinsichtlich Geometrie und akustischen Eigenschaften angepasster Körper mit Vergleichsreflektoren.

Bezugslinien-Methode

Die Bezugslinien-Methode ist eine Methode zur indirekten Bewertung von Anzeigen aus dem Prüfgegenstand. Diese Bewertung erfolgt durch den Vergleich der Anzeigen, die unter Berücksichtigung von Schallweg und Geometrie des Bezugsreflektors ermittelt werden.

3.2.5. Anwendungen im Triebwerksbau

Bei der MTU Aero Engines in München wird überwiegend das Ultraschall-Impuls-Echo Verfahren im Wasserbecken zur Ermittlung von Fehlern eingesetzt, beispielsweise bei der Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben.

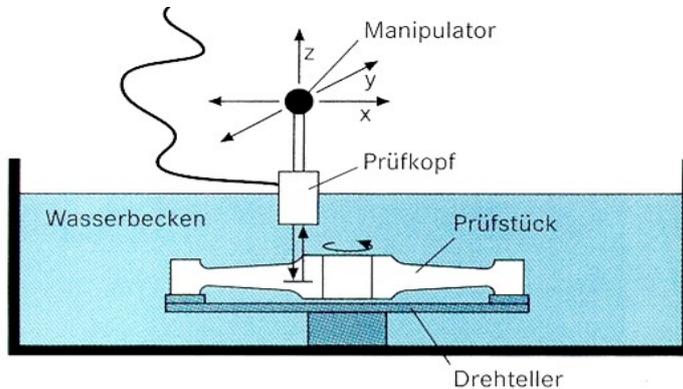


Abbildung 60: Turbinenscheibe in Wasserbad

Dabei liegt der Prüfling im Koppelmedium Wasser, da die Ankopplung hier geringeren Schwankungen unterliegt. Der Schall kann nun durch das Wasser in die Oberfläche geleitet werden. Ein wasserdichter Prüfkopf kann mit Hilfe eines Manipulators in drei Achsen (x-, y- und z-Achse) verfahren und so in einer bestimmten Entfernung zum Prüfkörper angeordnet werden. Zusätzlich kann die rotationssymmetrische Turbinenscheibe auf einem Drehteller um die eigene Achse gedreht werden.

Welches Verfahren angewendet wird, hängt von dem zu prüfenden Werkstoff und dem zu findenden Fehler ab.

Generell ist die Ultraschallprüfung ein gängiges Verfahren um Werkstofffehler bei Scheibenrohteilen vor der Fertigbearbeitung festzustellen.

Quellenangaben:

<http://www.neurosono.de/index.php?id=75>

Buch: Krautkrämer, J., H., Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Verlag, 1986

[1] <http://www.neurosono.de/index.php?id=75>

3.3. Röntgen

3.3.1. Historie

Am 8. November 1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen eine neue, ihm unbekannte Art von Strahlung. Er nannte diese Strahlen X-Strahlen. Heute wird im deutschen Sprachgebrauch nicht mehr von X-Strahlen, sondern von Röntgenstrahlung gesprochen. Im englischen Sprachgebrauch wird hingegen die Bezeichnung „X-Rays“ nach wie vor verwendet. Röntgenstrahlung ist wie sichtbares Licht, Wärmestrahlung oder Radiowellen eine elektromagnetische Strahlung. Die Strahlungsenergie wird in „Strahlungspäckchen“ oder Quanten abgegeben. Die Röntgenstrahlen werden in einer Röhre erzeugt.



Abbildung 61: Wilhelm Conrad Röntgen [1]

Um die Prüfung durchführen zu können, sind einige Punkte zu beachten:

- Werkstoff, Werkstückdicke und Strahlungsenergie müssen aufeinander abgestimmt sein.
- Vor allem sind Dichteänderungen bzw. Dichteunterschiede feststellbar.
- Bei flächigen (zweidimensional) ausgedehnten, dünnen Fehlstellen (z. B. Risse) stößt das Verfahren schnell an seine Grenzen.
- Je nach Röntgentechnik - Filmaufnahme, Durchleuchtung, CT, Mikrofokustechnik - sind die jeweiligen Besonderheiten zu beachten.
- Die Dunkelkammer erfordert sorgfältiges Arbeiten.
- Strahlenschutzmaßnahmen sind zu berücksichtigen.

Die Hauptaufgabe der Röntgenprüfung ist sicher Fehlstellen unter der Oberfläche (im Volumen) zu finden, da sie nicht mit dem bloßen Auge zu entdecken sind.

3.3.2. Grundlagen

Röntgenstrahlen

Die Erzeugung von Röntgenbildern wird mit Röntgen- oder Gammastrahlen vorgenommen. Röntgen- und auch Gammastrahlen sind ein Teil des elektromagnetischen Strahlenspektrums. Dieses umfasst alle elektromagnetischen Wellen, angefangen von den äußerst langen Rundfunkwellen über das sichtbare Licht und die UV-Strahlung bis hin zu den Röntgenstrahlen. Gammastrahlen sind auch Röntgenstrahlen, haben aber nur bestimmte Wellenlängen und werden von natürlichen Strahlern (Isotopen) erzeugt. Entscheidend dafür, wo eine derartige Strahlung ihren Platz im Spektrum hat, ist ihre Wellenlänge λ (Lambda).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen (also auch die der Röntgen- und Gammastrahlen) entspricht der Lichtgeschwindigkeit.

Röntgenstrahlen werden erzeugt, wenn Elektronen hoher Geschwindigkeit mit Materie reagieren. Trifft ein freies Elektron mit genügender Energie ein anderes Elektron auf einer Kreisbahn um einen Atomkern, kann eine charakteristische monochromatische Röntgenstrahlung entstehen. Diese Strahlung wird als charakteristisch bezeichnet, weil ihre typische Energie vom jeweiligen Atomtyp abhängt, der getroffen wurde. Treffen die freien Elektronen jedoch den Atomkern, entsteht so genannte Bremsstrahlung, die man als kontinuierliches Röntgenspektrum bezeichnet. In diesem Fall liegen nicht nur einzelne Wellenlängen vor, sondern ein ganzer Bereich von Wellenlängen, ein sogenanntes Spektrum. Für die übliche Röntgenprüfung wird normalerweise das kontinuierliche Spektrum verwendet.

Um eine geeignete Röntgenstrahlung zu erzeugen sind also mehrere Dinge erforderlich. Man benötigt eine Elektronenquelle, ein Target, worauf die Elektronen prallen können und eine Möglichkeit, die Geschwindigkeit und Menge der Elektronen in weiten Bereichen zu verändern.

Qualität und Intensität von Röntgenstrahlung

Das Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlung wächst mit zunehmender Energie. In der Praxis wird die Qualität der Röntgenstrahlung meistens durch die Röhrenspannung gekennzeichnet, die zur Erzeugung der Strahlung erforderlich ist. Röntgenstrahlung hoher Energie bzw. kurzer Wellenlängen wird als harte Strahlung bezeichnet oder als Röntgenstrahlung „hoher Qualität“. Röntgenstrahlung geringer Energie bzw. größerer Wellenlängen wird als weiche Strahlung bezeichnet oder als Röntgenstrahlung „niedriger Qualität“.

Die Intensität der entstehenden Strahlung - die Dosisleistung - hängt sowohl von der Hochspannung als auch von dem Elektronenfluss bzw. der Röhrenstromstärke ab, die über den Heizstrom der Glühwendel reguliert wird.

Bei Röntgenröhren, die in der ZfP eingesetzt werden, liegen die Werte für die Röhrenspannung zwischen ca. 50 und 600kV, für den Röhrenstrom zwischen ca. 2 und 30mA.

Um die Leistungsfähigkeit einer Röhre charakterisieren zu können, gibt man üblicherweise die Dosisleistung bei der maximal möglichen Spannung für einen Strom von 1mA in einer Entfernung von 1m vom Brennfleck an. Man nennt diese Angabe die Dosisleistungskonstante.

Wellenlänge und Energie

Die Wellenlänge (λ) elektromagnetischer Strahlung wird ausgedrückt in Meter (m), Zentimeter (cm [10^{-2} m]), Millimeter (mm [10^{-3} m]), Mikrometer (μ m [10^{-6} m]), Nanometer (nm [10^{-9} m]) oder in Ängström-Einheiten (Å [10^{-10} m]).

Die Energie (E) elektromagnetischer Strahlung wird ausgedrückt in Elektronenvolt (eV), Kiloelektronenvolt (keV [10^3 eV]), Megaelektronenvolt (MeV [10^6 eV]). 1eV ist die Energie eines Elektrons nach durchlaufen einer (elektrischen) Spannung von 1V.

$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

[J = Joule: Einheit der Energie]

Intensität und Dosisleistung

Neben der Energie benötigt man eine weitere Größe, mit der man die Röntgen- und Gammastrahlung charakterisieren kann. Dies ist die Intensität der Strahlung. Die Intensität bezeichnet man auch als Dosisleistung. Die Einheit für die Dosis war das Röntgen. Heute wird die Dosis in Coulomb pro Kilogramm (C/kg) angegeben.

$$1\text{C/kg} = 4000\text{ R}$$

(Anmerkung: Dosisleistung = Dosis / Zeit)

Elektronenquelle und Target

Erhitzt man ein geeignetes Material, geraten die Elektronen in heftige Bewegung und verlassen das Material als freie Elektronen. Sie umgeben das Material als Elektronenwolke. In einer Röntgenröhre, aber auch in Fernseh- oder Radioröhren, wird diese Elektronenquelle als Kathode bezeichnet.

Es ist egal, ob die Materie fest, flüssig oder gasförmig ist. Je höher die Dichte eines Elements ist, desto größer ist die Wirksamkeit der Erzeugung von Röntgenstrahlen, da bei großer Dichte des Materials die Chance steigt, einen Zusammenprall zwischen freien Elektronen und Elektronen oder Atomkernen zu erzielen. Man verwendet daher in der Praxis ein möglichst dichtes Material, wie z.B. Wolfram, für das Target. Das Target ist Bestandteil der Anode in einer Röntgenröhre.

Elektronenbeschleunigung

Die Elektronen, die an der Kathode emittiert werden, sind negativ geladen.

Es ist eine grundlegende Gesetzmäßigkeit, dass die Elektronen von negativ geladenen Teilen abgestoßen und von positiv geladenen Teilen angezogen werden.

Bringt man eine positive Ladung an die Anode und eine negative Ladung an die Kathode, können die negativ geladenen Elektronen zur positiv geladenen Anode fließen. Vergrößert man den Ladungsunterschied, müssen sich die Elektronen schneller bewegen. Umgekehrt bewegen sie sich langsamer, wenn der Ladungsunterschied kleiner wird.

3.3.3. Absorptionsverhalten verschiedener Stoffe

Werden verschiedene Stoffe in den Strahlengang einer Röntgenröhre gelegt, dann kann man beobachten, dass die Strahlen nicht alle Stoffe gleich gut durchdringen. Bei näherem Betrachten stellt man mehrere Abhängigkeiten fest.

Unterschiedliche Materialdicke

Messergebnisse zeigen, dass bei zunehmender Materialdicke und sonst gleichen Parametern die gemessene Intensität der Röntgenstrahlung hinter dem durchleuchteten Objekt abnimmt.

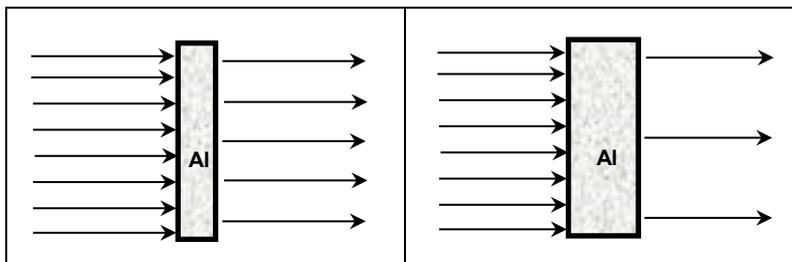


Abbildung 62: Abnahme der Intensität infolge zunehmender Materialdicke

Unterschiedliche Materialien

Werden Bleche unterschiedlicher Werkstoffe aber gleicher Dicke und Abmessung sowie unveränderter Strahlenqualität und -quantität bestrahlt, so stellt man fest, dass die Röntgenintensität nach Durchdringung der Werkstoffe unterschiedlich ist.

Bei schwereren Werkstoffen nimmt die Intensität der durchdrungenen Röntgenstrahlen ab. Da das Volumen der einzelnen Bleche gleich ist und sich nur die Dichte unterscheidet, muss ein Zusammenhang zwischen der Dichte der einzelnen Stoffe und der Schwächung der Röntgenstrahlen bestehen.

Versuche zeigen, dass Röntgenstrahlen einen Körper schlechter durchdringen, wenn die Dichte hoch ist.

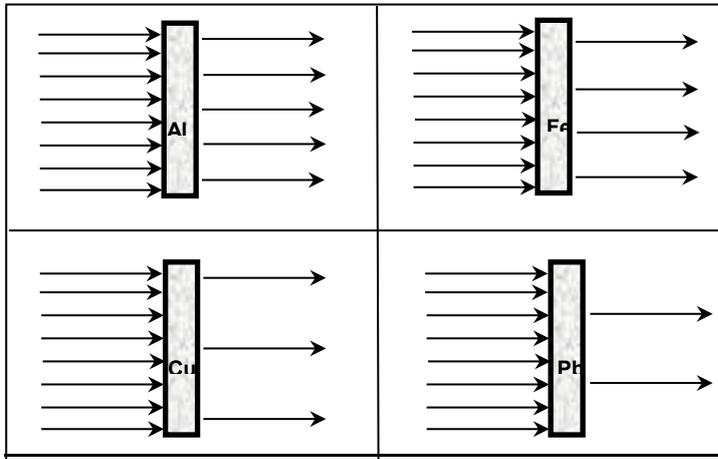


Abbildung 63: Abnahme der Intensität bei gleicher Dicke aber unterschiedlichen Werkstoffen

Unterschiedliche Strahlqualität und gleiche Intensität

Bei Erhöhung der Hochspannung erhöht sich auch die Intensität. Da bei diesem Versuch die Intensität gleich bleiben soll, wird der Röhrenstrom entsprechend verändert.

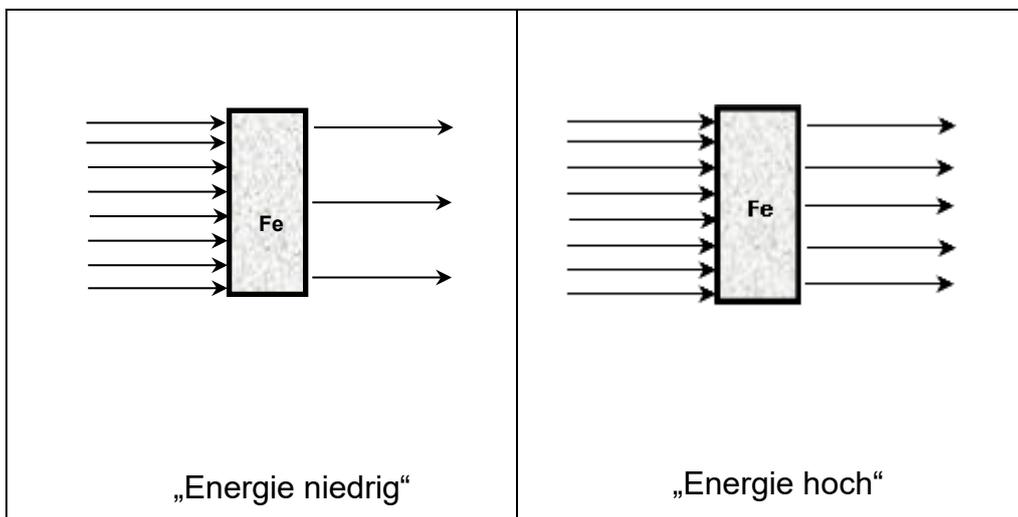


Abbildung 64: Veränderung der Intensität bei Änderung der Energie

In Versuchen wurde festgestellt, dass die durchgehende Intensität auch von der Energie und somit von der Hochspannung abhängt. Harte Röntgenstrahlen können Materie besser durchdringen als weiche Röntgenstrahlen. Die Durchdringungsfähigkeit der

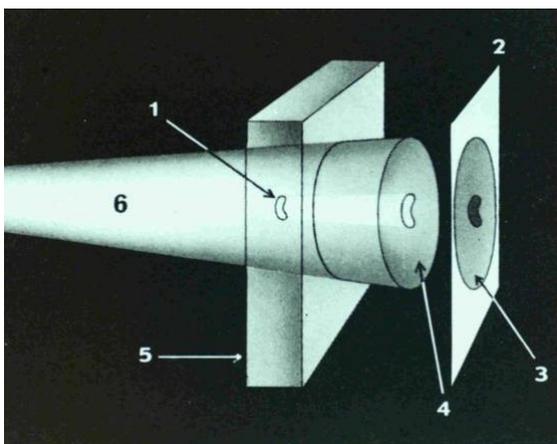
Röntgenstrahlen hängt also auch von ihrer Wellenlänge (Härte) ab. Je härter die Strahlung, desto größer ist ihre Durchdringungsfähigkeit.

Weiche Röntgenstrahlung wird beim Durchgang durch Materie stärker geschwächt (absorbiert) als harte Röntgenstrahlung.

3.3.4. Röntgenprüfung von Festkörpern

Da Röntgenstrahlen einerseits in der Lage sind, Körper zu durchdringen, aber andererseits in Abhängigkeit der Dichte des durchstrahlten Körpers geschwächt werden, liefern die wieder austretenden Röntgenstrahlen Informationen über das Innere des Körpers.

Mit der Durchstrahlungs-Prüfung können Aussagen über das Innere eines Körpers gemacht werden. Diese Aussagen beschränken sich aber grundsätzlich darauf, ob im Inneren des Körpers Dichteunterschiede vorhanden sind. Nur über die örtlich unterschiedliche Schwächung der wieder austretenden Röntgenstrahlen kann eine solche Aussage gemacht werden.



Es gilt folgende Zuordnung:

- 1: Fehlstelle (Einschluss geringer Dichte)
- 2: Film
- 3: Abbildung auf Film
- 4: Strahlungsrelief nach Durchdringung
- 5: Werkstück
- 6: Röntgenstrahl

[© Agfa NDT]

Abbildung 65: Schwächung von Röntgenstrahlung im Festkörper mit Fehlstelle

In Abbildung 65 ist die Schwächung der Röntgenstrahlung in einem Festkörper mit Fehlstelle dargestellt.

Die Intensität des Röntgenstrahlenbündels (6) wird beim Durchgang durch das Bauteil (5) durch Absorption und durch Streuung geschwächt. Hat das Bauteil beispielsweise in Richtung der Strahlung eine Vertiefung an der Oberfläche oder im Inneren einen Hohlraum, so tritt an dieser Stelle hinter dem Bauteil auf Grund geringerer Absorption mehr „Strahlung“ (Intensität) aus als in der Nachbarschaft dieser Stelle. Diese Verteilung der Strahlungsintensität (4) wird dann vom Film (2) registriert und nach der Entwicklung als Schwärzungsunterschied dargestellt.

Die Schwärzungswirkung des Strahlungsreliefs wird noch überlagert von der im Bauteil entstehenden Streustrahlung, die auf Grund von physikalischen Prozessen auftritt und nicht gänzlich ausgeschaltet werden kann. Jeder Punkt eines Röntgenfilmes wird also zum Teil durch das Strahlungsrelief und zum Teil durch die Streustrahlung geschwärzt. Dabei enthält das Strahlungsrelief die Information über das Werkstück, während die Streustrahlung den Film lediglich gleichmäßig schwärzt.

Anmerkung zum Bild: Der Deutlichkeit halber ist der Film um einen kleinen Abstand nach rechts vom Werkstück verschoben. In Wirklichkeit befindet sich der Film aber möglichst dicht am Objekt.

3.3.5. Röntgenprüfung mit digitalen Detektoren

Im vorherigen Kapitel schwärzt die Röntgenstrahlung einen Film, auf dem das Ergebnis der Röntgenprüfung abgelesen werden kann. In den letzten Jahren gewannen auch digitale Röntgendetektoren an Bedeutung. Sie erzeugen digitale Röntgenbilder, die in normalen Formaten wie .tiff oder .jpg auf einer Festplatte abgespeichert werden.

Es gibt drei Arten der digitalen Detektoren:

- Speicherfolie
- Matrixdetektoren

- digitale Röntgenbildverstärker

Die Speicherfolie sieht auf den ersten Blick den typischen Röntgenfilmen ähnlich. Doch ihr Aufbau ist grundlegend verschieden. Die Speicherfolien haben eine Phosphorschicht. Die Elektronen der Phosphor-Atome werden durch die Röntgenstrahlung angeregt und gehen in ein höheres Energielevel über. In dieser Anregung ist die Information gespeichert.

Nach der Belichtung der Speicherfolie müssen die Informationen ausgelesen werden. Dazu wird ein Scanner verwendet, in den die Speicherfolien eingelegt werden. Mit einem Laser wird die Folie abgetastet. Durch das Laserlicht verlassen die Elektronen das höhere Energielevel und fallen zurück in ihr normales Energielevel. Die dabei freiwerdende Energie ist in Form von Licht zu sehen. Dieses Licht wird mit einem Photomultiplier, ein System, das schwaches Licht verstärkt und in elektrische Signale umwandelt, aufgenommen. Die Daten werden in einem Computer zu einem Bild verrechnet.

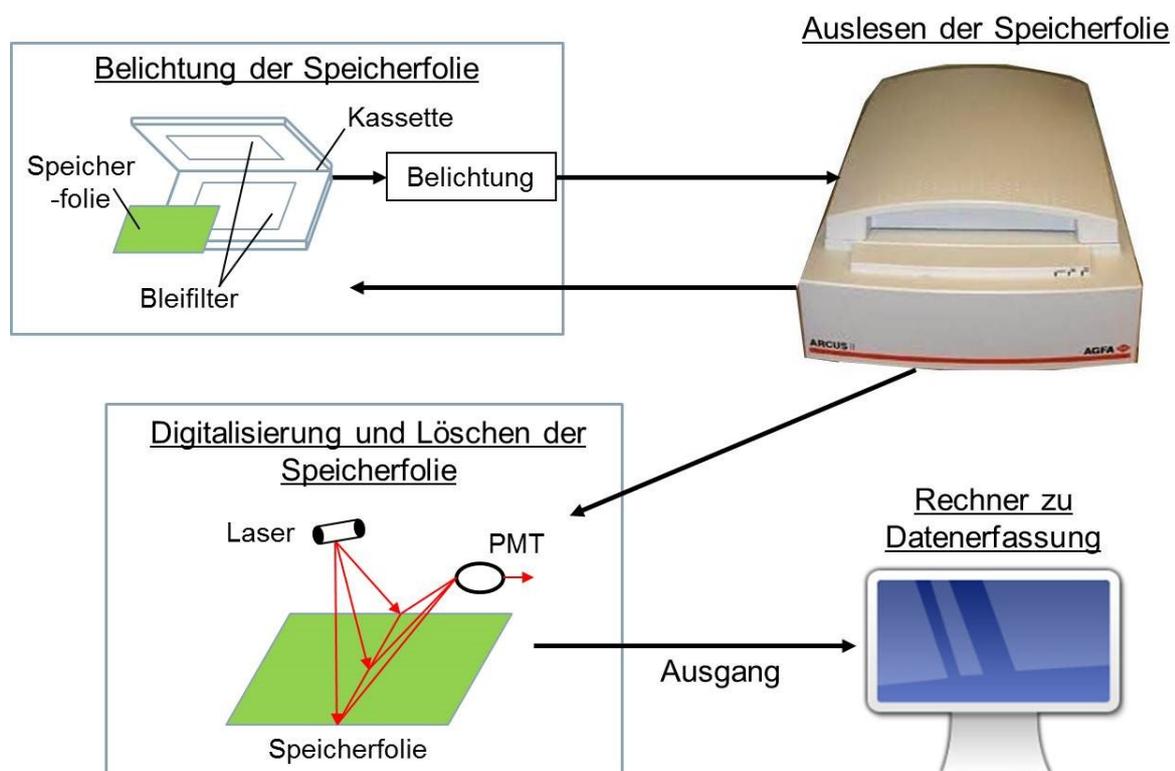


Abbildung 66: Funktionsablauf bei der Speicherfolientechnik

Der Vorteil dieser Technik ist, dass keine chemischen Prozesse zur Entwicklung der Speicherfolien nötig sind und das, obwohl sie durch ihre Ähnlichkeit zum Film für die gleichen Anwendungen in Frage kommen. Die Folien haben eine hohe Linearität und einen hohen Dynamikbereich. Nachteil ist, dass das digitale Bild nicht direkt angezeigt wird, sondern mehrere Arbeitsschritte dazu nötig sind.

Im Gegensatz dazu können mit digitalen Matrixdetektoren die Röntgenbilder in Echtzeit digital dargestellt werden. Die Detektoren bei digitalen Röntgenanlagen wandeln die einfallende Röntgenstrahlung in elektrische Ladung um. Diese elektrische Ladung wird ausgelesen und mit Hilfe elektronischer Messsysteme umgewandelt, um danach als digitales Bild dargestellt zu werden. Ein Detektor besteht aus Millionen von Photodioden welche als Matrix aufgebaut sind.

Die Röntgenstrahlung kann entweder direkt vom Detektor empfangen werden oder mit einem Szintillator (von lateinisch *scintillare*: ‚funkeln‘, ‚flackern‘). Die Szintillatorschicht wandelt die Röntgenstrahlung in sichtbares Licht um, das von den Photodioden besser aufgenommen werden kann.

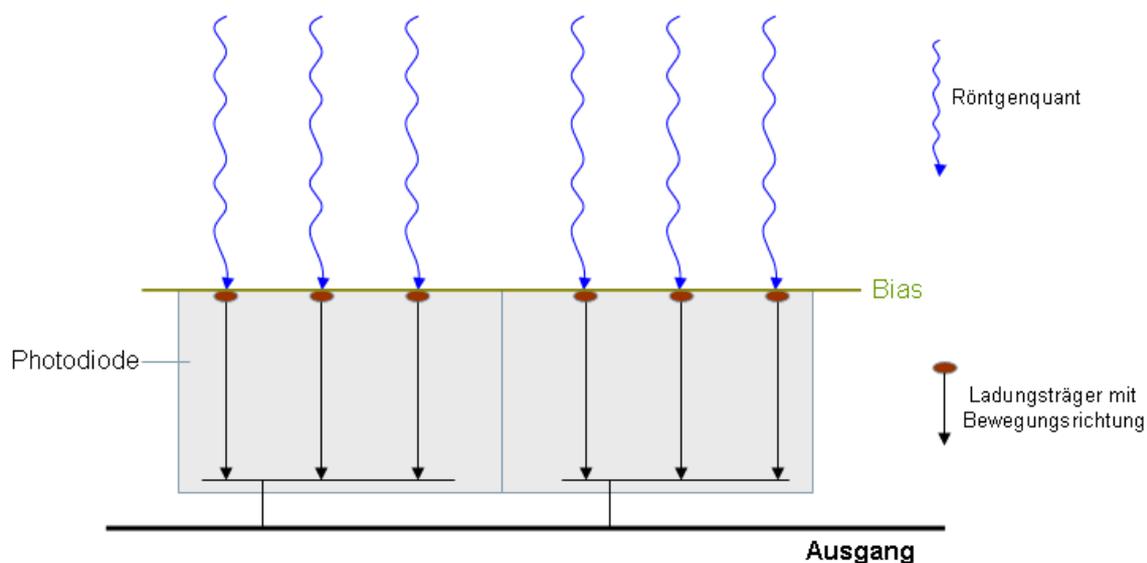
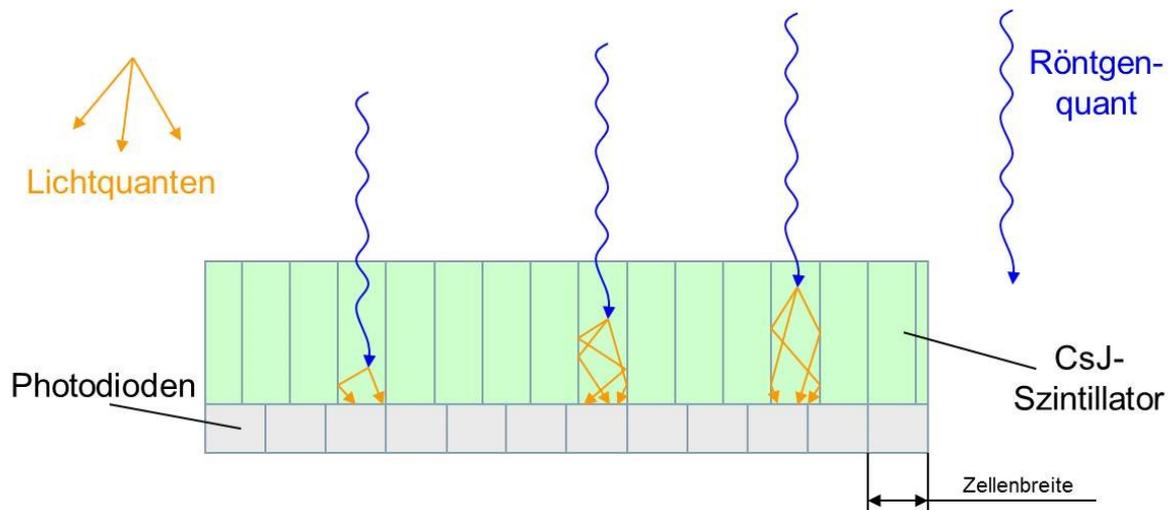


Abbildung 67: Direkte Umwandlung von Röntgenstrahlung in elektrische Signale



**Abbildung 68: Umwandlung der Röntgenstrahlung in sichtbares Licht mit einem Szintillator
(hier in Nadelstruktur)**

Der Vorteil dieser Technik ist, dass ein Live-Bild aufgenommen werden kann. Das Ergebnis der Röntgenprüfung kann direkt und schnell dargestellt und abgespeichert werden. Die Systeme haben einen hohen Dynamikumfang und eine hohe Linearität. Ein Nachteil ist, dass die Lebensdauer stark von der Dosis abhängt. Bei einer Röntgenstrahlung hoher Dosis gehen die Detektoren schnell kaputt. Ein anderer Nachteil ist, dass sich Artefakte bilden können.

Der digitale Röntgenbildverstärker arbeitet ähnlich wie ein analoger Röntgenbildverstärker, nur, dass beim Analogen das Röntgenbild auf einen Schirm dargestellt wird und beim Digitalen mit einer Kamera oder Photoelektrischen Schicht in ein digitales Bild umgewandelt wird.

Die einfallende Röntgenstrahlung trifft auf eine fluoreszierende Schicht. Diese erzeugt sichtbares Licht an den durch die Röntgenstrahlung angeregten Bereichen. Dieses Licht trifft nun auf eine Fotoelektrische-Schicht. Dort werden Elektronen entsprechend der Lichtintensität frei. Diese Elektronen werden durch eine angelegte Hochspannung beschleunigt und mit Hilfe von elektronischen Linsen auf einem Fluoreszenzschirm abgebildet (durch Änderung der Beschleunigungsspannung wird die sog. Bildverstärkung geändert). Dort werden die beschleunigten Elektronen in sichtbares Licht umgewandelt und von einer digitalen Kamera aufgenommen. Somit ist

auch bei dieser Technik ein Live-Bild möglich. Die so erzeugten Bilder können auch digital gespeichert werden.

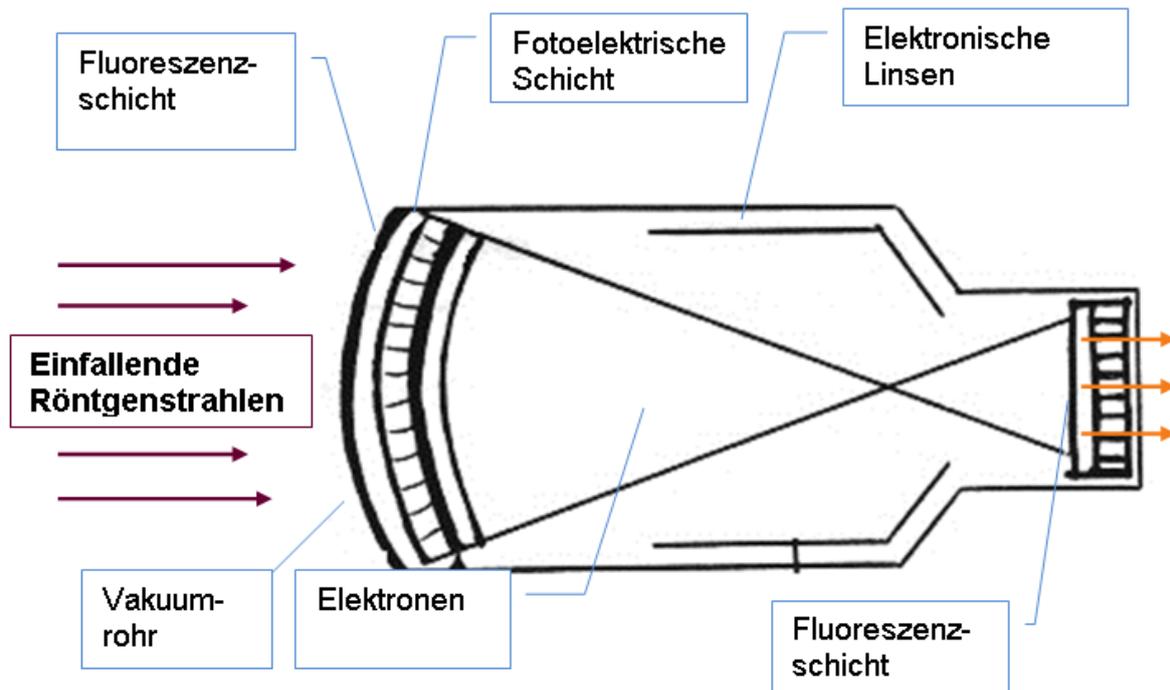


Abbildung 69: Funktionsweise des digitalen Röntgenbildverstärker

Der Vorteil dieser Technik ist, dass auch hier ein schnelles Bild erzeugt werden kann bei einer relativ preiswerten Technik. Der Nachteil ist, dass der Aufbau sehr groß und daher unpraktisch ist.

3.3.6. Streustrahlung

Da Röntgenstrahlung immer dann entsteht, wenn freie Elektronen mit Materie zusammenprallen, ist klar, dass auch die durch Röntgenstrahlung erzeugten Elektronen wieder Röntgenstrahlen erzeugen, wenn sie auf Materie treffen. Im Gegensatz zur Primärstrahlung nennt man diese Strahlung Sekundärstrahlung, welche einen niedrigeren Energiegehalt und eine ungezielte Richtung hat.

Nachfolgend die verschiedenen Arten der Streustrahlung.

Innere Streuung

Innere Streuung entsteht im Objekt, das geröntgt wird, selbst. Durch diese zusätzliche Strahlung entsteht z. B. eine zusätzliche Schwärzung des Röntgenfilms. Durch die ungezielte Richtung erfolgt ein „Verwaschen“ der Ecken und Kanten des Objektes auf dem Film oder Detektor, was als Unschärfe leicht sichtbar ist.

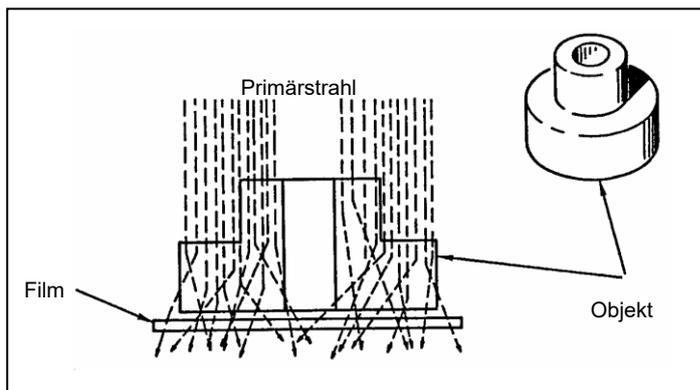


Abbildung 70: Innere Streuung

Seitenstreuung

Trifft die Primärstrahlung Wände oder Objekte in der Nähe des Prüfobjektes oder Teile des Prüfobjektes selbst, so entsteht wiederum Streustrahlung, die als Seitenstreuung bezeichnet wird. Das Röntgenbild wird ebenfalls ungünstig beeinflusst.

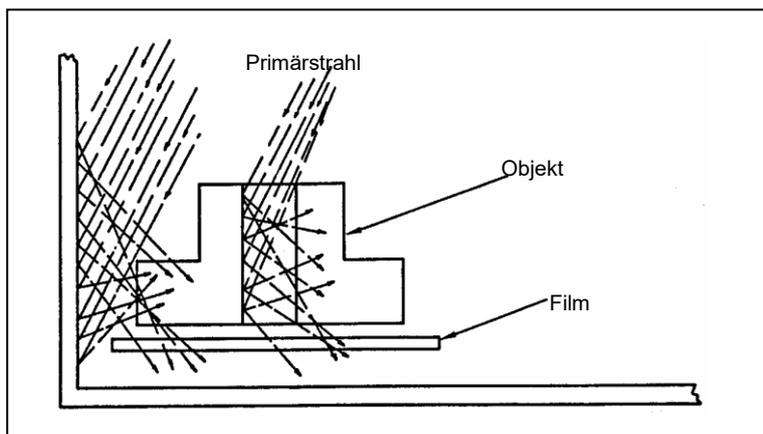


Abbildung 71: Seitenstreuung

Rückstreuung

Rückstreuung ist Sekundärstrahlung, die von der Auflagefläche des Prüfobjektes ausgelöst wird. In diesem Fall wird der Röntgenfilm zusätzlich von der Rückwand bestrahlt. Das Röntgenbild wird ungünstig beeinflusst.

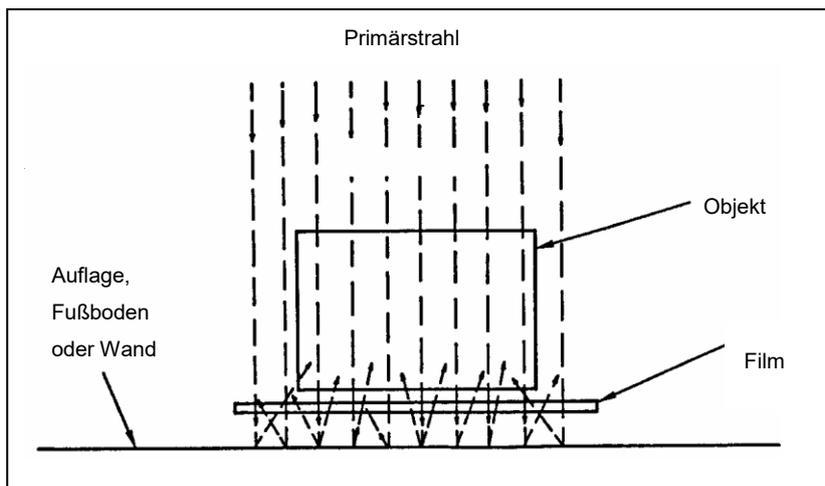


Abbildung 72: Rückstreuung

3.3.7. Anwendungen im Triebwerksbau

Bei der MTU Aero Engines in München wird dieses zerstörungsfreie Prüfverfahren beispielsweise bei den Hochdruckturbinenschaufeln angewendet. Hierbei wird die zeichnungsgerechte Fertigung dieser Schaufeln sichergestellt.

Nachfolgende Abbildung 73 zeigt die bearbeitete Laufschaufel und das dazugehörige (digitale) Röntgenbild.

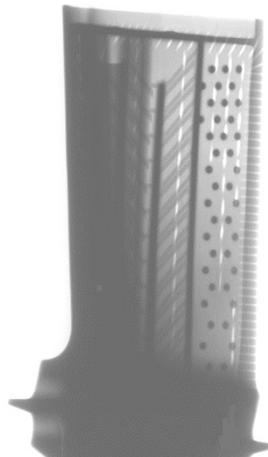


Abbildung 73: Prüfobjekt und Röntgenbild]

Des Weiteren werden die Gussteile vor Anlieferung an die MTU vom jeweiligen Lieferanten auf deren geforderte Qualität überprüft.

Zudem werden die Schweißnähte von Rohrverbindungen durch Röntgen überprüft.

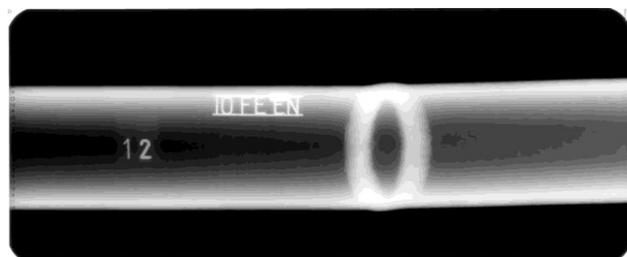


Abbildung 74: Geschweißte Rohrverbindung und Röntgenbild

Quellenangaben:

S. Neuhäusler; B. Henkel; G. Stenzel;

Röntgenprüfung Level 1-3; Skript; ZfP-Schule MTU AE

F. Herold: Intelligente Röntgenbildanalyse zur zerstörungsfreien Prüfung von sicherheitsrelevanten Gußteilen, Books on Demand GmbH, 2006

[1] <http://gs82.photobucket.com/groups/j253/9XDF37XH9Y/?action=view¤t=WilhelmConradRoentgen.jpg&sort=ascending>

3.4. Computertomographie (CT)

3.4.1. Historie

Die Computertomografie basiert auf einem mathematischen Verfahren, das 1917 von dem österreichischen Mathematiker Johan Radon entwickelt wurde. Zu seiner Zeit war es ein rein mathematischer Erkenntnisgewinn ohne jegliche Anwendungsmöglichkeiten. Heute ermöglicht die sog. Radontransformation die zerstörungsfreie räumliche Aufnahme eines Objektes mit seinen gesamten Innenstrukturen.



Abbildung 75: Johan
Radon [1]

Nach Vorarbeiten des Physikers Allan M. Cormack

(* 1924, † 1998) in den 1960er Jahren realisierte der Elektrotechniker Godfrey Hounsfield (* 1919, † 2004) mehrere Prototypen eines Computertomografen. Die erste CT-Aufnahme wurde 1971 an einem Menschen vorgenommen. Beide erhielten für ihre Arbeiten 1979 gemeinsam den Nobelpreis in Medizin.

3.4.2. Grundlagen

Die Computertomografie ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren auf dem Gebiet der Röntgentechnik. Es wird schon längere Zeit in der Medizin eingesetzt. In der ZfP gehört es heute zum Stand der Technik.

Mit dieser ist es möglich virtuelle Schnitte durch das zu prüfende Objekt zu legen.

Mit diverser Software lässt sich das Bauteil Schnitt für Schnitt auf innen liegende Geometrien oder Fehler untersuchen und es ist möglich ihre Größe und Lage zu bestimmen.

Die Genauigkeit hängt hauptsächlich vom Werkstoff und der Bauteilgeometrie ab.

Bei der Computertomografie werden Bauteile, oder in der Medizin Patienten, von einem Röntgenstrahl durchstrahlt. Dabei werden in der Medizin Quelle und Detektoren synchron um den Patienten gedreht und in der ZfP dreht sich meistens das Prüfstück.

Die Röntgenstrahlen, die durch das Untersuchungsobjekt gelangen, werden von mehreren Detektoren gleichzeitig aufgezeichnet. Der Vergleich zwischen ausgesandter und gemessener Strahlungsintensität gibt Aufschluss über die Abschwächung der Strahlung durch das zu untersuchende Prüfstück. Die Daten werden mittels eines mathematischen Verfahrens im Computer zu einem Volumendatensatz zusammengefügt,

aus dem Schnittbilder und 3D-Ansichten in beliebigen Ebenen rekonstruiert werden können.

Zur Untersuchung eines Bauteils wird in der Praxis meist eine Serie von Schnittbildern angefertigt. Mit Hilfe verschiedener Software können Geometrieabmaße, Fehlerlagen und -größen bestimmt werden.

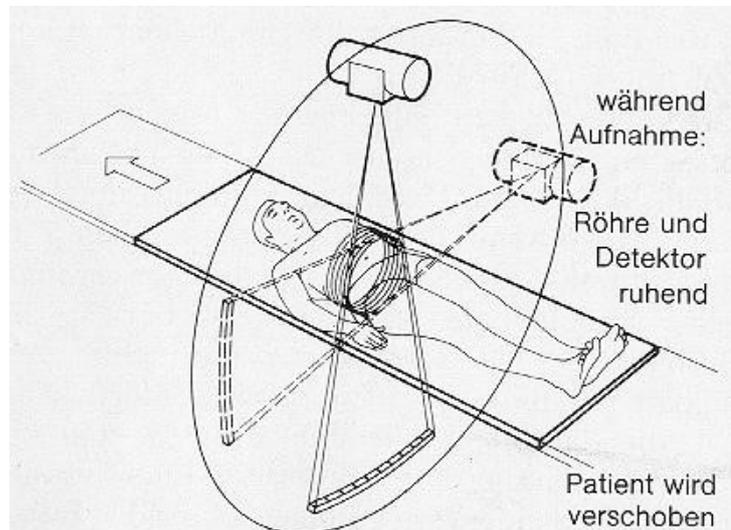


Abbildung 76: Prinzip der medizinischen CT

Zusammenfassend ist festzustellen, dass ein Computertomographiesystem mindestens aus folgenden Komponenten besteht:

- Röntgenquelle bzw. der Röntgenröhre
- Detektoren
- Objektmanipulator bei industriellen Anlagen bzw. Auflagetisch für Patienten in der Medizin
- Computergestützte Kontroll- und Auswertsysteme

Bei der MTU Aero Engines München ist seit dem Jahr 2006 eine Computertomografieanlage im Einsatz. Diese wird hauptsächlich zur automatisierten Überprüfung der Kühlluftkanäle und -hohlräume in Turbinenschaufeln genutzt.

Im Folgenden sollen die einzelnen Komponenten etwas genauer erläutert werden, bevor das Prinzip der CT erklärt wird.

Röntgenröhre

Bei CT-Anlagen wird die Technik der Normal-, Mini-, Mikro- und Nanofokusröhren genutzt. Mit Mini-, Mikro- und Nanofokusröhren kann eine sehr hohe Detaillierbarkeit aufgrund der geringen geometrischen Unschärfe erzielt werden. Minifokusröhren haben Brennfleckdurchmesser von einigen zehntel Millimetern, Mikrofokusröhren haben einige Mikrometer und Nanofokusröhren liegen im Nanometerbereich ($1000\text{nm}=1\mu\text{m}=0,001\text{mm}$).

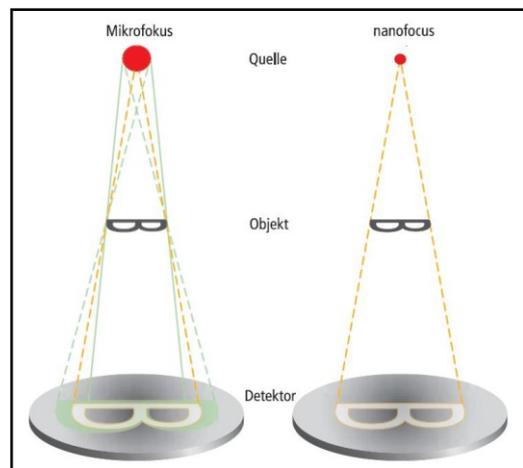


Abbildung 77: Geometrische Vergrößerung und Unschärfe

Die geringste Unschärfe ist also mit Nanofokusröhren (kleinere Brennflecke) zu erzielen, wie es Abbildung 77 zeigt. In dieser schematischen Abbildung der Mikrofokustechnik ist der größere „unscharfe“ Bereich deutlich zu erkennen, während er bei der Nanofokustechnik nur minimal vorhanden ist. Nicht zu sehen ist hier der Vergleich zur Minifokustechnik. Als Erklärung ist zu sagen, dass mit steigender Brennfleckgröße auch die mögliche geometrische Unschärfe größer (also unschärfer) wird.

Bei Verwendung dieser Röhren mit sehr geringem Brennfleckdurchmesser wird die Probe meist von einem fächerförmigen Röntgenstrahl durchstrahlt. Bei Mikro- und Nanofokusröhren wird die Probe auf dem Bildempfänger (Detektor) meist als vergrößertes Röntgenbild dargestellt. Die geometrische Vergrößerung ergibt sich aus der Variation des Objekt-Detektor Abstandes. Mit steigendem Objekt-Detektor-, aber gleichem Fokus-Detektor Abstand, steigt die vergrößernde Wirkung.

Die erreichbare Auflösung (Bildschärfe) ist im Wesentlichen von der Größe der Röntgenquelle bestimmt. Die Bildschärfe bei Verwendung von Mikrofokusröntgenröhren liegt im Bereich von wenigen Mikrometern, bei Nanofokusröhren im Nanometerbereich.

Zu beachten ist allerdings, dass der Detektor durch seine Pixel (Auflösung) in Kombination mit der geometrischen Vergrößerung die wirkliche Auflösung vorgibt.

Detektoren

In erster Linie wird zwischen Flächendetektoren und Zeilendetektoren unterschieden.

Bei einer zweidimensionalen CT mit einem Zeilendetektor (Abbildung 78 oben) wird das Bauteil mit einem Fächerstrahl durchstrahlt und die transmittierte Intensität mit einem Zeilendetektor gemessen.

Bei der Kegelstrahl CT (Abbildung 78 unten) wird das Bauteil von einem sog. Kegelstrahl durchstrahlt und die Intensität per Flächendetektor aufgenommen. Dies verkürzt die Messzeiten bei der 3D CT um ein Vielfaches. Im Gegensatz zur 2D Computertomographie wird hier nämlich der gesamte konusförmige Röntgenstrahl genutzt.

Bei der Messung dreht sich das Objekt im Röntgenkegel, wobei mehrere hundert bis über tausend Projektionen aufgezeichnet werden. Aus diesen zweidimensionalen Projektionen wird eine dreidimensionale Rekonstruktion berechnet, sodass mit nur einer Umdrehung Informationen über die dreidimensionale Struktur des Objektes vorhanden sind.

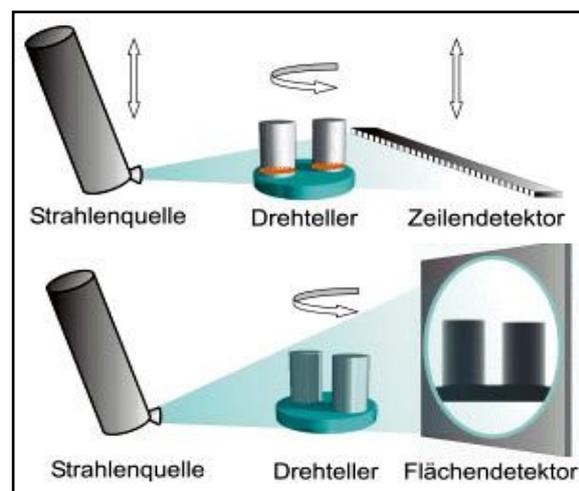


Abbildung 78:

oben: 2D CT mit Zeilendetektor

unten: 3D CT mit Flächendetektor

Die bei dem Verfahren berechnete dreidimensionale Rekonstruktionsmatrix hat die gleiche Auflösung in allen Raumrichtungen. Zu beachten ist aber, dass bei geometrisch komplexen Teilen Streustrahlung auftreten kann, die bei einigen Raumrichtungen eine schlechtere Detailerkennbarkeit bewirkt.

Außerdem nehmen die Röntgenstrahlen, die das Objekt nicht senkrecht zur Drehachse durchstrahlen, einen Winkel $\alpha > 0^\circ$ mit der Horizontalebene ein. Nimmt der Winkel α große Werte an, kommt es zu Einbußen in der Auflösung. Durch sorgsameres Systemdesign in Kombination mit einer Softwarekompensation lassen sich jedoch diese Fehler so minimieren, dass die Vorteile der 3D Tomographie im Vergleich zur 2D Tomographie überwiegen.

Als Detektortyp wird hauptsächlich der Szintillationskristall mit Photodiode verwendet, welcher nachfolgend erläutert wird.

Szintillationskristall mit Photodiode

Unter einem Szintillator ist ein Material zu verstehen, welches beim Durchgang von geladenen Teilchen und Röntgenstrahlen angeregt wird und die Anregungsenergie in Form von Licht (meist im UV- oder sichtbaren Bereich) wieder abgibt (Abbildung 79). Beim Auftreffen von Röntgenstrahlung werden aus den fluoreszierenden Mineralien (aus diesen besteht der Szintillator, z. B. Cäsiumjodid) Photonen herausgelöst, das heißt es kommt zu einem Lichtblitz.

Über die Messung der Lichtmenge, z. B. mit einer Photodiode, kann auf die deponierte Energie geschlossen werden. Dieses analoge Signal wird digitalisiert und an das Rechnersystem gesendet, dort verarbeitet und auf dem Bildschirm dargestellt.

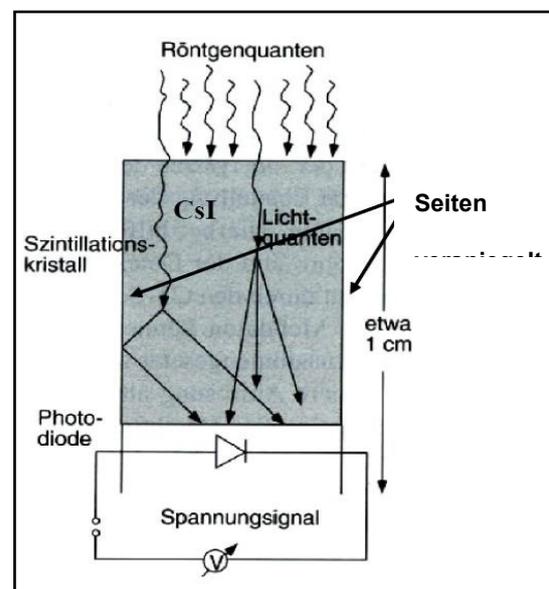


Abbildung 79: Prinzip der Szintillation

Dabei ist die Auflösung von der Anzahl der Detektorpixel abhängig, d. h. je mehr Szintillationskristalle der Detektor pro einer gewissen Fläche hat, desto höher kann der Detektor das Bauteil auflösen und darstellen. Beim CT wird die dreidimensionale Auflösung als Voxelgröße bezeichnet.

Bezogen auf die Detailerkennbarkeit oder Fehlerdarstellbarkeit heißt dies zwar, dass je höher die darstellbare Auflösung ist, desto kleinere Fehler können detektiert werden, allerdings beeinflussen auch die Wanddicke und Streustrahlung die Detailerkennbarkeit.

Objektmanipulator

Objektmanipulatoren sind die mechanisch regelbaren Drehtische auf denen das Bauteil während der Röntgenprüfung befestigt wird. Da Computertomografieanlagen sehr sensible Messsysteme sind, ist darauf zu achten, dass auf das Bauteil während des Durchstrahlens keine Erschütterungen von außen (z.B. vorbeifahrende Stapler) übertragen werden. Oftmals werden luftgelagerte Manipulatoren verwendet, die alle Erschütterungen ausgleichen.

In der Medizin gilt dasselbe Prinzip. Patienten, die einer CT unterzogen werden, müssen während des Vorganges fixiert werden.

Erschütterungen führen zu einer Bewegung des Bauteils, dies ist mit ein Grund für unscharfe Aufnahmen.

Computergestützte Kontroll- und Auswertungssysteme

Die Computertomografen werden über Computersysteme gesteuert. So lassen sich mit einfachen Mitteln alle benötigten Parameter wie Energie, Röhrenstrom, Zeit etc. direkt in die Anlage einspeisen, spezielle Programme speichern und bei Bedarf laden. Des Weiteren werden diverse Softwares, unter anderem Bildverarbeitungsprogramme, zur Bearbeitung der aufgenommenen Röntgenrohdaten verwendet.

Die Bilder lassen sich so leicht und übersichtlich speichern und archivieren. Zusätzlich können die Bilder z. B. durch mathematische Filter (z. B. Schwarz-Weiß - Abbildung

80a oder Farbdarstellung - Abbildung 80b) zur genaueren Untersuchung verbessert werden und sie lassen sich am PC einfach vermessen.

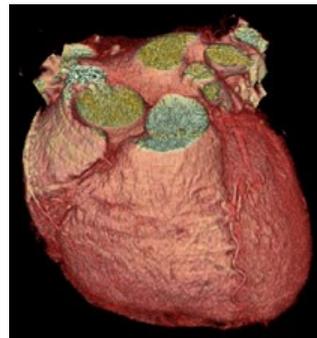


Abbildung 80: (a) CT einer Lunge, (b) CT eines Herzen

Diese Art der Bildverarbeitung ermöglicht somit auch die automatische Fehlererkennung, die deutlich schneller, effizienter und genauer ist als ein menschlicher Prüfer. Außerdem besteht die Möglichkeit, bei der Darstellung der erhaltenen Rohdaten zwischen einem zweidimensionalen oder dreidimensionalen Schnittbild auszuwählen.

3.4.3. Prinzip der Computertomographie

Im Folgenden soll nun erläutert werden, wie ein Computertomograf arbeitet und eine 3D Darstellung überhaupt zustande kommt.

Zur Vereinfachung wird hier erst die Entstehung von einzelnen Schnittbildern erklärt, da sich über diese die dreidimensionale Darstellung besser erläutern lässt.

Abbildung 81 zeigt einen Würfel der geschnitten wurde. Das rote Feld soll einen Fehler im Würfel darstellen. Es werden nun die einzelnen Schichten von oben nach unten gescannt.

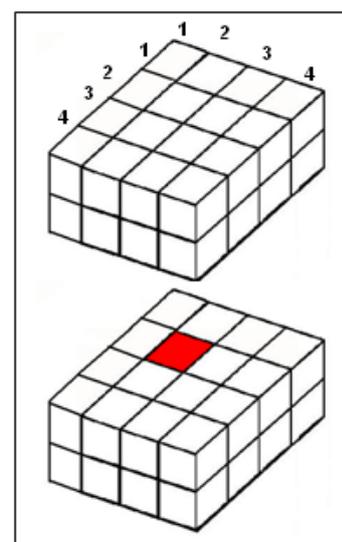


Abbildung 81:
Schnitt eines Würfels

Exemplarisch wird nun die fehlerhafte Schicht gescannt. Anhand der schematischen Zeichnungen der Röntgensysteme (Abbildung 82, 83 und 84) bestehend aus Röntgenquelle, Probenquerschnitt mit Fehler und einem Detektor, soll gezeigt werden, wie sich die Rohdaten einer Computertomografie ermitteln lassen, die zur 2D oder 3D Rekonstruktion nötig sind.

Zur Vereinfachung wurden alle Röntgenstrahlen senkrecht zum Bauteil gezeichnet, wohl wissend, dass dies in der Realität nicht so ist. In diesem Beispiel wurden Röntgenquelle und Detektor synchron um das Bauteil bewegt, was keinen Unterschied zur Drehung der Probe selbst darstellen würde. Der Abstand von Röntgenquelle und Detektor ist immer konstant (Zeichnung ist teilweise nicht maßstabsgetreu).

Schritt 1: Die Probe wird von links durchstrahlt (Abbildung 82).

Bitte beachten, es handelt sich hier um eine Draufsicht!

Die Position der Röntgenquelle, der Probe und des Detektors werden gespeichert.

Der Detektor nimmt nun die hinter dem Bauteil austretende Intensität

auf. Es können anhand der gemessenen Intensitäten zum einen die

Abmaße der Probe, als auch der Abstand des Fehlers von den Bauteilkanten bestimmt werden, da homogene und inhomogene durchstrahlte Querschnitte unterschiedliche Mengen absorbieren. Die Fehlerstelle wird also vom Computer durch die erhaltenen Messdaten vom homogenen Grundwerkstoff abgegrenzt.

Diese Daten werden ebenfalls gespeichert. Wie tief der Fehler im Bauteil liegt ist nur bedingt durch den Intensitätsverlust zu errechnen.

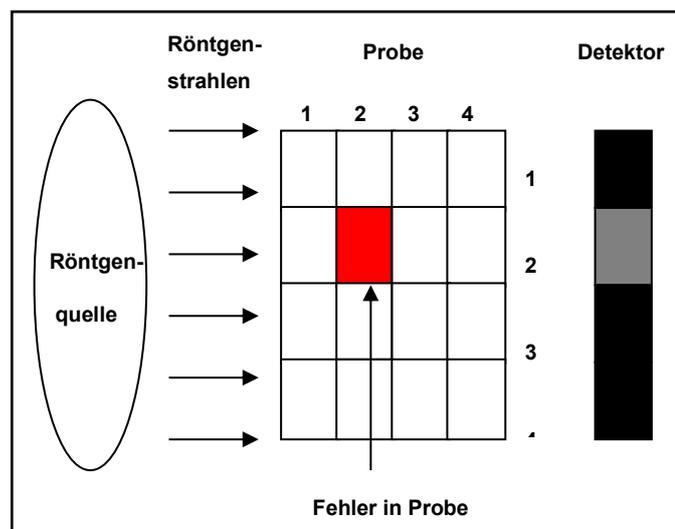


Abbildung 82: : Prinzip CT: Einstrahlung von links

Schritt 2: Röntgenquelle und Detektor werden synchron um 45° gedreht (Abbildung 83) und die Position der Komponenten wieder gespeichert. Die Probe wird ein weiteres Mal durchstrahlt. Die aufgenommenen Intensitäten hinter der Probe geben neuen Aufschluss über die voraussichtliche Geometrie der Probe und der Lage des Fehlers. Denn die Intensitäten, die der Detektor aufnimmt, unterscheiden sich sowohl in ihrer Menge, als auch in dem Ausmaß, in dem sie auf den Detektor treffen, von denen der Horizontal-einstrahlung. Mit Ausmaß ist die Länge des Fehlers auf dem Detektor gemeint.

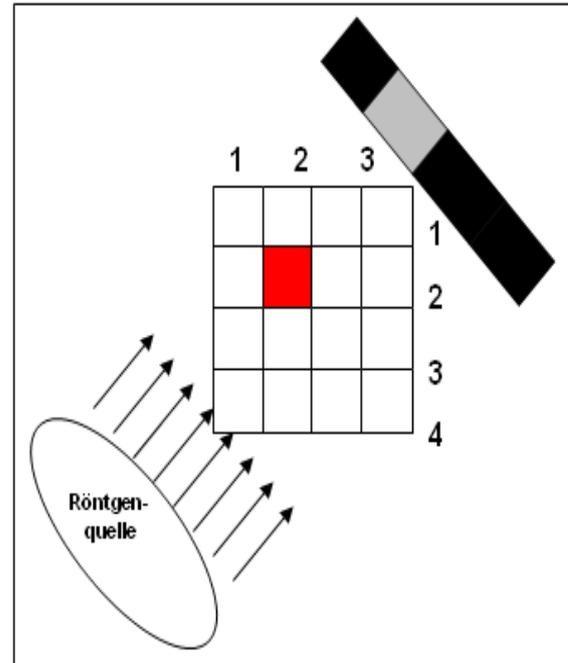


Abbildung 83: Einstrahlung 45°

Diese Position zeigt uns also den Abstand des Fehlers von den Kanten 1/1 und 4/4 (Diagonale) der Probe.

Schritt 3: In Abbildung 84 wird die Probe von unten durchstrahlt (Vorsicht: Draufsicht!!!). Dabei werden wie bei den anderen Darstellungen die Positionen aller Komponenten und die hinter dem Bauteil gemessenen verschiedenen Intensitäten gespeichert. Durch diese dritte Durchstrahlung ist es nun möglich, eine Aussage über die Position des Fehlers in diesem Schnitt der Probe zu machen. Er liegt im Feld 2/2.

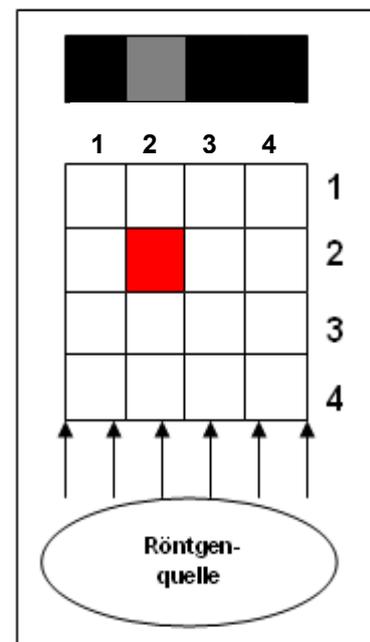


Abbildung 84: Prinzip CT:
Einstrahlung von unten

Der Computer kann nun anhand der erhaltenen Datenmengen ein 2-dimensionales Schnittbild des Probenkörpers und des darin liegenden Fehlers rekonstruieren. Dieses ist allerdings nur sehr grob, da zu einer genauen Bestimmung die Winkel, in denen durchstrahlt wird, um einiges enger gewählt werden müssen.

Wie sehr die Menge der Durchstrahlungen bei einer 360° Umdrehung von Röntgenquelle und Detektor eine Rolle spielt, soll im folgenden Bild verdeutlicht werden. Als Probe wurde der unten abgebildete Treppenkörper verwendet.

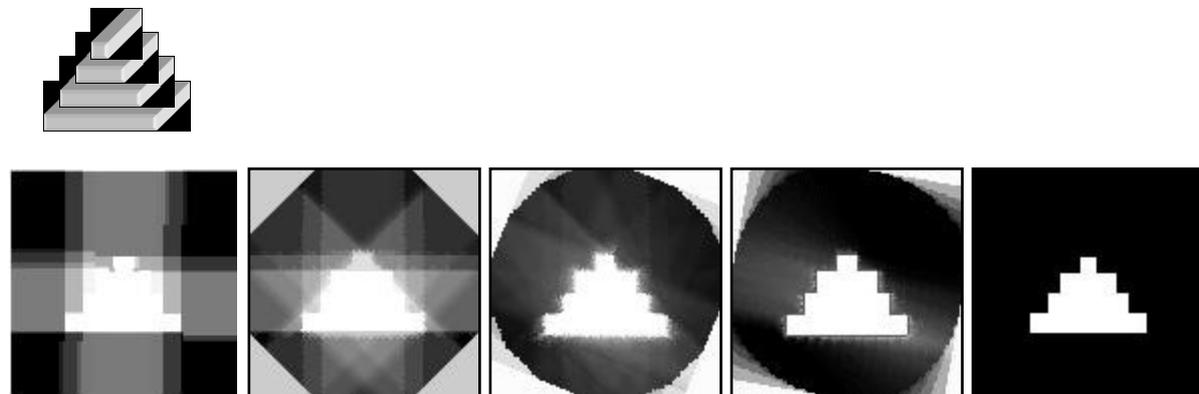


Abbildung 85: Darstellbarkeit einer Probe in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchstrahlungen

- Teilbild 1 : 4 Durchstrahlungen alle 90°
- Teilbild 2 : 8 Durchstrahlungen alle 45°
- Teilbild 3 : 16 Durchstrahlungen alle 22,5°
- Teilbild 4 : 36 Durchstrahlungen alle 10°
- Teilbild 5 : Originalbild der Probe

Es ist anhand dieser Bilder eindeutig zu sehen, dass die Genauigkeit der CT Aufnahmen mit der Anzahl der Messungen pro 360° steigt.

Unterschied zwischen 2D und 3D CT:

- Ist vom CT-Gerät ein Tomogramm (Schichtaufnahme) des Prüfstückes erstellt worden, können nun weitere Schichten gescannt werden. Wird die Probe horizontal (Drehung des Prüfstückes oder synchrones Drehen von Röntgenquelle und Detektor) und vertikal (verändern der Höhe von Röntgenquelle und Detektor) gescannt, so bezeichnet man dies als 2D-Computertomografie.
- Durch die Zusammensetzung aller dieser Schichtaufnahmen ist eine 3D Darstellung möglich. Die verwendeten Detektoren sind Zeilendetektoren.
- Bei der 3D-Computertomografie werden mit einem einzelnen Scan ganze Volumen erfasst. Dies erfolgt durch die komplette Aufnahme des Kegelstrahles durch einen Flächendetektor. Bei der 2D-CT wird nicht jede horizontale Schicht, wie in Abbildung 77 oben dargestellt, gescannt. Es werden nur vertikale Schnitte durchgeführt, da die Höhe der Probe mit abgebildet werden kann. Der Computer kann diese Daten nun wiederum zu einer 3D Darstellung zusammensetzen. Durch diese können wiederum beliebige Schnitte gelegt werden.

Das Nutzen des Flächendetektors führt zu wesentlich geringeren Zeiten beim Durchführen einer CT.

Bei geometrisch komplexen Teilen tritt Streustrahlung auf. Diese wird bei der 2D CT besser kompensiert. Somit ist die Detailgenauigkeit in diesen Bereichen etwas besser.

Des Weiteren ist eine geringere Auflösung in den Bereichen zu erwarten, die weiter entfernt von der Drehachse liegen (Bildverzerrung).

3.4.4. Anwendungen im Triebwerksbau

Als Beispiel soll eine Turbinenlaufschaufel mit inneren Kühlluft-Hohlräumen dienen. Die inneren Hohlräume werden von außen mit Laser gebohrt, damit im Betrieb Kühlluft ausströmen kann. Beim Bohren ist es durchaus möglich, dass die gegenüberliegende Wand im Inneren angebohrt wird. Ab einer bestimmten Anbohrtiefe ist dies nicht mehr zulässig.

Ist auf dem Röntgenbild nur ein dunkler Punkt zu erkennen, stellt sich die nun die Frage, wie tief die angebohrte Stelle ist.

Dies ist zu beantworten, indem durch diese Stelle im Bauteil ein Schnitt gelegt wird. Diese Untersuchung hat allerdings zur Folge, dass das Bauteil zerstört wird.

Eine zerstörungsfreie Prüfung ist hingegen mit Hilfe des Computertomographen möglich. Dabei wird der „Schnitt“ mit Röntgenstrahlung hergestellt. Abbildung 86 zeigt einen CT-Schnitt durch eine Turbinenschaufel.



Abbildung 86: CT-Schnitt durch eine Turbinenschaufel

Quellenangaben:

Industrielle Computertomografie Tagung, Shaker Verlag, 2008

[1] <http://www.math.muni.cz/~sisma/English/enobraz.html>

3.5. Wirbelstromverfahren

3.5.1. Grundlagen

Das Wirbelstromprüfverfahren ist ein relativ aufwendiges Verfahren zum Prüfen von Materialoberflächen auf Fehler. Durch die Wirbelstromprüfung ist es möglich, Fehler bzw. Risse, welche $< 1 \mu\text{m}$ sind, nachzuweisen. Diese Fehler sind mit dem bloßen Auge nicht mehr zu erkennen.

Das Wirbelstromverfahren kann auch in der Serienprüfung eingesetzt werden.

Folgende Punkte sind für die Durchführung zu beachten:

- Die Probe muss elektrisch leitfähig sein
- Ferromagnetische Stoffe können nur an der Oberfläche geprüft werden
- Für die Spule muss der zu prüfende Bereich zugänglich sein
- Der Abstand der Prüfspule zur Probe ist so gering wie möglich zu halten, um das höchste Fehlernachweisvermögen beizubehalten
- Probenoberfläche muss gereinigt und frei von metallischen Verunreinigungen sein, da sonst das Prüfergebnis verfälscht wird

Beim Wirbelstromverfahren wird durch ein wechselndes Magnetfeld ein Wirbelstrom in der Probe erzeugt. Dieser Wirbelstrom erzeugt wiederum ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Magnetfeld immer genau entgegengerichtet ist und dieses schwächt. Im Bereich von Fehlstellen wird dieses Feld verändert. Das Messergebnis wird anschließend auf einem Messgerät (z. B. Oszilloskop) angezeigt und ausgewertet.

Elektrizität

Atome bestehen aus einem positiven Atomkern und negativen Elektronen, die ihn umkreisen. Es besteht eine Balance, sodass nach außen hin das Gefüge elektrisch neutral erscheint. Durch Entfernen bzw. Hinzufügen von Elektronen an Atomen können Ladungsungleichgewichte im gesamten Stoff entstehen. Die Elektronen (die Teile, die sich in einem Atomgefüge bewegen können) werden versuchen, das Ungleichgewicht

durch Wandern innerhalb des Stoffes wieder auszugleichen. Das Wandern der Elektronen bezeichnet man als Strom I [A]. Damit Strom fließt, muss zuerst ein Ungleichgewicht der Ladungen vorhanden sein. Je höher das Ungleichgewicht, desto mehr Strom fließt. Das Ungleichgewicht wird auch Spannung U [V] genannt. Abhängig von den Werkstoffeigenschaften, dem Querschnitt sowie der Länge wirkt dem elektrischen Strom ein Widerstand R [Ω] entgegen. Diese drei stehen über das „Ohm'sche Gesetz“ in Beziehung:

Ohm'sches Gesetz

Für den ohmschen Widerstand gilt die Beziehung:

$$R = \frac{U}{I}$$

R= ohmscher Widerstand

U= elektrische Spannung

I= elektrischer Strom

Der elektrische Widerstand eines Verbrauchers, z. B. eines Drahtes mit kreisförmigen Querschnitt, hängt von der Länge, vom Durchmesser und vom Material ab. Die Abhängigkeit von den eben genannten Faktoren wird durch folgende Formel beschrieben:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

R= ohmscher Widerstand

ρ = spezifischer Widerstand

L= Länge

A= Querschnittsfläche

Fließender Strom erzeugt grundsätzlich eine Leistung. Diese elektrische Leistung P [W] ist das Produkt aus Spannung U und Strom I .

$$P = U \cdot I$$

P = Leistung

U = Spannung

I = Stromstärke

Magnetismus

Ein Metallstück, das andere Metallstücke anzieht oder festhält, wird Magnet genannt.

Diese Eigenschaft ist auf die ferromagnetischen Werkstoffe wie Eisen, Reinkobalt und Reinnickel beschränkt.

Man unterscheidet zwischen Permanent- bzw. Dauermagneten und Elektromagneten (magnetische Wirkung auf Stromfluss zurückzuführen).

Ein Magnet besteht immer aus zwei Polen (Nord- und Südpol), an denen die Anziehungskraft am stärksten ist. Bei einem ferromagnetischen Stoff sind die sog. Elementarmagnete alle in die gleiche Richtung angeordnet und erzeugen so ein gemeinsames großes Feld.

Nimmt man nun ein einfaches unmagnetisiertes oder ferromagnetisches metallisches Werkstück, so wird man kein Magnetfeld messen. Wird aber durch dieses Werkstück ein Strom geschickt, so bildet sich ein konzentrisches kreisförmiges Magnetfeld um das Werkstück. Geht man nun weiter und wickelt den Draht zu einer zylindrischen Spule, so verhält sich das Magnetfeld wie das eines Stabmagneten.

Die Stärke des magnetischen Feldes eines stromdurchflossenen Werkstücks ist abhängig von der Stromstärke und bei Spulen zusätzlich von der Anzahl der Windungen und dem Abstand der Windungen zueinander, d. h. der Baulänge der Spule. Diese Zusammenhänge der magnetischen Feldstärke werden im Folgenden dargestellt.

Diese durch den Stromfluss erzeugte magnetische Feldstärke besitzt das Formelzeichen H $\left[\frac{A}{m} \right]$.

Magnetische Feldstärke eines stromdurchflossenen Leiters

(gemessen außerhalb des Leiters):

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

H= magnetische Feldstärke

I= Stromstärke

a= Abstand vom Leiter

Magnetische Feldstärke einer stromdurchflossenen Spule

(gemessen innerhalb der Spule):

$$H = \frac{I \cdot N}{l} \quad \Leftrightarrow \quad H = \frac{\Theta}{l}$$

N= Anzahl der Windungen

l= Baulänge

Θ = magnetische Durchflutung

Magnetischer Fluss

Die Summe der in einem stromdurchflossenen Leiter erzeugten Feldlinien.

Formelzeichen Φ , [Wb] (Weber) = [Vs] (Voltsekunden).

$$\phi = \frac{\Theta}{R}$$

Magnetische Flussdichte

Anzahl der Feldlinien je Quadratzentimeter Durchtrittsfläche.

$$\text{Formelzeichen } B; [T] \text{ (Tesla)} = \left[\frac{Vs}{m^2} \right] = \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$$

Magnetische Flussdichte einer Luftspule

$$B_0 = \mu_0 \cdot H$$

μ_0 = magnetische Feldkonstante (Permeabilitätswert von Luft: $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cong 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$)

3.5.2. Induktionsgesetz

Bekannt ist bereits, dass ein stromdurchflossenes Werkstück ein Magnetfeld ausbildet. Dieses Prinzip kann auch umgekehrt genutzt werden: Bringt man einen Leiter in ein genügend starkes Magnetfeld ein, so wird eine Spannung induziert, die mit einem Spannungsmessgerät nachgewiesen werden kann. Je höher die Geschwindigkeit ist, mit der der Leiter ins Feld eingebracht wird, desto höher ist die erzeugte Spannung. Im Ruhezustand allerdings wird das Spannungsmessgerät angezeigt. Strom fließt also nur, wenn die magnetische Flussdichte sich ändert. Dieser Effekt wird als Induktion bezeichnet. Demzufolge heißt die entstehende Spannung Induktionsspannung und der fließende Strom Induktionsstrom.

Das Induktionsgesetz besagt also: „Die in einem Leiter induzierte Spannung ist umso höher, je größer die Flussdichtenänderung pro Zeiteinheit ist.“

Ebenfalls gilt, dass der Induktionsstrom immer dem Grund seiner Erzeugung exakt entgegenwirkt.

3.5.3. Wechselstromwiderstand und Induktivität einer Spule

Wenn ein Wechselstrom gleicher Spannung durch eine Spule fließt, stellt man fest, dass die Stromstärke deutlich niedriger als bei Gleichstrom ist. Durch Einschieben des Eisenkernes sinkt die Stromstärke weiter ab und bei Verwendung eines geschlossenen U - Kernes tritt eine weitere Verminderung ein. Aus dem Versuch kann man schließen, dass die Spule dem Fließen des Wechselstromes einen größeren Widerstand entgegengesetzt als dem Fließen des Gleichstromes.

Erhöht man die Frequenz der Wechselfspannung bei jeweils gleich gehaltener Wechselfspannungsamplitude, wird man einen immer kleineren Spulenstrom messen.

Bei der Selbstinduktion wurde festgestellt, dass eine Induktionsspannung in einer Spule entsteht, wenn sich das durch die Spule erzeugte Magnetfeld um die Spule ändert. Diese Induktionsspannung wirkt der ursprünglichen Spannung entgegen und hemmt somit den Strom in der Spule. Diese Selbstinduktion wird durch eine Eigenschaft der Spule hervorgerufen, die als Induktivität L bezeichnet wird.

Die Maßeinheit der Induktivität ist das Henry [H]. Eine Spule hat die Induktivität von 1H, wenn in ihr eine Stromänderung von einem Ampere in einer Sekunde eine Spannung von 1 Volt induziert.

Die Festlegung der Einheit H zeigt ihren Zusammenhang mit anderen Einheiten:

$$1H = \frac{1V}{A/s} = \frac{1Vs}{A} = 1\Omega \cdot s$$

3.5.4. Eindringtiefe

Normalerweise bezeichnet man diejenige Tiefe, bei der die Wirbelstromdichte auf den Wert $1/e$ ($e = 2,7183$) entsprechend 36,8 % des an der Oberfläche vorhandenen Wertes abgesunken ist, als Standard - Eindringtiefe δ (Delta).

Von größerer Bedeutung für die Prüfpraxis ist die Tiefe, bis zu der eine Fehlstelle noch nachgewiesen werden kann. Man bezeichnet diesen Wert als effektive Eindringtiefe.

Hierbei spielt auch das Prüfsystem eine Rolle. Außerdem wird dieser Wert von der geometrischen Anordnung beeinflusst und kann bei niedrigen Prüffrequenzen die Standard-Eindringtiefe deutlich überschreiten.

Die effektive Eindringtiefe berechnet sich näherungsweise nach der Formel:

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \kappa \cdot \mu_r}} \quad \Leftrightarrow \quad \delta = \frac{660}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}}$$

f = Frequenz

κ = Leitfähigkeit

σ = Leitfähigkeit (IACS = International Annealed Copper Standard)

μ_r = relative Permeabilität

Aus der Formel ist zu entnehmen, dass die Eindringtiefe umso kleiner wird, je größer Frequenz, Leitfähigkeit oder relative Permeabilität werden. Die Prüffrequenz hängt bei der Wirbelstromprüfung wesentlich von der geforderten effektiven Eindringtiefe ab. Andererseits wird mit steigender effektiver Eindringtiefe das Fehlernachweisvermögen ungünstig beeinflusst. Man wählt daher die Eindringtiefe nicht größer als unbedingt erforderlich.

3.5.5. Wirbelstromprüfverfahren

Wirbelströme werden beim Prüfverfahren gezielt eingesetzt, um Informationen über die Eigenschaften des zu prüfenden Bauteils zu erhalten. Man ordnet eine Spule senkrecht über dem zu prüfenden Werkstoff an.

An der Spule liegt eine Wechselspannung U mit der Frequenz f an. In Abhängigkeit vom Spulenstrom I entsteht ein magnetisches Wechselfeld H -, das stirnseitig aus der Spule austritt und sich um die Spule schließt. Ist die Spule nahe genug am Werkstück angeordnet, durchdringen die Feldlinien das Werkstück.

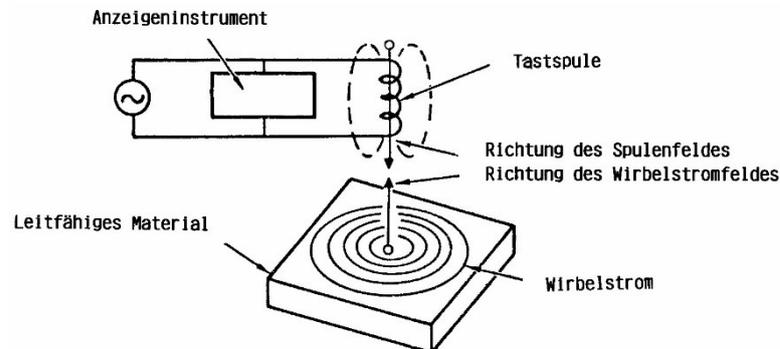


Abbildung 87: Prinzip der Wirbelstromprüfung

Im Werkstück, das aus einem elektrisch leitenden Material besteht, induzieren die Feldlinien eine Spannung senkrecht zum Feldlinienverlauf.

Diese Spannung ist die Ursache für den fließenden Wirbelstrom I_w . Der Wirbelstrom erzeugt wiederum dazu senkrecht ein Magnetfeld H_w , das dem Magnetfeld der Spule entgegengerichtet ist. Es schwächt das Spulenfeld und durch Überlagerung beider Felder H - und H_w entsteht das resultierende Feld.

Bei fest vorgegebenem Spulenstrom I (bzw. Spannung U) beeinflusst das durch den Wirbelstrom entstehende Magnetfeld H durch Induktionswirkung die Spannung bzw. den Strom I und den Phasenwinkel φ des Stromes, der durch die Spule fließt. Durch Beobachtung der beeinflussten Größen können daher die Wirbelströme I_w nachgewiesen werden.

Werkstoff und Frequenz

Im Prinzip gilt die Regel, dass das oberflächennahe Fehlernachweisvermögen mit zunehmender Frequenz steigt. Dies ist jedoch nicht allgemein zutreffend. Daher werden meistens die zu prüfenden Werkstoffe grob in drei Gruppen eingeteilt, denen ein bestimmtes Frequenzband zugeteilt wird.

Es wird unterschieden zwischen:

austenitisch

mit einer Leitfähigkeit von $0,4 - 0,5 \kappa = 0,7 - 0,9\% \text{ IACS}$

- ferromagnetisch: mit einer Leitfähigkeit sowohl im austenitischen als auch im Bereich der Nicht-Eisen-Metalle. Hier spielt die relative Permeabilität die Hauptrolle.
- nicht-Eisen-Metalle: mit einer Leitfähigkeit von $3 - 40 \kappa = 5,2 - 7,0\%$ IACS

Für die Einstellung der Frequenz ist zu merken: „Zunehmende elektrische Leitfähigkeit bedingt abnehmende Prüffrequenz“.

Justierung

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, müssen Gerät und Spule zusammen justiert werden. Man stellt das Gerät auf eine vorher festgelegte Verstärkung ein. Dabei geht man so vor, dass mit einem Schlitz definierter Abmessung und einem Material mit festgelegten Eigenschaften (z. B. Werkstoff, Härte, Dicke, Schichtdicke usw.) ein Signal von festgelegter Höhe eingestellt wird.

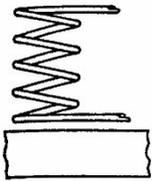
Kanteneffekt

Enden oder Kanten lenken die Wirbelströme ab, die somit entstehende Falschanzeige wird als Kanteneffekt bezeichnet. Die Kante wirkt quasi wie ein großer Riss und kann andere Fehlstellen in der Nähe überdecken.

3.5.6. Verwendete Spulsysteme

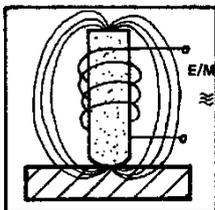
Zur Erzeugung der Wirbelströme im Bauteil und Messung des resultierenden Feldes werden Spulen ohne und mit ferromagnetischem Kern verwendet. Je nach verwendeter elektrischer Anordnung und Prüfaufgabe können diese Spulen sehr unterschiedlich in ihrer Ausführung sein. Grundsätzlich ist zwischen Tastspulen und Durchlaufspulen zu unterscheiden.

Tastspulen



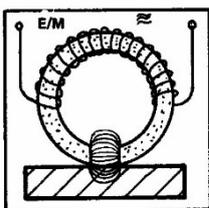
Einfache Tastspule:

Die Tastspulen werden auf das Werkstück aufgesetzt, wobei die Achse der Spule meistens senkrecht auf der Bauteilfläche aufsitzt. Das magnetische Feld hat etwa den gleichen Durchmesser wie die Spule.



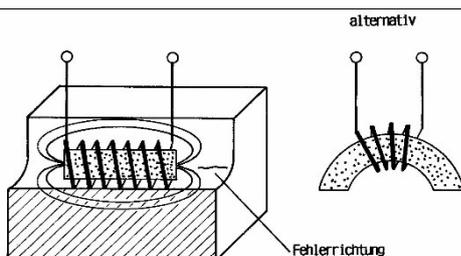
Zylinderkernspule:

Diese Spule hat die einfachste Bauart. Um einen zylindrischen Ferritkern ist eine Spule aus Kupferlackdraht von ca. 0,05 bis 0,1mm Durchmesser gewickelt. Der Kanteneffekt der Zylinderkernspule ist erheblich, da das Magnetfeld dieser Spule weit streut.



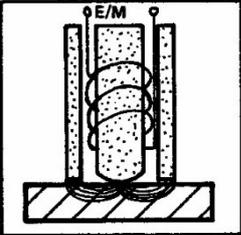
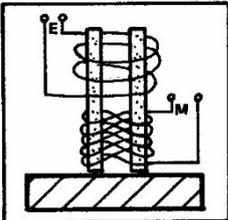
Ringkernspule:

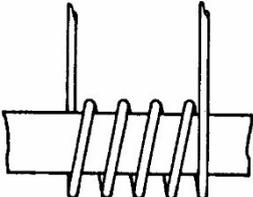
Auf einen geschlitzten Ring aus Ferritmaterial wird eine Spule aus Kupferlackdraht gewickelt. Diese Sonde ist wegen der Konzentration der Feldlinien am Spalt empfindlicher als die Zylinderkernspule. Sie ist außerdem richtungsabhängig. Damit kann der Verlauf eines Risses bestimmt werden.

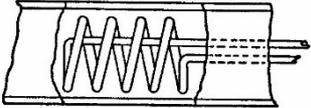


Parallelschleife:

Bei Prüfung von Hohlkehlen, Zahngründen und ähnlich geometrisch komplizierten Teilen auf Fehlstellen in Richtung der Ausdehnung oder Vertiefung werden gelegentlich Spulen verwendet, deren Achse parallel zur Oberfläche verläuft.

	<p>Hiermit lassen sich Fehlstellen parallel zur Spulenachse entdecken. Der Kanteneffekt ist erheblich.</p>
	<p><u>Fokussierte Spule:</u></p> <p>Eine Kombination von Zylinderkernspule und Ringkernspule ist die "fokussierte Spule". Um einen Zylinderkern ist eine Spule gewickelt. Diese Spule wird in ein Rohr aus Ferritmaterial eingegossen. Damit entsteht ein kreisrunder Spalt mit einem sehr eng begrenzten Feld. Der Kanteneffekt ist sehr gering. Es ist keine Richtungsabhängigkeit vorhanden. Die Spule muss sehr genau ausgerichtet werden.</p>
	<p><u>Differenzspule:</u></p> <p>Auf die Schenkel eines geschlitzten Ferritkerns von 1,0 oder 1,5mm Durchmesser wird eine achtförmige Spule gewickelt. In diesem Fall ist eine genaue Anpassung bezüglich Windungszahl und Induktivität der paarweisen Spulen unbedingt erforderlich, um zu vernünftigen Prüfergebnissen zu kommen.</p>

<p>Durchlaufspulen</p>	
	<p><u>umfassende Durchlaufspule:</u></p> <p>Bei Rundmaterial und Rohren ist es sehr zeitaufwendig, die Oberfläche mit kleinen Tastspulen zu</p>

	<p>prüfen. Man verwendet daher Spulen, die den Außendurchmesser des Teiles umfassen. Damit wird im Bereich der Spule die gesamte Oberfläche erfasst.</p>
	<p><u>Innen-Durchlaufspulen:</u></p> <p>Bei der Prüfung von Rohrwänden können Spulen eingesetzt werden, die dem inneren Durchmesser des Rohres angepasst sind. Auch hier werden Teil und Spule während der Prüfung zueinander bewegt.</p>

Bisher wurde davon ausgegangen, dass mit einer Spule gearbeitet werden kann. Es gibt aber Anwendungen, bei denen die Spule "geteilt" werden muss. In eine Spule, die den Wirbelstrom erzeugt (Erreger-Spule) und eine zweite Spule, die den Wirbelstrom misst (Mess-Spule). Daher gibt es noch folgende Bauarten:

- Einfachspule, absolut
- Doppelspule, absolut
- Differenzspule
- Selbstvergleich
- Fremdvergleich
- Differenzspule mit getrennter Erregung

3.5.7. Prüfgerät

Ein Prüfgerät muss mindestens folgende Elemente besitzen:

- Wechselstromgenerator mit festem, umschaltbarem oder variablem Frequenzbereich
- Abhebekompensationsbereich

- Nullpunktsteller
- Verstärkungsregelung
- Anzeigeinstrument

Bei aufwendigeren Geräten können weitere Elemente vorhanden sein, wie:

- Oszilloskop statt/und Anzeigeinstrument
- Überwachungsbereich
- Phasensteller
- Filterung
- Umschaltung auf verschiedene Signal-Darstellungsformen
- Schnittstelle für Rechneranschluss
- programmierbare Prüfeinstellung
- Anschluss für Registriereinrichtung
- gegebenenfalls Anschluss für Rotierspulen

3.5.8. Anwendungen im Flugzeugbau

Im Flugzeugbau werden über die Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit eines Materials folgenden Prüfungen durchgeführt:

- Messen der elektrischen Leitfähigkeit von Al- und Ti-Legierungen im Anlieferungszustand zur schnellen Identifikation einer Legierung bei der Wareneingangsprüfung
- Prüfung auf Werkstoffverwechslung im Lager und in der Fertigung
- Kontrolle des Wärmebehandlungszustandes bei aushärtbaren Al-Legierungen in der Fertigung
- Überprüfung auf Festigkeitsabfall von Al-Legierungen im Strukturbereich, die infolge von Hitzeeinwirkung im Flugbetrieb beschädigt wurden

Quellenangaben:

3.6. Magnetpulververfahren

3.6.1. Historie

Der Name „Magnetpulverprüfung“ selbst weist schon auf die Anwendung des Magnetismus bei diesem Prüfverfahren hin. Die erste bekannte Aufzeichnung durch Thales von Milet, die das Phänomen des magnetischen Einflusses zeigt, stammt aus dem Jahre 624 v. Chr. In Europa kommen erst ca. 1500 Jahre später die Erwähnungen dieser physikalischen Erscheinungen vor. Der wahre Siegeszug in diesem Gebiet begann allerdings erst um 1820, als Hans Christian Oersted entdeckte, dass ein stromdurchflossener Leiter in der Lage ist, eine Kompassnadel senkrecht zu ihm auszurichten. In den darauf folgenden 30 Jahren wurden die Grundlagen für die heute bekannten Zusammenhänge des Magnetismus erarbeitet.

3.6.2. Grundlagen

Die Magnetpulverprüfung ist ein Verfahren, um Bauteile zerstörungsfrei auf Materialfehler an der Oberfläche zu prüfen. Unter bestimmten Voraussetzungen ist es möglich, auch unter der Oberfläche liegende Fehlstellen nachzuweisen. Prüfbar sind Teile, die folgende Eigenschaften erfüllen:

1. Das zu prüfende Material/Bauteil muss ausreichend magnetisierbar sein, d. h. diese Art der Prüfung ist nur an ferromagnetischen Werkstoffen möglich.
2. Die zu findende Fehlstelle muss ein genügend starkes Streufeld ausbilden können, damit sie durch das Prüfmittel nachgewiesen werden kann.
3. Die Oberfläche des Teiles muss ausreichend sauber sein, damit „falsche Anzeigen“ vermieden werden und sich das Prüfmittel einwandfrei bewegen kann.

Physikalische Grundlagen

Ferromagnetische Stoffe können magnetische Feldlinien sammeln. Treten Störungen in den magnetischen Eigenschaften durch Materialtrennungen oder Permeabilitätsänderungen auf, werden die magnetischen Feldlinien in ihrem Verlauf gestört und im günstigsten Fall an die Oberfläche gedrängt. Sie bilden hier ein Streufeld. Dieses

Streufeld ist in der Lage, magnetisierbare Teilchen wie z.B. Eisenpulver anzuziehen. Da sich derartige Streufelder über der entsprechenden Fehlstelle befinden, kann die Lage durch die Anhäufung des Eisenpulvers festgestellt werden. Das Magnetfeld muss allerdings zur Richtung der festzustellenden Fehlstelle eine bestimmte Lage haben.

Wenn in einem Eisenstück ein Spalt in Feldrichtung verläuft, wird kein Streufeld erzeugt, da das magnetische Feld kaum gestört wird (Abbildung 88(a)). Damit kann diese Stelle nicht sichtbar gemacht werden. Dagegen verändert ein Spalt, der quer zum magnetischen Feld verläuft, das Bild wesentlich (Abbildung 88(b)). Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass an der Fehlstelle die magnetische Leitfähigkeit wesentlich geringer ist und dadurch der magnetische Fluss behindert wird.

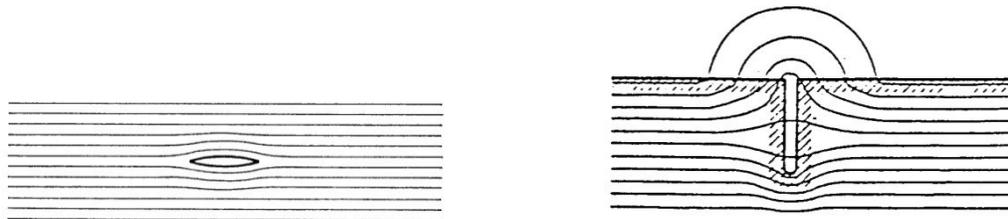


Abbildung 88: (a) Fehlstelle in Feldrichtung, (b) Fehlstelle senkrecht zur Feldrichtung

Da meistens nicht bekannt ist, wie die Fehlstellen liegen, muss das Magnetfeld in verschiedenen Richtungen angeordnet werden.

Erzeugung eines Magnetfeldes

Ein magnetisches Feld kann zum einen durch Dauermagnete erzeugt werden oder zum anderen durch elektrischen Strom. Bei der Magnetpulverprüfung wird hauptsächlich Strom zur Erzeugung eines Magnetfeldes verwendet.

Wird durch einen Draht ein elektrischer Strom geleitet, so bildet sich ringförmig um den Draht ein magnetisches Feld. Die Stärke des magnetischen Feldes hängt von der Stromstärke und vom Abstand r des Leitermittelpunktes ab. Die gleiche Beziehung gilt auch für ein Bauteil, welches von einem Gleich- bzw. Wechselstrom durchflossen wird. Diese Art der Magnetisierung wird als Selbstdurchflutung bezeichnet. Die Größe des magnetischen Feldes, die sogenannte magnetische Feldstärke, ist abhängig vom Strom, welcher durch das Bauteil fließt. Mit wachsender Stromstärke wächst auch das

magnetische Feld. Wird der Leitdraht zu einer Spule aufgewickelt, so verstärkt sich der magnetische Fluss mit der Anzahl der Spulenwindungen. Die Enden der Spule wirken als Pole.

Für die Erzeugung von Magnetfeldern kann sowohl Gleichstrom, als auch Wechselstrom verwendet werden. Bei Wechselstrom verlaufen die magnetischen Feldlinien ebenso wie die Feldlinien von Gleichstrom, jedoch ändert der Wechselstrom laufend seine Richtung und Stärke. Mit zunehmender Frequenz wird dabei der Strom zur Oberfläche des Leiters gedrängt. Diese Tatsache wird als Skineneffekt bezeichnet. Die Eindringtiefe ist also von der Frequenz des Wechselstromes abhängig.

Permeabilität

Wird der Ausschlag einer Magnethadel in einem bestimmten Abstand von einer stromdurchflossenen Spule gemessen, so stellt man fest, dass nach dem Einführen eines Eisenkerns in die Spule ein wesentlich größerer Ausschlag der Magnethadel erfolgt. Es wird also eine Erhöhung des magnetischen Flusses festgestellt. Da der Strom und die Windungszahl unverändert bleiben, kann nur das Eisen den größeren magnetischen Fluss verursacht haben.

⇒ Ferromagnetische Stoffe in einer Spule verstärken den magnetischen Fluss.

Ursache ist die unterschiedliche magnetische Leitfähigkeit der einzelnen Werkstoffe, die auch als relative Permeabilität μ_r bezeichnet wird. Je größer der Betrag der relativen Permeabilität eines Werkstoffes ist, umso größer ist auch die Fehlererkennbarkeit bei der magnetischen Rissprüfung.

3.6.3. Prüfmittel

Anzeigen werden mit einem Prüfmittel erzeugt. Als Prüfmittel bezeichnet man die gebrauchsfertige Mischung aus einem Magnetpulver und einem Trägermedium. Bei den Trägermedien wird zwischen Flüssigkeiten und Gasen (Luft) unterschieden. Diese beiden Verfahren nennt man Nass- und Trockenprüfung.

Nassprüfung:

Bei der Nassprüfung wird das Magnetpulver in einer Flüssigkeit suspendiert. Diese Suspension wird auf den zu prüfenden Bereich aufgebracht. Als Flüssigkeiten werden entweder Wasser oder dünnflüssige Mineralöle verwendet. Wird Wasser als Trägerflüssigkeit verwendet, muss ein Netzmittel hinzugegeben werden. Andernfalls ist eine vollständige Benetzung der Teile nicht gewährleistet. Da das Netzmittel schäumt, ist ein Antischaummittel zuzusetzen. Außerdem muss ein Rostschutz hinzugefügt werden, da Wasser korrodierende Eigenschaften hat.

Trockenprüfung:

Das Magnetpulver wird mit Hilfe einer Spezialpistole zusammen mit Luft auf die Oberfläche aufgestäubt. Entscheidend ist die richtige Einstellung der Pistole. Während bei Fehlstellen an der Oberfläche die Nassprüfung empfindlicher reagiert, ist das Fehler-nachweisvermögen der Trockenprüfung für Fehlstellen unter der Oberfläche höher.

Magnetpulver

Das Magnetpulver besteht entweder aus Eisenoxid (Fe_2O_3 oder Fe_3O_4) oder aus Reineisen. Bei der fluoreszierenden Prüfung ist an das magnetisch aktive Teilchen ein geeigneter Farbstoff „angebacken“, der für die erforderliche Fluoreszenz sorgt. Die Eigenschaften des Magnetpulvers entscheiden darüber, ob eine Anzeige zu sehen ist oder nicht. Magnetpulverteilchen, deren Durchmesser größer als die Rissbreite ist, werden vom Streufeld nicht mehr voll erfasst. Daraus ergibt sich, dass für den Nachweis sehr feiner Fehlstellen feinkörnige Magnetpulver verwendet werden müssen. Die mittlere Korngröße von im Triebwerksbau eingesetztem Pulver für die Nassprüfung liegt bei ca. 3 - 8 μm .

3.6.4. Magnetpulverprüfverfahren

Bei den Prüfmitteln wurde bereits festgestellt, dass es zwei verschiedene Methoden gibt, die Nass- und die Trockenprüfung. Vom Ablauf der Prüfung her unterscheidet man wiederum in zwei verschiedene Methoden.

Kontinuierliches Verfahren

Bei diesem Verfahren ist der Verfahrensablauf folgendermaßen vorzunehmen:

1. Teil einspannen oder Handmagnet aufsetzen.
2. Teil mit Prüfmittel bespülen oder einsprühen.
3. Sobald das Teil vollständig benetzt ist, Magnetisierung einschalten und ca. 3 Sekunden halten, Bespülung läuft noch.
4. Kurz vor Ablauf der Magnetisierungszeit Bespülung stoppen, Magnetisierung läuft noch.
5. Nach Abschalten der Magnetisierung Teil für ca. 1 Sekunde abtropfen lassen.
6. Einen weiteren Magnetisierungsstoß von ca. 3 Sekunden Dauer geben.
7. Wieder ca. 1 Sekunde warten.
8. Einen dritten Magnetisierungsstoß von ca. 3 Sekunden Dauer geben.
9. Teil ausspannen oder im eingespannten Zustand ca. 1 Minute abtropfen lassen.
(Bei verschiedenen Magnetisierungseinrichtungen können die Teile zwischen den Einspannbacken gedreht werden.)
10. Teil bewerten.

Bohrungen, andere kleine Öffnungen und Bereiche, die gegenüber der Trägerflüssigkeit empfindlich sind, z.B. Sintermetall-Lager, sind vor der Prüfung in geeigneter Weise abzudecken. Dieser Vorgang erscheint recht aufwendig, ist aber für eine einwandfreie Anzeigenausbildung unerlässlich. Für das kontinuierliche Verfahren kann sowohl Wechsel - als auch gleichgerichteter Wechselstrom verwendet werden. Hierbei ist das Nassverfahren einzusetzen.

Restfeldverfahren

Ein vollkommen anderer Ablauf findet beim Restfeldverfahren statt. Wie schon der Name sagt, wird hier zur Anzeige das an der Fehlstelle vorhandene Restfeld zur Anzeigenausbildung verwendet. Verfahrensablauf wie folgt:

1. Das Teil einspannen oder Handmagnet aufsetzen. Auf das Teil darf kein Prüfmittel gelangen.
2. Teil mit dem vorgeschriebenen Wert magnetisieren. Die Magnetisierungszeit soll zwischen 0,5 und 1 Sekunde liegen (1 Stromstoß).
3. Nach Ablauf der Magnetisierung Teil mit Prüfmittel vorsichtig besprühen oder Teil in Behälter mit umgewälztem Prüfmittel tauchen (Verweilzeit 0,5 bis 2 Minuten). Die Umwälzung darf eine Ausbildung von Anzeigen nicht verhindern.
4. Teil für einige Sekunden abtropfen lassen.
5. Teil auswerten.

Grundsätzlich muss der zu prüfende Werkstoff für dieses Verfahren geeignet sein, d.h. seine Remanenz muss genügend hoch liegen, um Magnetpulverteilchen aus dem Prüfmittel festzuhalten. Als Richtwert gilt, dass der Kohlenstoffgehalt über 0,2 % liegen soll. Für das Restfeldverfahren (Remanenzverfahren) wird grundsätzlich Gleichstrom verwendet, damit definierte Bedingungen vorhanden sind. Als Prüfmittel kann das Nass- oder Trockenverfahren eingesetzt werden. Das Fehlernachweisvermögen ist geringer als beim kontinuierlichen Verfahren.

3.6.5. Magnetisierungsmethoden

Nach DIN 54130 werden folgende Magnetisierungsverfahren unterschieden:

Magnetisierungsverfahren	Kurzzeichen
<u>Jochmagnetisierung</u>	J
a) mit Dauermagnet	JD

b) mit Elektromagnet	JE
<u>Magnetisierung mit stromdurchflossenem Leiter</u>	L
a) mit Spule	LS
b) mit sonstigen Leitern	LK
<u>Magnetisierung mittels Stromdurchflutung</u>	S
a) Selbstdurchflutung	SS
b) Induktionsdurchflutung	SI

Jochmagnetisierung

Das zu prüfende Werkstück oder ein Teil davon wird mit dem zwischen den Polen eines Dauer- oder Elektromagneten vorhandenen Feld magnetisiert. Es werden bevorzugt solche Fehlstellen angezeigt, die quer zum Feldlinienverlauf liegen, also Umfangs- oder Querfehler.

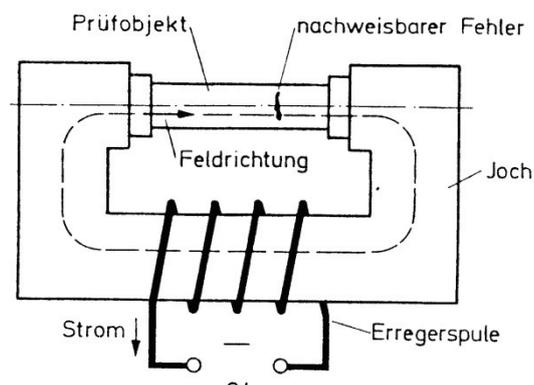


Abbildung 89: Jochmagnetisierung

Magnetisierung mit stromdurchflossenem Leiter

Die Magnetisierung des zu prüfenden Teils erfolgt durch das Feld, das mit dem stromdurchflossenen Leiter verknüpft ist.

Es werden bevorzugt solche Fehler angezeigt, deren Längsrichtung mit der Richtung des Stromflusses übereinstimmt. Die Stärke der Magnetisierung nimmt mit der Entfernung vom Leiter ab.

Man unterscheidet zwischen Magnetisierung mit Spulen (Abbildung 90) und übrigen Leiteranordnungen, z.B. Hochstromkabeln oder Hilfsleitern (Abbildung 91).

Unter Spulen sind nach DIN 54130 und 54131 Magnetisierungsspulen fester Abmessungen und Windungszahlen gemeint, nicht jedoch mittels Hochstromkabel selbst hergestellte Spulen mit wenigen Windungen. Diese zählen zu den übrigen Leiteranordnungen.

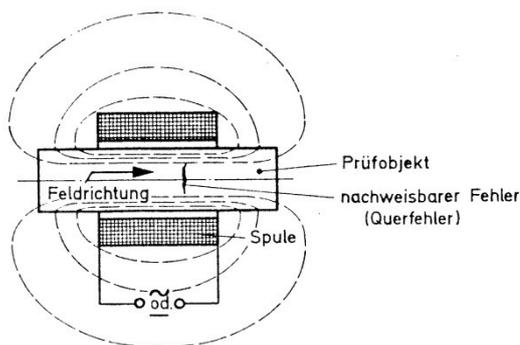


Abbildung 90: Längsmagnetisierung mit stromdurchflossener Spule

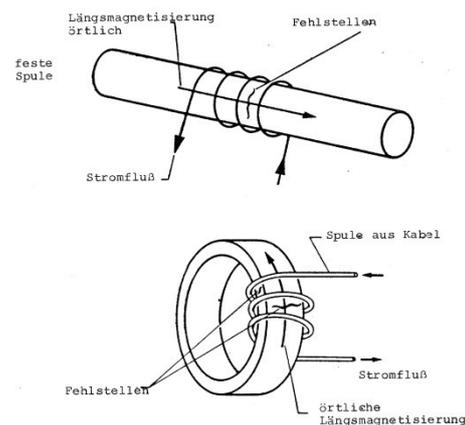


Abbildung 91: Längsmagnetisierung mit stromdurchflossener Spule (Hochstromkabel)

Laufscheiben für Triebwerke müssen gelegentlich auf Umfangsrisse in den Stirnflächen untersucht werden. Hierzu wird eine Flachspule verwendet, die aus in einer Ebene gewickelten Windungen besteht. Genau wie in anderen Spulen verlaufen die Feldlinien durch das Innere der Spule und schließen sich um den äußeren Teil. Damit erhalten sie einen radialen Verlauf, der zur Entdeckung von Umfangsrissen auf den Stirnflächen führt (Abbildung 92).

Geprüft wird grundsätzlich die der Spule zugekehrte Seite. Anschließend wird die Scheibe gewendet und erneut geprüft.

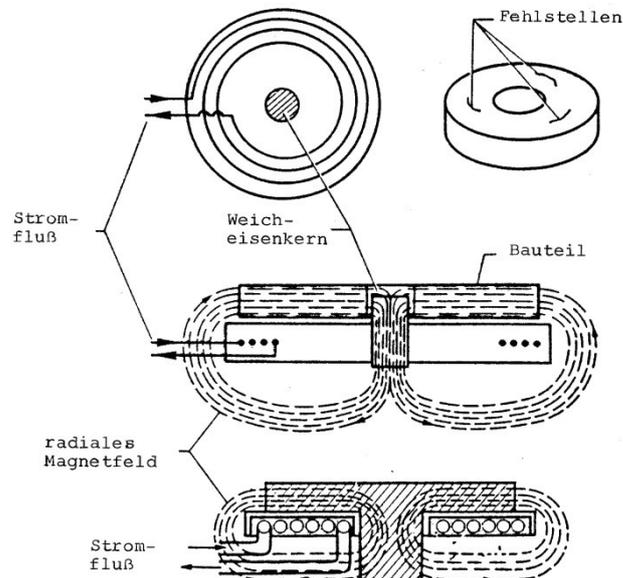


Abbildung 92: Flachspule

Eine weitere Spulenanordnung - ebenfalls eine Hochstromspule fester Bauart - wird als Klappspule bezeichnet. Sie dient der Entdeckung radialer und axialer Fehlstellen in scheibenförmigen Bauteilen und Gehäusen (Abbildung 94).

Im Prinzip werden hier bis zu vier Hilfsleiter nebeneinander angeordnet, was man natürlich in Form einer Spule machen muss, da die Feldstärke mit der Windungszahl steigt.

Bei Einsatz einer Klappspule sollte der Prüfkörper mindestens einmal um seine Achse gedreht werden, da die Leiteranordnung meistens exzentrisch ist.

Es ist zu beachten, dass kontinuierliches Durchfahren des Teiles durch eine Spule während des Magnetisierens einen Entmagnetisierungseffekt nach sich zieht, wenn Wechselstrom verwendet wird. In diesem Fall ist abschnittsweise zu prüfen.

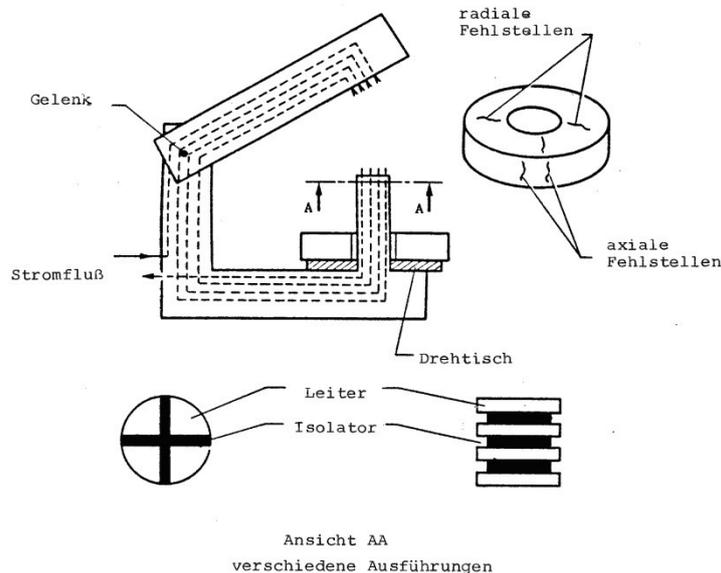


Abbildung 93: Klappspule

Die Kreismagnetisierung mit stromdurchflossenem Hilfsleiter soll immer dann angewendet werden, wenn das Bauteil eine Bohrung hat. Auf diese Weise sind auch Laufscheiben und Ringe auf axiale und radiale Fehlstellen zu prüfen.

Wenn man andererseits an den Strombedarf bei größeren Durchmessern denkt, kommt man bei zentrischer Anordnung des Leiters sehr schnell an die Leistungsgrenze einer Prüfbank. In solchen Fällen empfiehlt es sich, den Leiter außermittig anzuordnen. In diesem Fall lässt sich das Teil allerdings nicht mehr in einem Arbeitsgang vollständig prüfen. Man kann sich nur immer einen Abschnitt vornehmen, prüfen, weiterdrehen usw.

Magnetisierung mittels Stromdurchflutung

Bei der Stromdurchflutung werden bevorzugt solche Fehler angezeigt, deren Richtung mit der Richtung des Stromflusses übereinstimmt. Es wird bei diesem Verfahren zwischen Selbst- und Induktionsdurchflutung unterschieden.

Bei der Selbstdurchflutung wird ein Strom über Kontakte von außen in das Werkstück eingeleitet. Das gesamte Werkstück oder ein Teil davon wird vom Strom durchflossen.

Grundsätzlich besteht bei der Selbstdurchflutung die Gefahr von Brandstellen an den Kontaktstellen zwischen Prüfbank und Werkstück. Daher sollte möglichst die Selbstdurchflutung vermieden werden. Wenn jedoch nicht anders möglich, sind die Auflageflächen der Kontaktstellen mit Kupferkissen zu verbessern. Die Verwendung von Aufsatzelektroden ist im Triebwerksbau verboten.

Bei der Induktionsdurchflutung dient das Werkstück als kurzgeschlossene Sekundärwicklung eines Transformators. Der Strom wird im Werkstück selbst erzeugt (induziert). Hierzu kann das Wechselstromjoch einer Prüfbank oder eine Spezialeinrichtung mit aufklapbarem U-Kern verwendet werden. Damit ein Strom fließen kann, muss das Teil einen geschlossenen Ring bilden. Die Induktionsdurchflutung kann nur bei Wechselstrom durchgeführt werden. Wenn Gleichstrom verwendet wird, muss mit einer Schnellabschaltung (Quick-Break) ein Induktionsstrom erzeugt werden.

3.6.6. Auswertung

Die Auswertung muss unter geeigneten Betrachtungsbedingungen vorgenommen werden. Bei Verwendung nicht fluoreszierender Prüfmittel muss am Betrachtungsort eine Weißlicht-Intensität von mindestens 2.000 Lux vorhanden sein. Bei Verwendung fluoreszierender Prüfmittel ist die Auswertung in einer abgedunkelten Kabine vorzunehmen.

Bei der Bewertung von fluoreszierenden Anzeigen dürfen keine Brillen mit selbstabdunkelnden (fototropen) Gläsern verwendet werden, da diese Gläser auf UV-Licht reagieren. Die Verwendung von Natriumglasbrillen ist dagegen empfehlenswert, da das gelbgrüne Licht verstärkt, das UV-Licht dagegen geschwächt wird.

3.6.7. Entmagnetisierung

Nach jeder Magnetisierung bleibt im Werkstück Magnetismus zurück. Dies kann in vielen Fällen sehr störend sein. Im Einzelnen können folgende Gründe genannt werden:

- Anhaften von Spänen
- Mögliche Beeinflussung benachbarter Messinstrumente

- Schnell rotierende Teile können elektrische Spannungen in benachbarten Leitungen induzieren

Magnetisierte Bauteile werden daher meistens in einer Spule entmagnetisiert. Eine einwandfreie Entmagnetisierung wird erreicht, wenn das Wechselfeld der Entmagnetisierungsspule in kleinen Schritten verringert oder das Bauteil langsam aus dem Wechselfeld der Spule entfernt wird.

Anwendung findet die Magnetpulverprüfung im Triebwerksbau vor allem bei der Instandsetzung von ferromagnetischen Teilen. Es können Teile wie zum Beispiel Lager, Zahnräder oder Gehäuse auf Risse / Thermorisse untersucht werden.

Quellenangaben:

Eindringprüfung

3.6.8. Grundlagen

Die Eindringprüfung ist ein relativ einfaches Verfahren zur Prüfung von Bauteiloberflächen auf Materialfehler.

Aufgrund der Kapillarwirkung dringt eine auf die gereinigte Oberfläche des Prüfobjektes aufbrachte Flüssigkeit in offene Fehlstellen ein. Nach wiederholter Reinigung der Prüfoberfläche wird die eingedrungene Flüssigkeit durch ein Entwicklungsmedium (das Eindringmittel) zur Oberfläche und somit zur Anzeige gebracht. Durch Verwendung fluoreszierender Flüssigkeiten in Kombination mit UV-Licht lässt sich der Kontrast einer Anzeige deutlich verstärken.

Relativ grobe Materialtrennungen mit Öffnungen im Zehntelmillimeterbereich können ohne große Schwierigkeit mit dem bloßen Auge entdeckt werden. Aufgrund dessen wird das Eindringverfahren kaum eingesetzt, um derartige Risse zu finden.

Es lassen sich bis auf wenige Ausnahmen praktisch alle Werkstoffe prüfen. Nur wenige Voraussetzungen sind zu erfüllen, um die Prüfung durchzuführen:

1. Das zu prüfende Material/Bauteil darf nicht saugfähig sein.
2. Die Oberfläche/ Fehlstelle muss einwandfrei sauber sein.
3. Die zu findende Fehlstelle darf nicht „verschlossen“ sein.

3.6.9. Verfahrensabläufe der FPI

Vorreinigung

Hier werden Rückstände wie Öl, Fett, Bohremulsion oder Zunder von der Oberfläche entfernt, um sie benetzbar zu machen. Dazu kann zum einen chemisch vorgereinigt werden durch:

- Dampffentfetten
- Lösemittel

- Wässrige Reinigung
- Chemische Entrostung

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, 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, dass 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 farblich 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:

Klasse A Einzelanzeigen

Klasse B Mehrfachanzeigen ungerichtet

Klasse C	Mehrfachanzeigen ausgerichtet
Klasse D	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

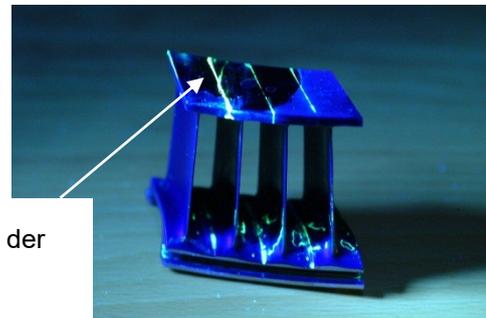
Die Wirksamkeit von Eindringmittel beruht in starkem Maße auf ihrer guten Benetzbarkeit und großen Oberflächenspannung bzw. Kapillarwirkung gegenüber dem zu prüfenden Werkstoff. Die Eindringmittel bestehen im Wesentlichen aus einer Trägerflüssigkeit und einem roten bzw. fluoreszierenden Farbstoff. Weiter 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 zusammen gelötet. Diese Fügeverbindung wird mit Hilfe der Eindringprüfung kontrolliert.



Risse in der
Lötnaht

**Abbildung 94: Gelötetes Leitschaufelsegment
bei der Eindringprüfung**

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:

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“ (Electronic Speckle Pattern Interferometry), basiert. Somit wurden Fotoplatten 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 „Shearografie“ 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

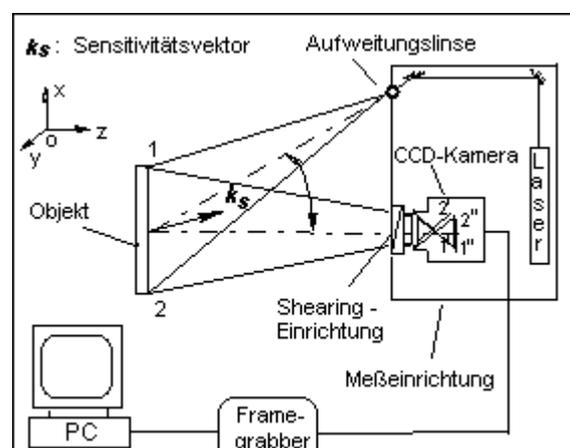


Abbildung 95: Aufbau eines Shearografie-Systems

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.

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 Messung der Verformungsgradienten, d. h. der 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

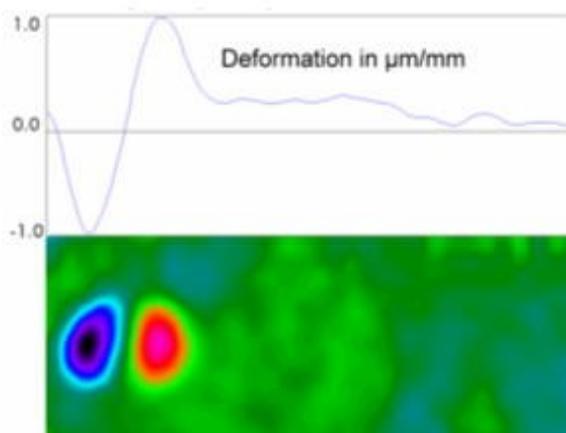


Abbildung 96: Anzeige eines inneren Defekts in Form lokaler Verformungsinhomogenität [1]

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 shearografiert.

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 97 zu erkennen, zeigt das Messergebnis eine Delaminationsstelle mit einem Durchmesser von ca. 8mm.

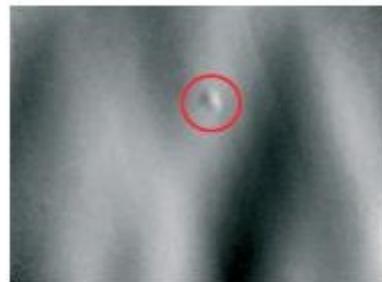
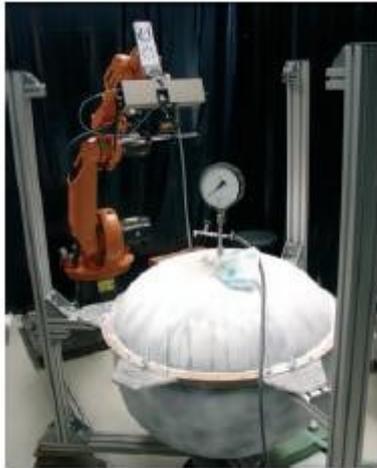


Abbildung 97: CFK-Tank als Prüfobjekt und das Ergebnis der Shearographie einer Delamination [3]

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>

Fraunhofer 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>

3.8. Sichtprüfung

3.8.1. 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.

3.8.2. 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

3.8.3. 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

Mechanische Reinigung	Thermische Reinigung	Chemische Reinigung
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

3.8.4. 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 zuerst 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.

3.8.5. 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 98 (a) und Abbildung 98 (b) zeigen Fehler bzw. Beschädigungen, welche durch die Sichtprüfung als Ausschuss deklariert werden.

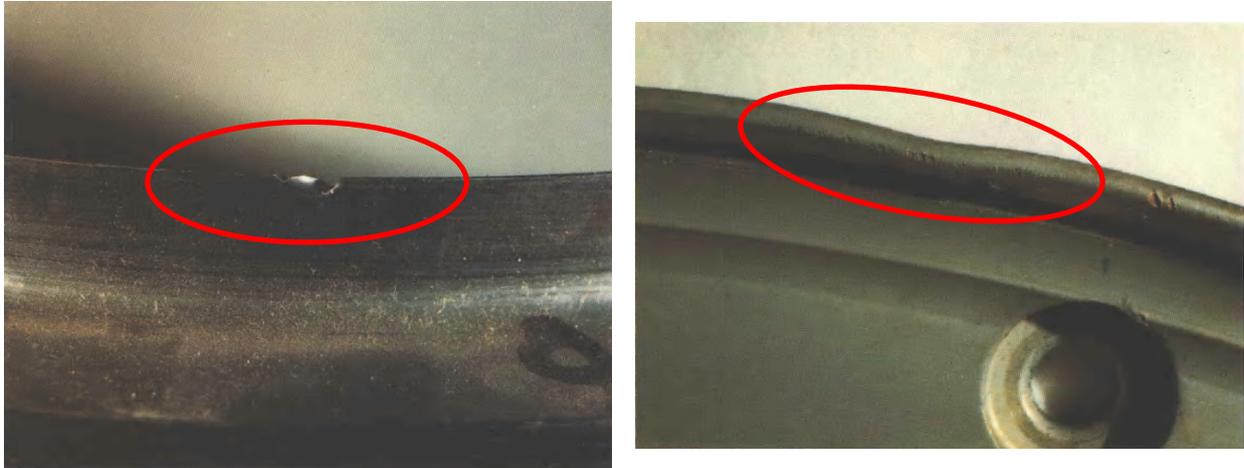


Abbildung 98: (a) Kerbe, (b) Delle

Quellenangaben:

H. Zisik Sichtprüfen (VT) bei MTU, Vortrag und Einzelskript

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 speziellen Oberflächenbehandlungen notwendig sind.

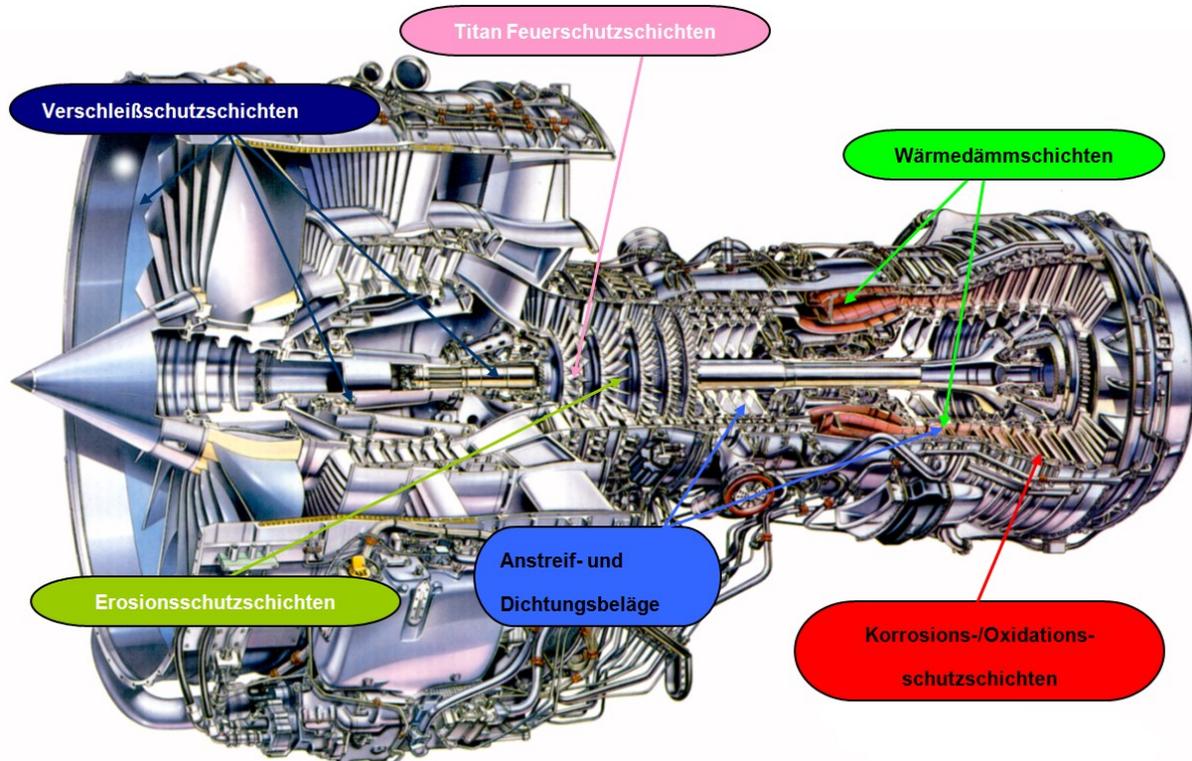


Abbildung 99: Beschichtungsvarianten je Triebwerksbereich (Triebwerk: V2500)

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 Heißgaskorrosionswiderstand 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 ist nicht möglich im Inneren der Schaufel.

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-Gehalts 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, das sich für das Aufbringen von MCrAlY-Legierungen eignet, ist das Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD, electron beam physical vapour deposition). Dieses Beschichtungsverfahren ist dem obengenannten PVD zuzuordnen, 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-/ heißgaskorrosionsbeständigen Schichten aufgebracht.

Als Verfahren zur Aufbringung der wärmedämmenden Keramikschicht (Zirkondioxid) haben sich zwei Verfahren bewährt, das Thermische Spritzen und das EB-PVD-Verfahren. Kennzeichnend für diese plasmagespritzten 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 100: 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 metallografischen 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://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-Druckwechselversuche	Faltprobe
Biegeversuche	Druck-Zeitstandsversuche	Schlagdruckversuche	Zug-Schwellversuche	Zerspannungsprobe
Scherversuche	Biege-Zeitstandsversuche	Schlagbiegeversuche	Druck-Schwellversuche	Schweißprobe
Torsionsversuche		Fallwerkversuche	Biege-Wechselversuche	Tiefungsversuche nach Erichsen
Bruchzähigkeitsversuche		Kerbschlagbiegeversuche	Torsionswechselversuche	Näpfcenzugversuche

Abbildung 101: Einteilung zerstörender Werkstoffprüfverfahren [1]

Bedingt zerstörungsfreie WERKSTOFFPRÜFVERFAHREN			
Härteprüfverfahren		Strukturanalysen	Spektroskopie
statische Härteprüfungen	dynamische Härteprüfungen		
Mohssche Ritzhärte Kugeleindruck-Härte Brinell HB Rockwell HRB/HRC	Fallhärte Pendelhärte	Metallografie Schliffherstellung und Mikroskopie	Funkenprobe 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 102: Einteilung bedingt zerstörungsfreie Werkstoffprüfung [2]

Da beispielsweise bei einer Härteprüfung „nur“ durch einen kleinen Eindruck in die Oberfläche geprüft wird und das Werkstück sozusagen nicht zerstört wurde, ist die Härteprüfung den bedingt zerstörungsfreien Prüfungen zuzuordnen.

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

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.

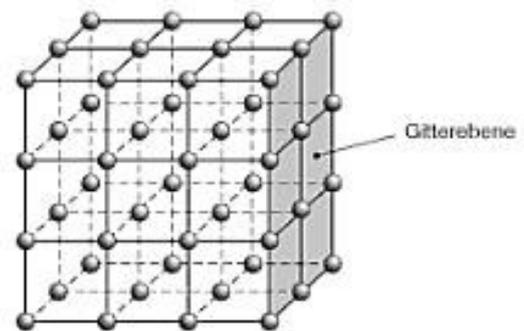


Abbildung 103: Einfaches kubisches Raumgitter [3]

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 umkehrbaren 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 Kräfte sind relativ klein.

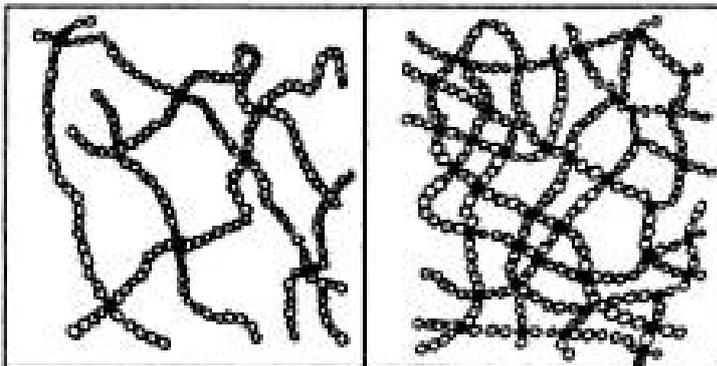


Abbildung 104: links - schwach vernetzte Ketten (Elastomer), rechts - stark vernetzte Ketten (Duroplast) [4]

Bei elastischer Verformung werden die Ketten voneinander entfernt. Bei unvernetzten 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, indem 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

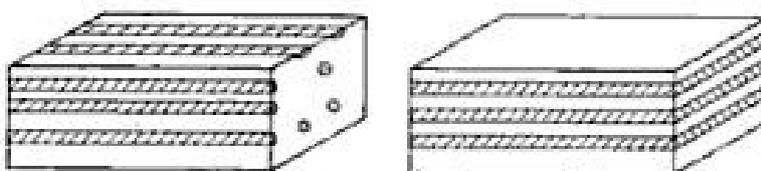


Abbildung 105: links - Faser- bzw. Stabverbund, rechts - Fasermatten- bzw. Schichtverbund [5]

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.

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 verschiedene 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 gleichmäßiger, 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 σ berechnet.

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

Die Gesamtdehnung der Probe ist aus der Längenänderung ΔL 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.

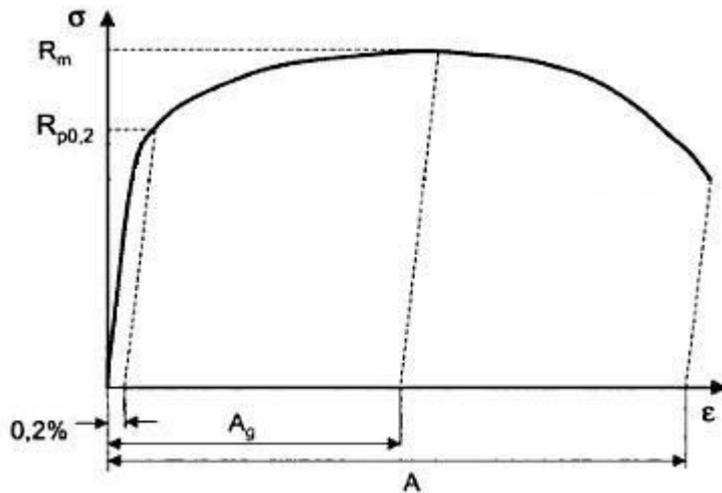


Abbildung 106: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (ohne ausgeprägte Streckgrenze) [1]

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:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

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 die Dehnung 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.

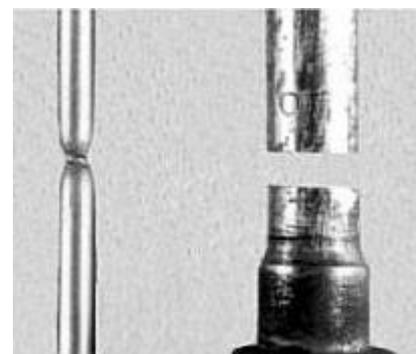


Abbildung 107: Bruchbilder [2]
links - zäher Werkstoff, rechts - spröder Werkstoff

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 Werkstoffes. Hingegen lässt sich bei einer großen plastischen Verformung mit gleichzeitiger Querschnittsverminderung auf einen gut verformbaren, zähen Werkstoff schließen.

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.

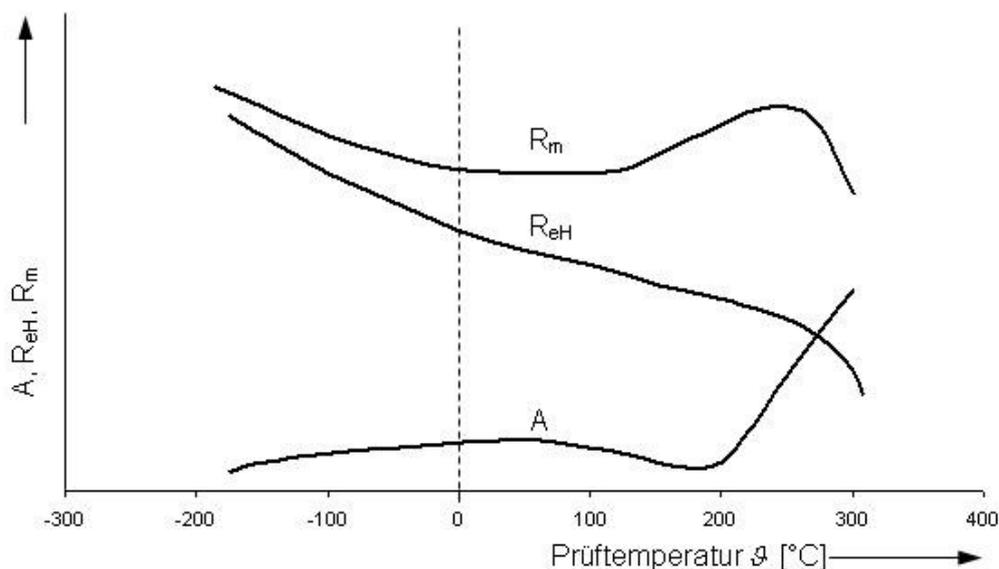


Abbildung 108: Temperaturabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungskennwerte

Bei steigender Temperatur sinkt das Elastizitätsmodul des hier getesteten Baustahls, dies führt zu einer flacheren Anfangsneigung des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes. 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 eine 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 Faserverbundstoffen oder Sandwichstrukturen miteinander gemischt.

Faserverbundwerkstoffe

Bei der Zugprüfung dieser Werkstoffe ist die häufigste Probenform ein 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 σ_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 ΔL 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.

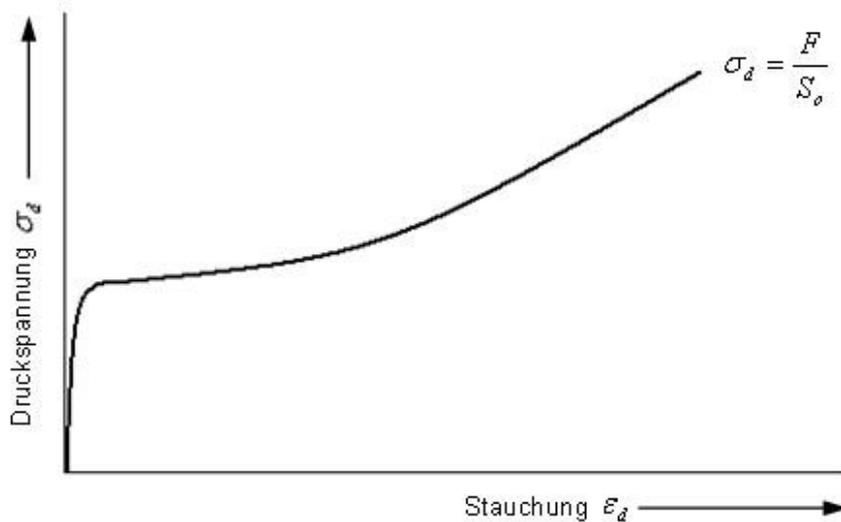


Abbildung 109: Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm

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

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

Abbildung 110 zeigt schematisch die verschiedenen Verformungszonen, die beim Druckversuch auftreten.

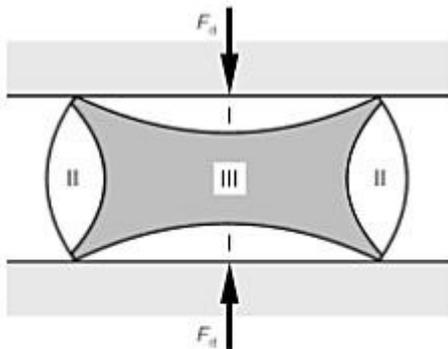


Bild 3.16
Verformungszonen einer gestauchten Probe
I: geringe Verformung (Reibungsbehinderung)
II: mäßige Zugverformung
III: hohe Schubverformung

Abbildung 110: Verformungszonen einer gestauchten Probe [3]

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 sie 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.

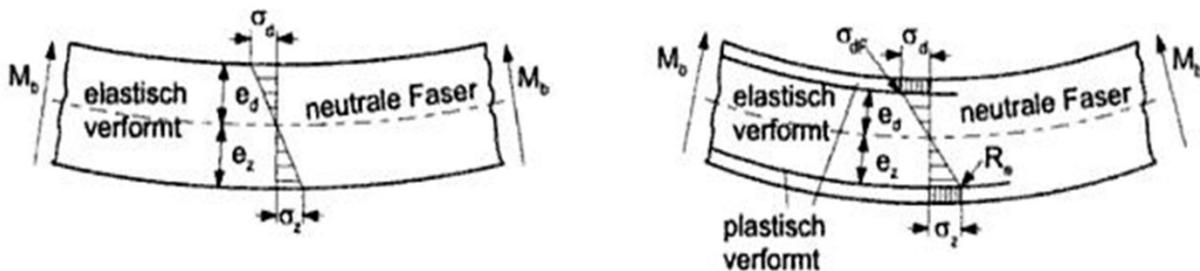


Abbildung 111: links - elastische Biegeverformung, rechts - plastische Biegeverformung [4]

M_b = Biegemoment

$e_{d/z}$ = Abstand von neutraler Faser

R_e = Streckgrenze

$\sigma_{d/z}$ = max. Spannungen am Rand

σ_{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 eine Korrelation der Kennwerte aus dem Zugversuch möglich.

Bei Torsion wirken die maximalen Schubspannungen in Querschnitten senkrecht und parallel zur Stabachse. Bei zähen Werkstoffen tritt der Bruch quer zur Stabachse auf, bei ideal spröden Materialien hingegen verläuft dieser 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 Prüfverfahrens.

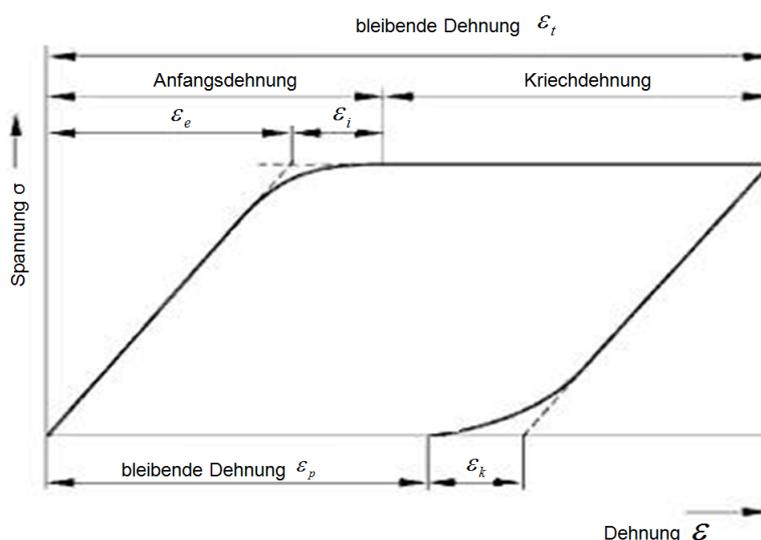


Abbildung 112: Spannungs- Dehnungsdiagramm des Zeitstandversuches [5]

elastische Dehnung = ε_e

plastische Anfangsdehnung = ε_i

plastische Dehnung = ε_p

nicht proportionale Rückdehnung = ε_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 Werkstoffes 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 metallischen 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

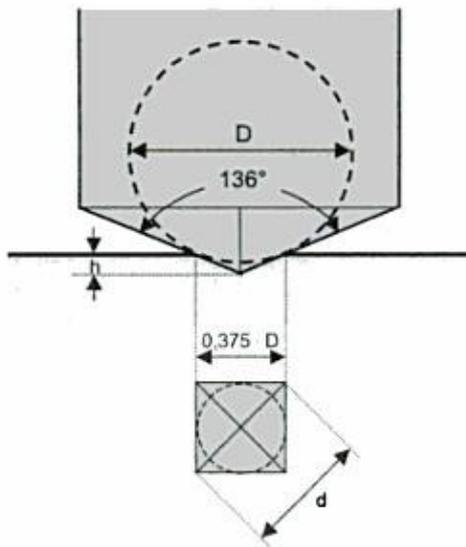


Abbildung 113: Korrelation zwischen den Prüfkörper nach Vickers und Brinell [1]

Die Härteprüfung nach Vickers kann zur Prüfung aller metallischen Werkstoffe eingesetzt werden. Sie ist besonders für sehr harte Stoffe und Schichten, 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° mit einer senkrecht zur Oberfläche des Prüfstücks wirkenden Kraft F eingedrückt. Nach Entlastung werden die beiden Eindruckdiagonalen vermessen.

Der Winkel von 136° 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.

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.

Bei dem Verfahren nach Rockwell C ist der Eindringkörper ein Diamantkegel mit einem Öffnungswinkel von 120° , 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 Eindringtiefmessung 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

[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.

Nachfolgend wird am Beispiel von spannungsgeregelten Versuchen gezeigt, wie die Ergebnisse der 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 σ_m , die Spannungsamplitude σ_a und die Schwingfrequenz f charakterisiert. Die für den Laborversuch idealisierte, oft sinusförmige Kurve findet ihre Wendepunkte jeweils am Spannungsmaximum σ_o und am Spannungsminimum σ_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.

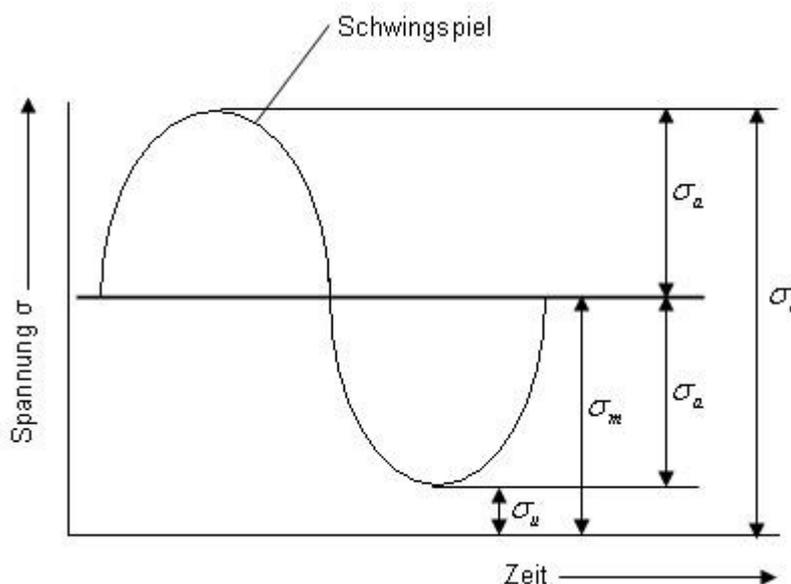


Abbildung 114: sinusförmiger Spannungsverlauf eines Belastungszyklus

Je nach Lage der Spannungsumkehrpunkte ist bei der Schwingbelastung zwischen verschiedenen Beanspruchungsbereichen zu unterscheiden.

- *Druckschwellbereich*, wenn das Spannungsmaximum ≤ 0 MPa beträgt

- *Zugschwellbereich*, wenn das Spannungsminimum ≥ 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_σ ist aus dem Quotienten von σ_u und σ_o definiert.

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

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

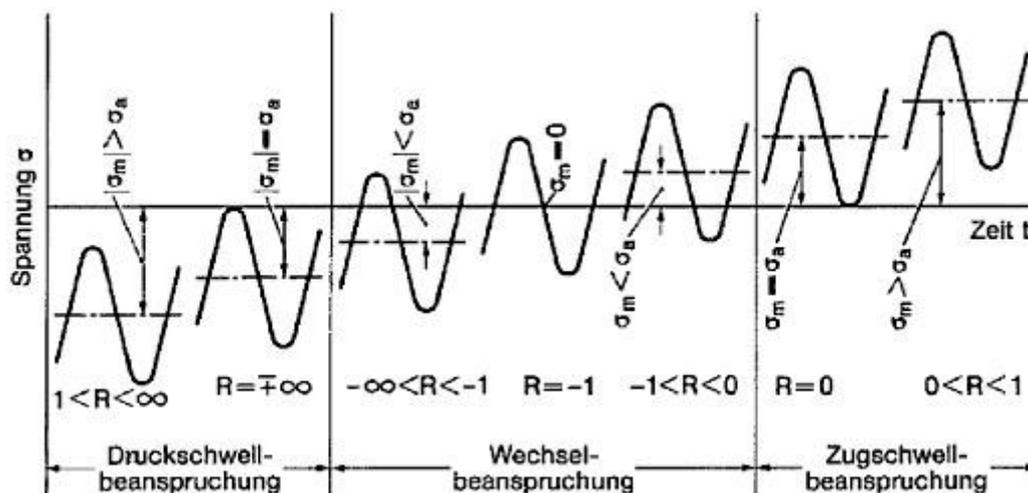


Abbildung 114: Beanspruchungsbereiche im Schwingungsversuch [1]

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 115).

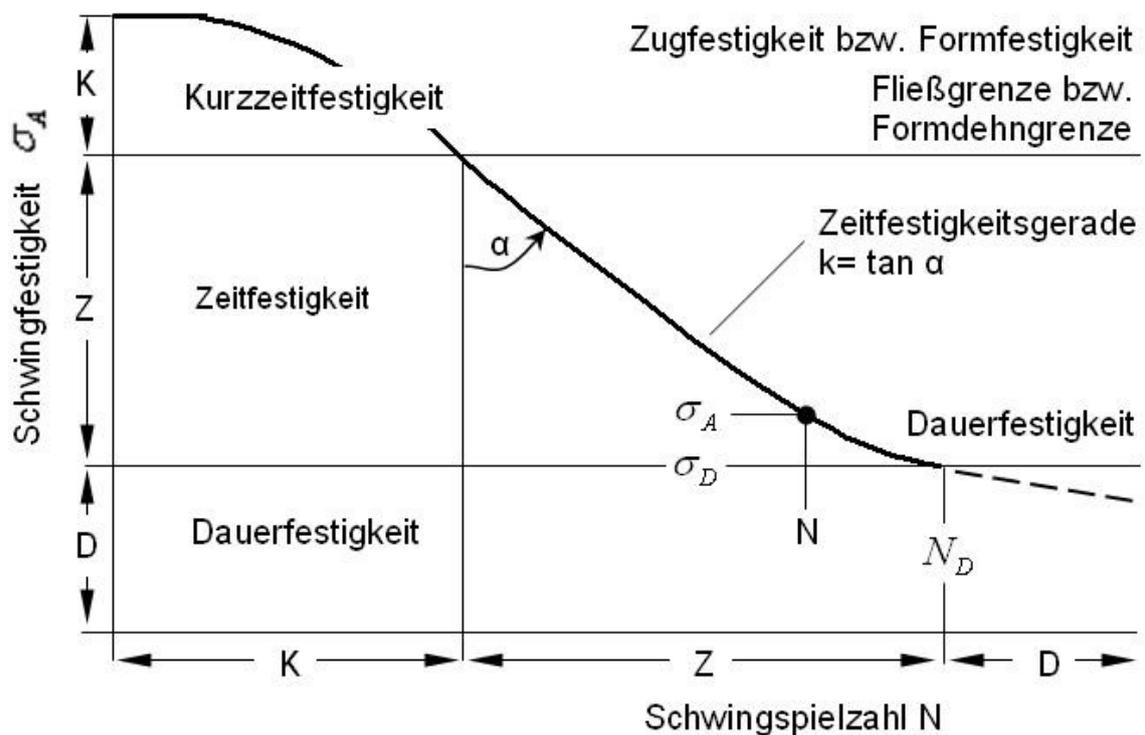


Abbildung 115: Wöhler-Diagramm

In einem x-y-Diagramm mit der Versagenslastspielzahl N als Abszisse und der Spannungsamplitude σ_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 Werkstoffes 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.

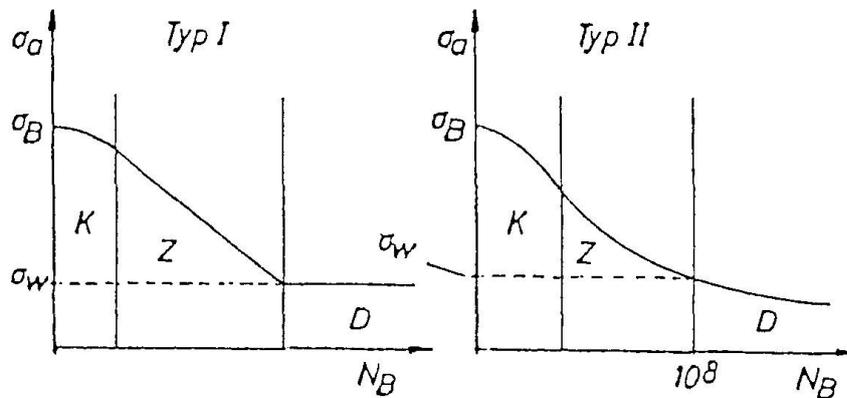


Abbildung 116: Wöhlerkurven vom Typ I und II

- 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 doppelt-logarithmische 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, sodass 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 Werkstoffe, 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 unterhalb einer bestimmten Spannungsamplitude kein Bruch mehr auf, theoretisch auch bei beliebig großen Lastspielzahlen. 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_{σ} .

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 ($R = 1$, d. h. 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 druckschwellende 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.

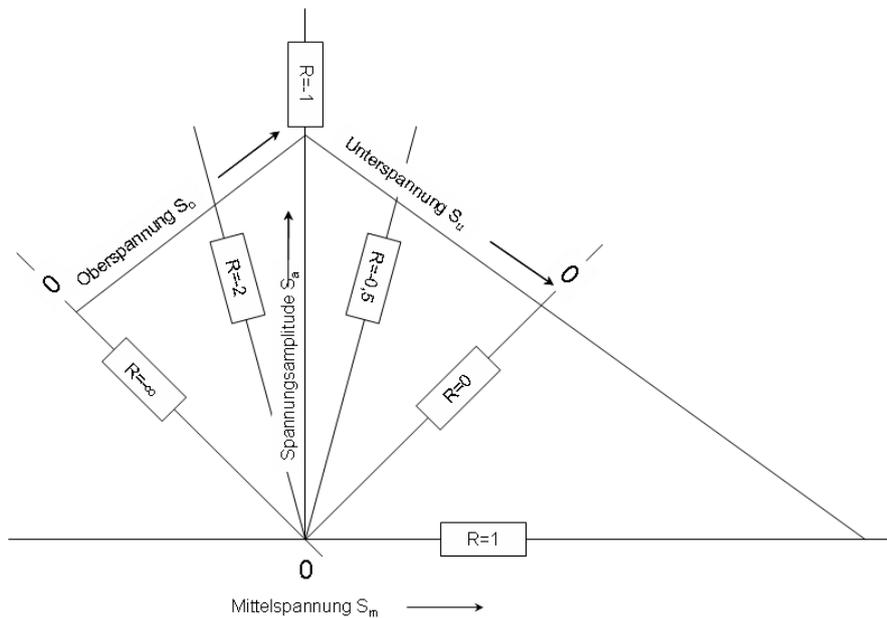


Abbildung 117: Haigh-Diagramm

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 zu nennen.

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
- 3.

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 Spannungsaus- schlag 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 an- ders 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 Simu- lation der tatsächlichen Betriebsbelastung geeignet. Dies ist auch ein Grund, dass in der Luftfahrt, bei welcher die Forderungen an die Leichtbauweise und Werkstoffaus- nutzung besonders hoch sind, zunehmend Betriebslastenversuche durchgeführt wer- den.

Um die tatsächlichen Schwingungen eines Betriebes nachahmen zu können, werden die im Betrieb wirkenden Kräfte mit Hilfe von aufgeklebten Dehnungsmessstreifen ge- messen und als elektrische Spannungen über einen Messverstärker registriert. Die Last-Zeit-Funktionen können dann mit verschiedenen mathematischen Methoden aus-

gewertet werden. Es werden die auftretenden Lasten nach Größe und Häufigkeit notiert, sodass 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 auf Kerben tendenziell empfindlich reagieren.

Die Bruchmechanik untersucht das Werkstoffverhalten im angerissenen Zustand, d. h. die Fähigkeit des Werkstoffes, dem Riss einen Widerstand entgegenzusetzen. 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 (Bruch) der Probenstruktur führt.

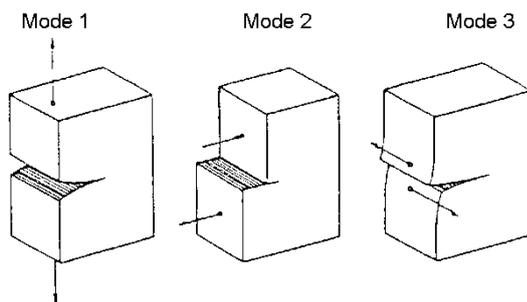


Abbildung 118: Proben zur Rissfestigkeitsbestimmung

- 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 118). 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 Risspitze. Das plastische Werkstoffverhalten wird bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Daher ist eine hinreichend kleine plastische Verformungszone vor der Risspitze 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_c . 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 unbekanntes 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.

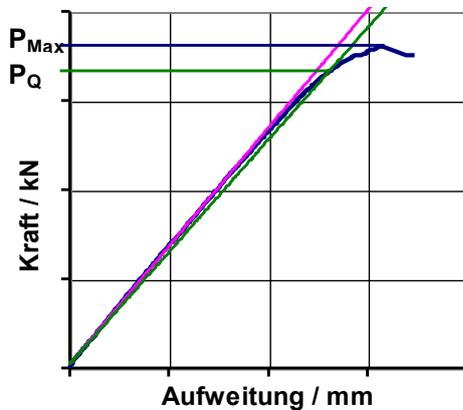


Abbildung 119: Kraft-Aufweitungsdiagramm eines Risszähigkeitsversuchs

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 ΔK , so dass unter Anwendung einer geeigneten Methode zur Risstiefenmessung eine quasi-kontinuierliche Funktion der Risswachstumsgeschwindigkeit da/dn über die Schwingbreite der Spannungsintensität ΔK generiert werden kann. Die Ergebnisse werden im

doppelt-logarithmischen Diagramm da/dn vs. ΔK 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 Rissfortschrittgeschwindigkeit mit gleichem ΔK 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.

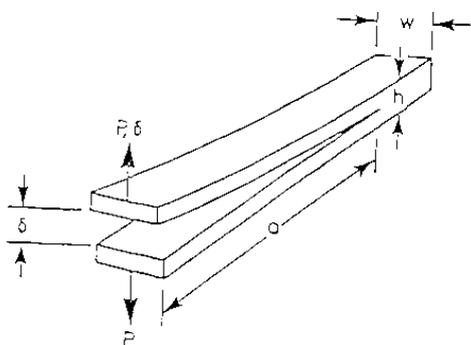
Um die Versuche durchzuführen, ist es erforderlich, die Proben oder Bauteile zu belasten und sie gleichzeitig mit dem Prüfmedium zu beaufschlagen. Hierzu kann man die Proben in Belastungsrahmen einbauen, die ähnlich wie Prüfmaschinen aufgebaut sind. Die Probe wird hierbei mit konstanter Kraft belastet. 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} -Wertes. 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 Fasersrichtung.

Double Cantilever Beam Probe (DCB-Probe)



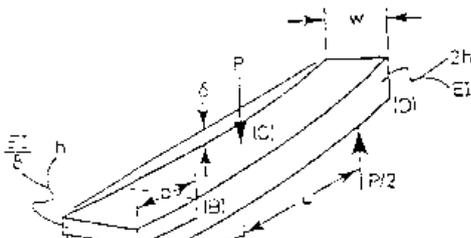
Die Probe dient zum Testen von Proben in Rissöffnungsmodus I. Die Probe wurde ursprünglich für die Untersuchung der Bruchmechanik an Klebungen entwickelt. Die interlaminare Bruchzähigkeit wird bestimmt, indem die Probe soweit belastet wird, bis sich ein bereits vorhandener Riss bzw. eine Delamination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

**Abbildung 120: Beispiel einer DCB-
Probe**

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)



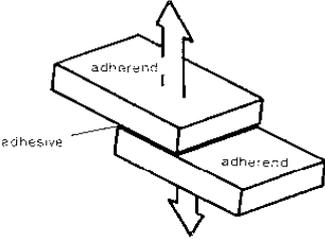
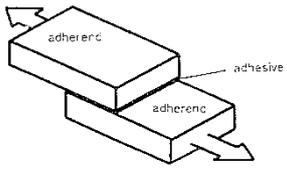
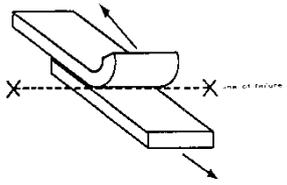
**Abbildung 121: Beispiel einer ENF-
Probe**

Die Probe erlaubt die Bestimmung der kritischen Energiefreisetzungsrate in ebener Dehnung unter dem Beanspruchungsmodus II. Die Probe ermöglicht eine Scherbelastung an der Risspitze, ohne dass große Reibung zwischen den Rissoberflä-

chen 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	
	<p>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.</p>
Scherbeanspruchung	
	<p>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.</p>
Schälbeanspruchung	
	<p>Die Kraft wirkt entlang der Schällinie in sehr hoher Konzentration. Hierfür wird mindestens ein flexibles Verbindungselement benötigt (Folie oder dünnes Blech).</p>

5.8.1. Zugscherversuch

Der Zugscherversuch ist die am häufigsten 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 gefräst 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 Prüfmethode. 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 nach dem Scheren die am zweithäufigsten durchgeführten Versuche zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen. 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 Schälagrammes ist ersichtlich, dass zunächst eine große Anfangskraft erforderlich ist und für das Weiterschälen eine erheblich niedrigere, konstante Kraft nötig ist. Zur Ermittlung der Schälfestigkeit wird dieser Anfangspeak (ca. 30%) wie auch die letzten 10% nicht berücksichtigt.

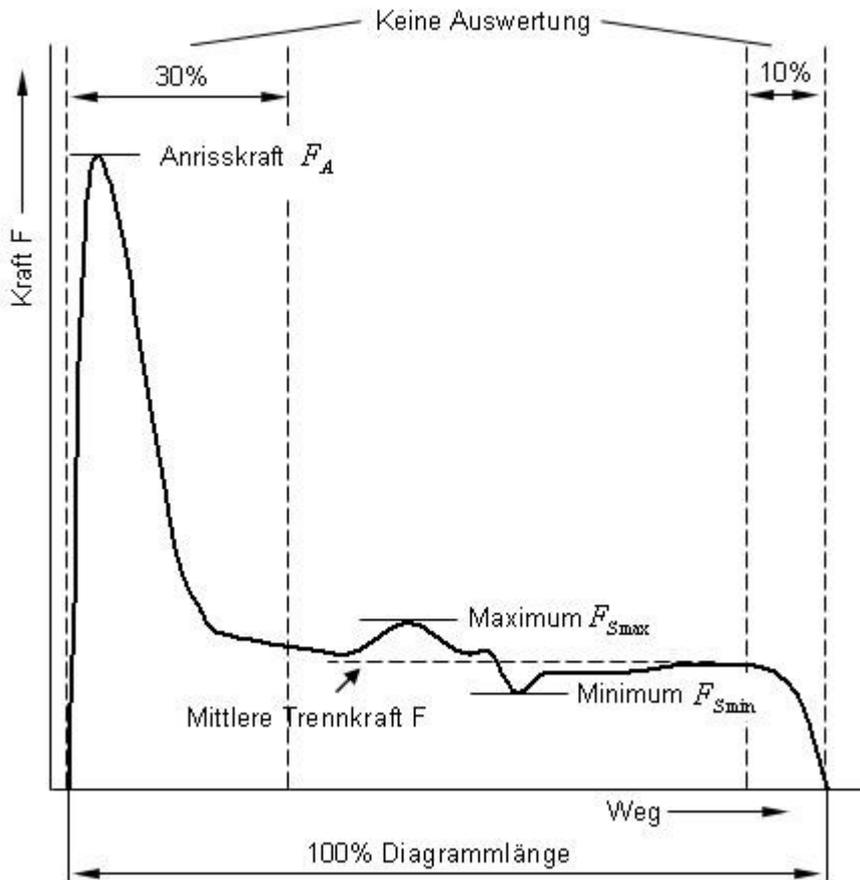
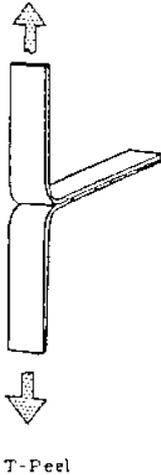


Abbildung 122: Skizze Schäldiagramm

Das Schäldiagramm wird von der Klebstoffdicke nicht beeinflusst. Mit steigender Füge-teildicke und steigendem E-Modul der Füge-teile steigt auch die Schälfestigkeit. Ein großer Nachteil von Schälversuchen ist die plastische Deformation der Füge-teile.

Es lassen sich drei Typen von Schälversuchen unterscheiden, deren Unterschied hauptsächlich im Schälwinkel besteht.

T-Schälversuch

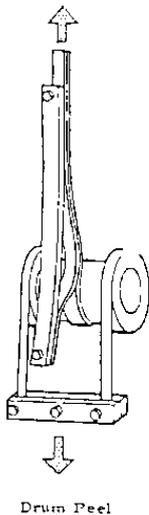


Dieser Versuch erhält seinen Namen durch das Aussehen der Probe während des Schälversuches. Die Probe wird hergestellt, indem zwei gleich dicke Fügeteile miteinander verklebt werden. Während des Versuchs werden die Fügeteile auseinandergezogen.

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

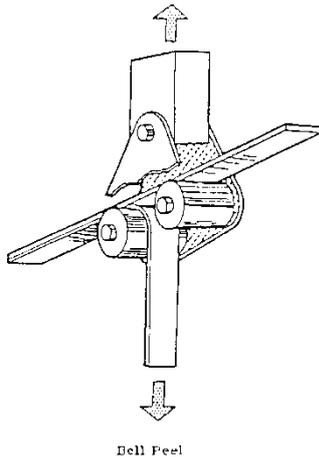


Es handelt sich um eine hochentwickelte Prüfmethode, bei der eine Trommel an der Schälprobe „hinauf klettert“ und so die Decklage abschält. Es ist erforderlich, die für das Aufwickeln der Decklage benötigte Kraft von der Schälkraft zu subtrahieren, um so die wirkliche Schälkraft zu erhalten.

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.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech_04-05-10.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 Jahre und bis zu mindestens 90.000 Flüge 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 Dauerschwingfestigkeit 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, so 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 ein 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 des 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.

Nachfolgend sind die Hauptanforderungen der Betriebsfestigkeits- bzw. Schadenstoleranzbewertung zusammengefasst:

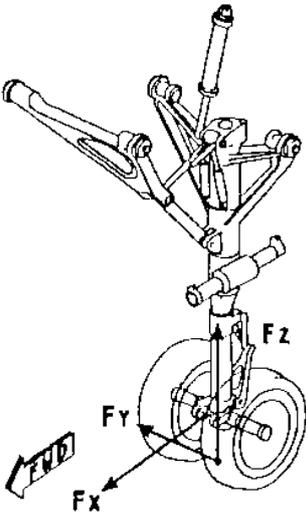
- Erstellung von analytischen Ermüdungs- und Damage-Tolerance-Berechnungen und –nachweisen für neue Strukturen und Reparaturen
- Versuchsmäßige Nachweise der Betriebsfestigkeit und des Damage-Tolerance-Verhaltens der Struktur (neue Struktur und Reparaturen) durch Klein-, Komponenten- und Großzellen-Versuche
- 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

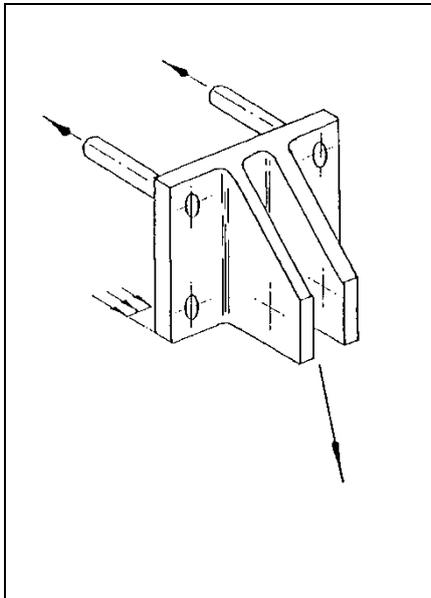
6.3. Konstruktionsprinzip

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“ und „fail safe“

„safe life“	
 <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">Bugfahrwerk A320</p>	<p>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.</p>
„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.

6.3.2. Konstruktionsprinzip „damage tolerance“



Flügel

Abbildung 123: Kritische Risslänge an einem 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 einen 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.

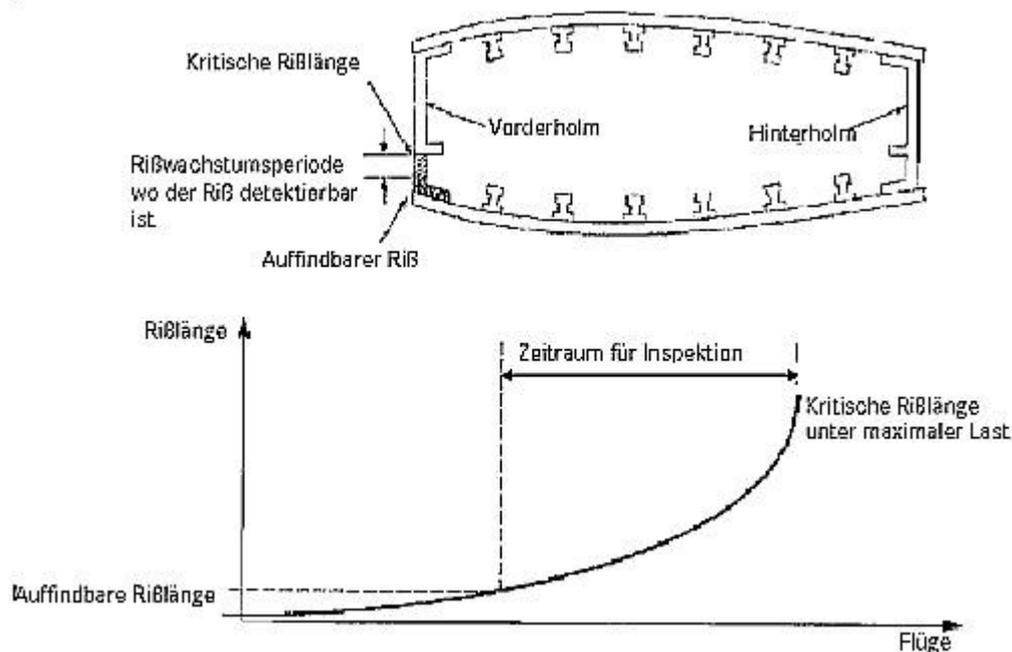


Abbildung 124: Einfacher Lastpfad bei der schadenstoleranten Konstruktion

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.

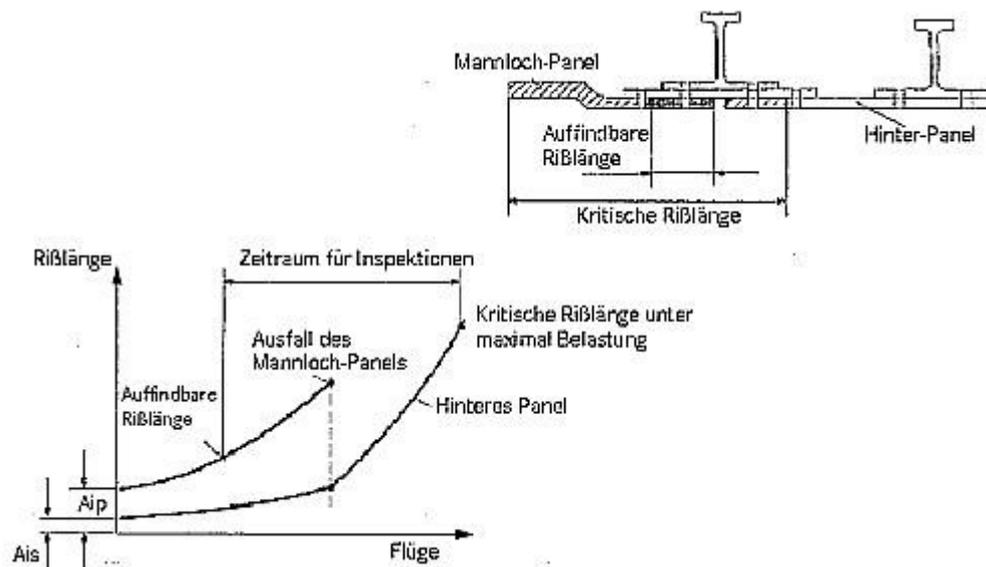


Abbildung 125: Mehrfacher Lastpfad bei der schadenstoleranten Konstruktion

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.

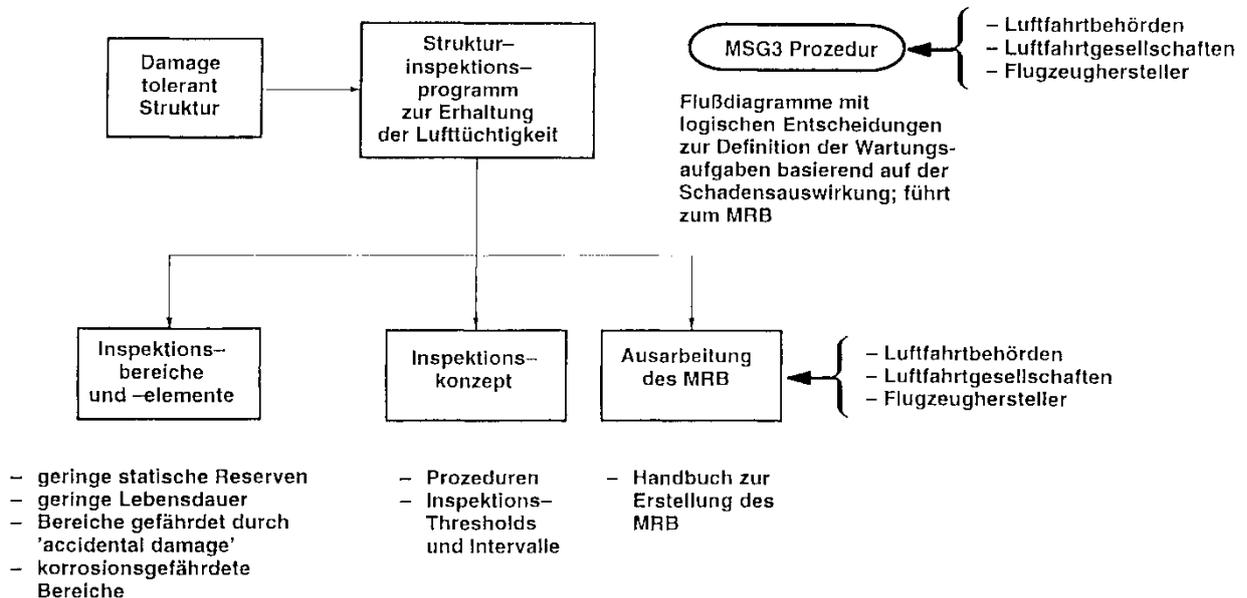


Abbildung 126: Prozess zur Definition des Wartungsprogramms

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

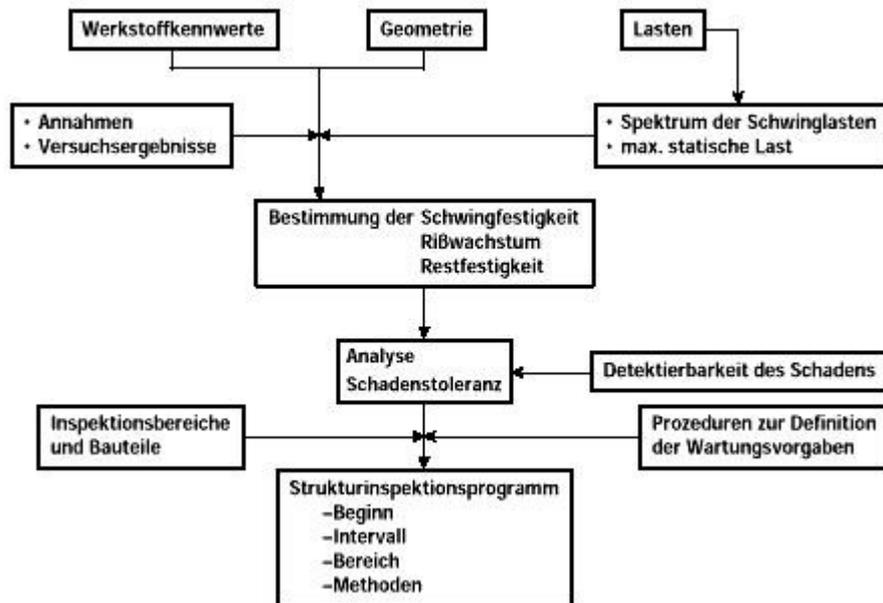


Abbildung 127: Strukturinspektions-Programm

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.

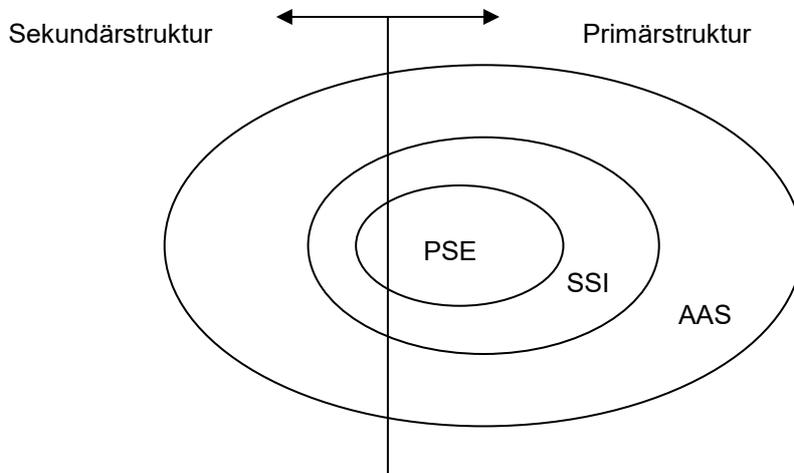


Abbildung 128: Ermittlung der Strukturinspektionen

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)*

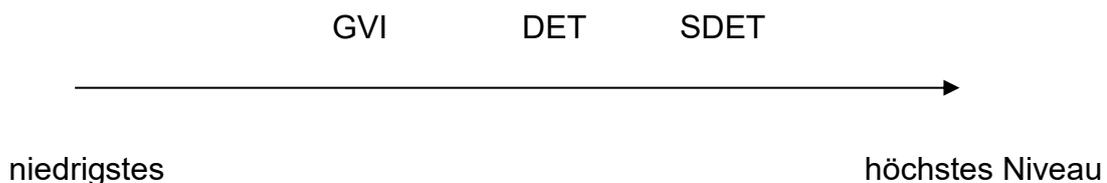
Hierbei handelt es sich um eine intensive visuelle Untersuchung eines spezifizierten Details, Zusammenbaus oder Einbaus zur Entdeckung von Unregelmäßigkeiten. Dabei muss ausreichendes Licht vorhanden sein und wenn erforderlich Hilfsmittel wie Spiegel, Lupen oder Ähnliches eingesetzt werden. Ebenfalls 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 höheren 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.

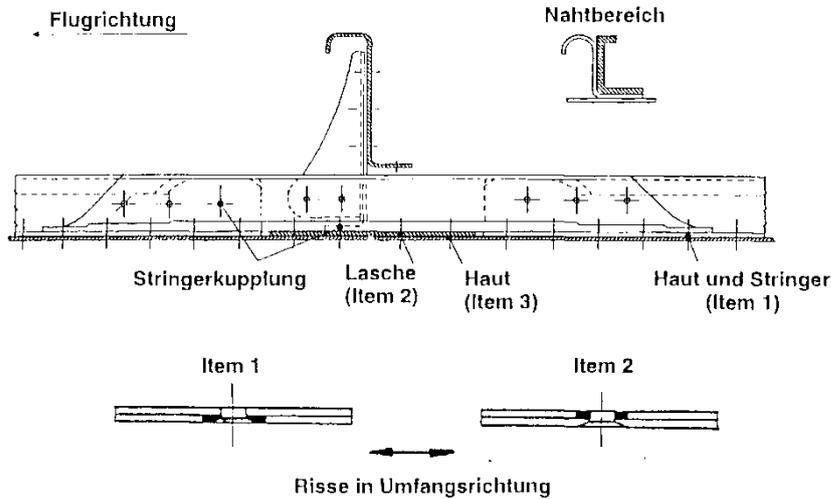
6.5. Erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden - Beispiele

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:

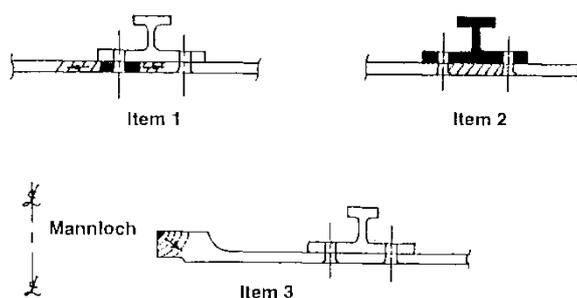
- Haut und Stringer am Auslauf der Stringerkupplung
- Querstoßlasche im Bereich der beiden inneren Nietreihen
- Haut im Bereich der äußeren Nietreihen der Haut-Laschennietung
- Stringerkupplungsfuß im Bereich der inneren Nietreihen
- Stringerkupplungsflansch am Auslauf des Stringers



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

Abbildung 129: Querstöße - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden

Flügelstruktur

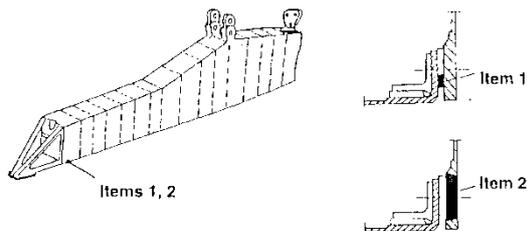


Bauteil	Item	Entdeckbarer Schaden	Inspektionsmethode
Haut/Stringer	1	Hautriß	detailed oder general visual (extern)
	2	gebrochener Stringer	detailed (intern)
Mannloch-Ausschnitt	3	Riß an der Ausschnittskante	special detailed

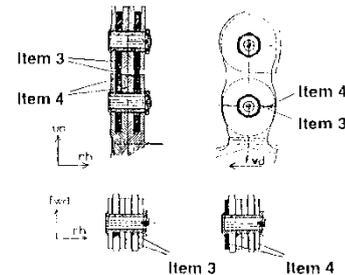
Abbildung 130: Flügelunterdecke - erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden

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 131: 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 Aner-

kennung 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 ein vorgeschalteter Auffrischungslehrgang vorgesehen ist.

Quellenangaben:

DIN EN 4179

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

8. Fehlerauffindwahrscheinlichkeit POD (Probability of Detection)

In der Qualitätssicherung unterscheidet man zwischen:

- Stichprobenprüfung
- 100% Prüfung

Bei der Stichprobenprüfung werden aus der Gesamtanzahl von hergestellten Produkten nur wenige überprüft. Die Überprüfung ist meistens zerstörend. Mit statistischen Methoden wird bestimmt, wie groß die Anzahl an Stichproben sein muss. Die Stichprobenprüfung spielt in sicherheitskritischen Bereichen, so wie der Luftfahrt keine Rolle, daher wird sie in diesem Kurs nicht behandelt.

In sicherheitskritischen Bereichen wird eine 100% Prüfung durchgeführt. Das heißt jedes Bauteil wird überprüft. Aus diesem Grund können hier nur zerstörungsfreie Prüftechniken verwendet werden.

Meist wird bei den zerstörungsfreien Prüftechniken davon gesprochen, dass Materialdefekte einer bestimmten Größe gefunden werden können. Doch ist das wirklich so?

Die Realität ist:

- Keiner weiß, welche Defekte nicht gefunden werden, nur welche gefunden werden.
- Die zerstörungsfreien Prüfverfahren werden auf künstlich hergestellte Ersatzfehler kalibriert und justiert. Keiner weiß, ob ein realer Defekt das gleiche Ergebnis des Prüfsystems hervorruft.

Hier kommt die POD ins Spiel. POD ist die Abkürzung für Fehlerauffindwahrscheinlichkeit, als Beantwortung der Frage: "Wie wahrscheinlich ist es, dass ein Defekt gefunden wird?" oder „Wie wahrscheinlich ist es, dass ein Defekt nicht gefunden wird?“

Durch die POD wird eine statistische Aussage über die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler aufgefunden wird, getroffen.

Diese Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu finden hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Aufbau und Durchführung der Prüfung
- Leistung des Prüfers bei der Durchführung und Auswertung der Prüfung (Human Factor)
- Reflektivität des Fehlers

8.1. Begriff POD

Die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu detektieren, wird als POD (Probability of Detection) bezeichnet. Sie wird als Funktion der Fehlergröße angegeben. Die POD wird bestimmt durch Experimente, bei denen das Prüfverfahren bei Testkörpern mit Materialfehlern in definierten Größen verwendet wird. Die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet. Die Funktion $POD(a)$ wird in Abhängigkeit von der Fehlergröße a bestimmt.

In dem POD-Diagramm kann man ablesen, welche Fehlergröße mit welcher Wahrscheinlichkeit detektiert wird. Eine sehr wichtige Fehlergröße wird $a_{90/95}$ genannt. Sie ist die Fehlergröße, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% bei einem Vertrauensniveau von 95% detektiert wird. Ab diesem Wert spricht man von einer zuverlässigen Prüfung.

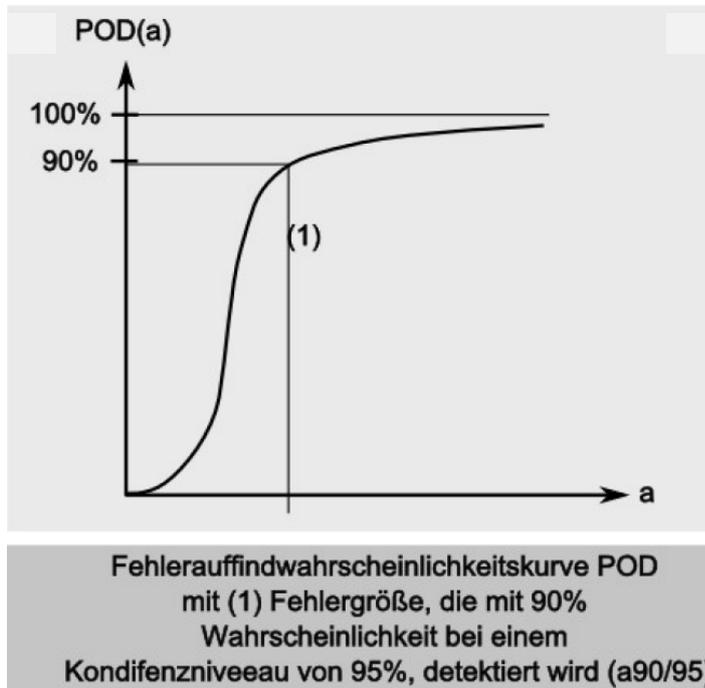


Abbildung 132: Beispiel einer POD-Kurve

Die POD wird durch Experimente bestimmt und gilt nur für ein Prüfverfahren, für ein System und für eine Fehlergröße.

Das heißt, dass für jede neue Prüfmethode eine eigene POD erstellt werden muss. Es reicht nicht, zum Beispiel für die Ultraschallprüfung in Tauchtechnik eine POD für Ultraschallprüfung in Kontakttechnik zu verwenden. Es muss für diese Prüfmethode eine eigene POD erstellt werden.

8.2. Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung

In diesem Kapitel werden nur die Grundlagen behandelt, die für die POD-Berechnung eine Rolle spielen. Wahrscheinlichkeit ist ein Maß für die Häufigkeit eines Ereignisses. Sie kann bestimmt werden als Anzahl der Fälle bei denen ein Ereignis aufgetreten ist geteilt durch die gesamte Anzahl an Fällen.

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.

Beispiel:

Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass beim Würfeln eine 6 gewürfelt wird?

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung gibt an, wie sich die Wahrscheinlichkeit auf alle möglichen Werte verteilt.

Hier wird nur die Normalverteilung beschrieben.

Normalverteilung

Die wichtigste Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist die Normalverteilung oder Gauß'sche Verteilung. Vor allem bei der Abschätzung der Messwerte 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 μ und der Standardabweichung σ 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.

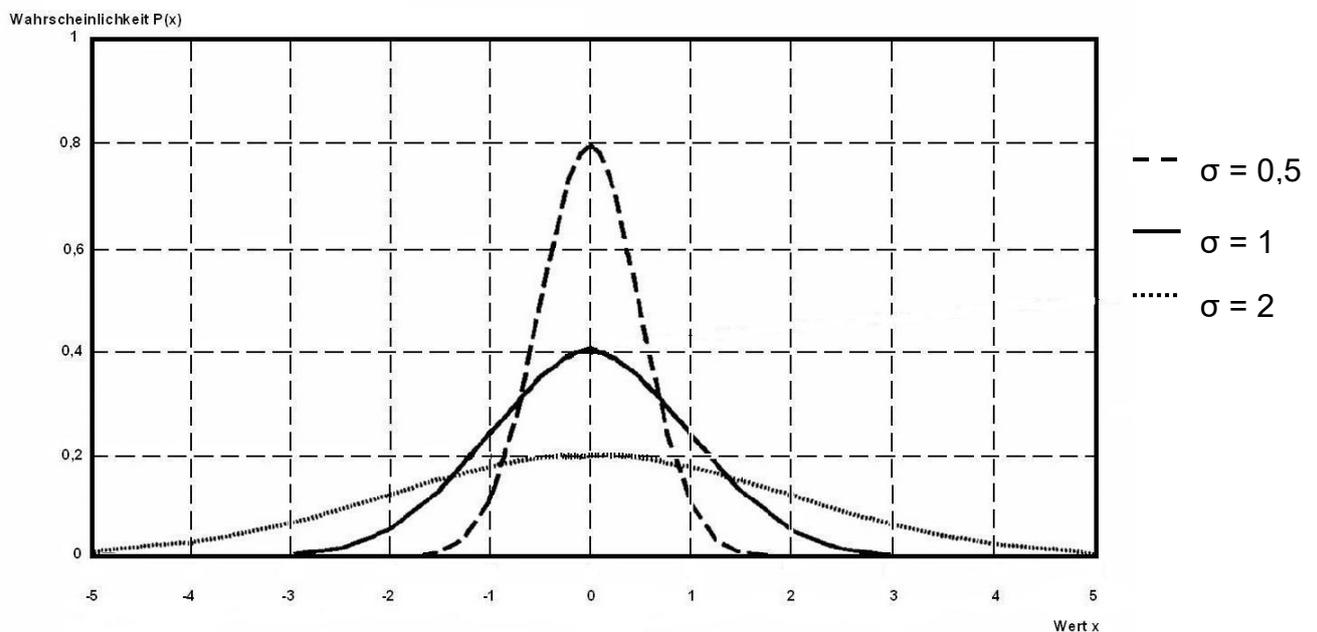


Abbildung 133: Normalverteilungsfunktion (Dichteverteilung)

Beispiele für Normalverteilungen sind etwa Prüfungsergebnisse. Es wird sehr viele durchschnittliche Ergebnisse geben und wenige „Ausreißer“ nach oben und nach unten.

Auch die Fehlerdetektion / Fehlervermessung verhält sich oft normalverteilt. Wenn ein Fehler von unterschiedlichen Prüfern, zu unterschiedlichen Zeiten an unterschiedlichen Prüferten gemessen wird, werden sich die Messergebnisse so verteilen, dass viele Ergebnisse den Nennwert treffen und je weiter sich die Ergebnisse vom Nennwert entfernen, desto selten treten sie auf.

Wie stark die Ergebnisse vom Mittelwert abweichen wird mit der Standardabweichung angegeben.

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 μ und die Streuung s ein Schätzwert für die Standardabweichung σ .

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 γ 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 γ -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 Verteilungsfunktionen 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.

8.3. Durchführung der POD-Bestimmung

Die POD wird durch Experimente ermittelt. Das Vorgehen dazu ist im Folgenden beschrieben.

Es wird eine große Anzahl an Fehlern in einem oder mehreren Bauteilen, die dann auch als Referenzkörper bezeichnet werden, benötigt. Die Anzahl der Fehler variiert je nach verwendeter Methode zur POD-Berechnung. Eine Beschreibung der Anforderungen an die Referenzkörper folgt in einem späteren Kapitel.

Die Referenzkörper müssen mehrfach mit variablen Umgebungsbedingungen geprüft werden. Die Umgebungsbedingungen sind zum Beispiel unterschiedliche Prüfer, unterschiedliche Prüferte, verschiedene Zeiten.

Das Resultat sind sehr viele Prüfergebnisse, die dann mit den entsprechenden POD-Methoden ausgewertet werden können.

Die Durchführung einer POD-Bestimmung und die unterschiedlichen Methoden sind ausführlich im Military Handbook 1823 (MIL-HDBK1823) (zu erhalten auf folgender Homepage [http://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A\(2009\).pdf](http://www.statisticalengineering.com/mh1823/MIL-HDBK-1823A(2009).pdf)) beschrieben.

8.4. Methoden zur POD-Ermittlung

Für diesen Kurs werden die folgenden Methoden betrachtet:

- Hit / Miss
- 29/29
- \hat{a} über a

8.4.1. Hit / Miss Methode

Bei der Hit / Miss Methode werden die Prüfergebnisse danach ausgewertet, ob ein Materialdefekt gefunden wurde (Hit) oder übersehen wurde (Miss).

Die Prüfergebnisse werden in vier Gruppen eingeteilt:

- True Positive = Hit
Eine Anzeige des Prüfsystems an der Stelle eines echten Materialdefektes.
- False Positive
Anzeige des Prüfsystems an einer Stelle, an der kein echter Materialdefekt vorhanden ist. Diese Anzeige kann z.B. von der Geometrie des Bauteils, falsches Ablesen der Anzeige, Prüfumgebung, etc. kommen. Wenn sie nicht zugeordnet werden kann, wird ein Bauteil aussortiert, das eigentlich als „gut“ bewertet werden sollte.

- False Negative = Miss
Keine Anzeige des Prüfsystems, obwohl ein Materialdefekt vorhanden ist. Der Materialdefekt wird dabei übersehen.
- True Negative
Keine Anzeige des Prüfsystem bei einem defektfreien Material.

Um mit Hit / Miss Daten eine POD zu generieren braucht man eine sehr große Menge an unterschiedlichen Prüfergebnissen für eine Fehlergröße. Dies kann erreicht werden, indem der selbe Referenzkörper an unterschiedlichen Prüfeinrichtungen von unterschiedlichen Prüfern geprüft wird und es mehrere Referenzkörper mit unterschiedlichen Defekten, die aber die gleiche Größe haben, gibt.

Für jede dieser Fehlergrößen gibt es eine definierte Anzahl an Prüfungen und die Anzahl der positiven Prüfungen (bei denen der Materialfehler detektiert wurde). Aus diesen beiden Zahlen kann die Wahrscheinlichkeit nach Formel 5.1 berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit ist die Anzahl der positiven Prüfungen des Fehlers mit der Größe a (n_{positiv}) durch die Anzahl der Prüfungen des Fehlers mit der Größe a ($n_{\text{Prüfung}}$).

$$POD(a) = \frac{n_{\text{positiv}}}{n_{\text{Prüfung}}}$$

Wenn alle Wahrscheinlichkeitswerte für die unterschiedlichen Fehlergrößen in ein Diagramm eingezeichnet werden, bekommt man die typische POD-Kurve.

8.4.2. 29 / 29 Methode

Eine Variation der Hit / Miss Methode ist die 29 / 29 Methode. Wenn 29 verschiedene Fehler der gleichen Fehlergröße mit der Prüfung detektiert werden und kein einziger übersehen wurde, kann diese Fehlergröße als a90/95 definiert werden, also Fehlergröße, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% bei einem Vertrauensniveau von 95% detektiert werden können.

Wenn ein Fehler übersehen wurde, dann erhöht sich die Anzahl der benötigten Versuche. Die Anzahl der minimal benötigten Fehler (n-min) und die Anzahl der maximal übersehen Fehler (d-max) ist in der folgenden Tabelle zu finden.

Tabelle 1: Wertepaare von n-min und d-max für $POD \geq 90\%$ und statistische Sicherheit = 95%

n-min	d-max								
29	0	129	7	215	14	298	21	379	28
46	1	142	8	227	15	310	22	391	29
61	2	154	9	239	16	321	23	402	30
76	3	167	10	251	17	333	24	413	31
89	4	179	11	263	18	345	25	424	32
103	5	191	12	275	19	356	26	436	33
116	6	203	13	285	20	368	27	447	34

Abbildung 134: Tabelle für die maximal übersehenen Fehler

Wenn die Prüfergebnisse für eine Fehlergröße nicht den Werten in der Tabelle entsprechend sind, dann muss die Fehlergröße erhöht werden oder das Prüfsystem verbessert werden.

8.4.3. \hat{a} über a – Methode

Die \hat{a} über a Methode kann bei allen Prüfverfahren mit kontinuierlichen Signalen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu binären Signalen, die die Bauteile nur nach „gut“ oder „schlecht“ bewerten, ist das Ergebnis hier eine Signalamplitude, die als \hat{a} abgekürzt wird. Erst die Auswertung dieser Signalamplituden entscheidet über die Bewertung des Bauteils in „fehlerfrei“ und „fehlerbehaftet“. Diese Signale haben einen höheren Informationsgehalt, wodurch durch Verwenden einer Methode, die dies berücksichtigt, die Anzahl der Referenzfehler für die POD-Berechnung verringert werden kann. Beispiele für Prüfverfahren mit kontinuierlichen Signalen sind Ultraschallprüfung, Wirbelstromprüfung und digitales Röntgen.

Für jeden Materialdefekt wird die Signalamplitude \hat{a} und die Defektgröße a bestimmt.

Die Signalamplitude \hat{a} wird über der Fehlergröße a in einem logarithmischen Diagramm aufgetragen. Eine lineares Verhältnis wird für den natürlichen Logarithmus angenommen und die Regressionsgerade in das Datenset gefitted.

Die Regressionsgerade lässt sich wie in der folgenden Formel beschreiben:

$$\ln(a) = \beta_0 + \beta_1 \ln(a) + \delta$$

Es wird angenommen, dass die Residuen normal verteilt sind, dann beschreibt δ diese Verteilung. Die Parameter β_0 und β_1 der Regressionsgerade können mit der Maximum-Likelihood Methode bestimmt werden.

Typischerweise wird ein Konfidenzniveau von 95% verwendet, was bedeutet, dass die Residuen zu 95% im spezifizierten Konfidenzintervall liegen. Die Konfidenzintervalle tragen der statistischen Unsicherheit bei einer Auswertung von Messergebnissen Rechnung. Es gibt verschiedene Methoden die Konfidenzintervalle aus den Messdaten mit der Maximum-Likelihood Methode zu bestimmen.

Die Verteilung der Residuen einer jeden Defektgröße ist mit der Dichtefunktion $g(a)$ beschrieben. Im Normalfall ist sie eine gauß'sche Normalverteilung. Nur Signale, die eine bestimmte Amplitudenhöhe überschreiten werden ausgewertet. Diese Schwelle wird oft auch als Rauschlevel bezeichnet. Die Signale, die darunter liegen, können nicht vom Gefügerauschen unterschieden werden und haben daher keinen Informationsgehalt. Dieser Schwellwert ist die untere Grenze um die POD aus der Dichtefunktion $g(a)$ zu berechnen.

Theoretisch gibt es keinen oberen Grenzwert, der den Bereich der positiven Anzeigen eingrenzt. Jede Anzeige über dem Schwellwert, egal, wie hoch sie ist, wird als positive Anzeige gewertet. Technisch gibt es allerdings einen Grenzwert, das Sättigungslevel, über dem der Verstärker in Sättigung operiert.

Die POD lässt sich aus der Dichtefunktion $g(\hat{a})$ nach der folgenden Formel berechnen:

$$POD(a) = \int_{\hat{a} \text{ Schwellwert}}^{\infty} g(\hat{a}) d\hat{a}$$

Anschaulich ist die Wahrscheinlichkeitsdichte in Abbildung 27 (b) dargestellt. Die dunkel eingefärbte Fläche unter der Dichtefunktion ist die berechnete Fehlerauffindwahrscheinlichkeit für die entsprechende Fehlergröße. Die POD wird als Wahrscheinlichkeitsfunktion in einem neuen Diagramm aufgetragen. Sie kann beschrieben werden als die Wahrscheinlichkeit, dass eine Signalamplitude über dem Schwellwert liegt (siehe nächste Formel).

$$POD(a) = P(\hat{a} > \hat{a}_{Schwellwert})$$

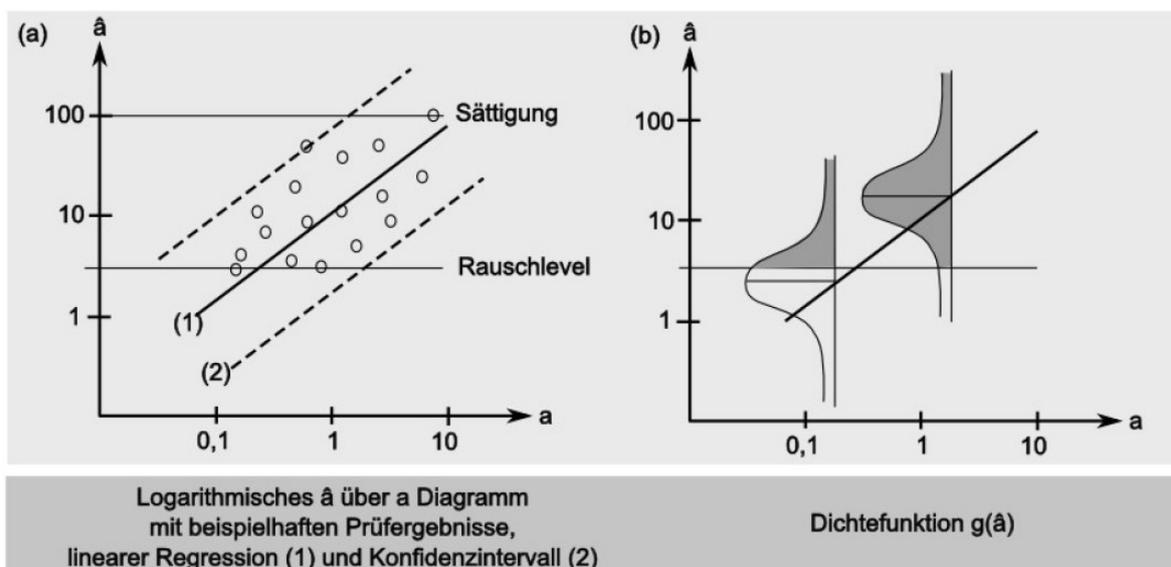


Abbildung 135: \hat{a} über a -Diagramm und die daraus resultierende Dichtefunktion

Für diese Methode wird eine große Anzahl an unterschiedlichen Materialdefekten benötigt. Ein Minimum von 40 Defekten wird vorgeschrieben [Dodh09].

Im Normalfall werden dafür künstlich hergestellte Fehler in Referenzkörpern verwendet, deren Größe im Bereich und kleiner des Detektionslimits liegen.

8.5. Referenzkörper / Referenzfehler

Das Problem ist, dass eine große Anzahl an Materialdefekten vorhanden sein müssen, die real vorkommenden Fehlstellen entsprechen.

Es muss also entweder möglich sein eine große Anzahl an realen Materialdefekten zu sammeln und definiert zu vermessen oder die Fehler synthetisch herzustellen.

Bei realen Fehlstellen ist das Problem, dass die Bauteile um die Fehlstellen richtig vermessen zu können meistens zerstört werden müssen. Zum Vermessen wird nach der Messung an der Stelle der Anzeigen das Material so fein abgetragen, dass man die Fehlstelle dabei nicht zerstört. Das führt zu der Herausforderung, dass man nicht weiß, welche Fehlstellen nicht detektiert wurden, da man keine Aussage darüber hat, welche Fehler im Bauteil vorhanden waren, wenn sie nicht vom Prüfsystem detektiert wurden. Außerdem ist das Verfahren zum Vermessen der Fehlstellen sehr aufwendig und teuer.

Bei der Herstellung von synthetischen Materialdefekten ist die Herausforderung, dass die synthetischen Fehlstellen den realen Defekten ähneln sollen und nicht ohne das Prüfverfahren erkennbar sein sollten.

Dies ist allerdings technisch oft nicht realisierbar.

Hier sind einige Beispiele für Referenzfehler genannt.

Risse, die mit Farbeindringprüfung, Magnetpulver und Wirbelstrom, detektiert werden können, können durch bewusst falsch gewählte Parameter bei der Oberflächenbehandlung oder durch starkes Erhitzen und Abkühlen des Bauteils eingebracht werden.

Für die Röntgenprüfung können kleinste Bohrungen in das Bauteil eingebracht werden.

Einschlüsse hoher und niedriger Dichte im Materialvolumen, die mit Röntgen oder Ultraschall detektiert werden können, können in Bohrungen im Bauteil eingesetzt werden, welches anschließend durch Verschweißen und Hippen wieder hergestellt wird.

8.6. POD für die Lebensdauerberechnung

POD ist eine der Voraussetzungen für die Lebensdauerberechnung mit Schadenstoleranz (*Damage Tolerance*). Es wird davon ausgegangen, dass jedes eingesetzte

Material fehlerbehaftet ist. Diese Defekte können die integrale Struktur der Bauteile im Betrieb beeinträchtigen.

Bei der Berechnung der Einsatzintervalle und der Materialdicken, werden diese Defekte mit einbezogen. Die Materialdicken werden so gewählt, dass ein Riss einer definierten Größe keinen Schaden am Bauteil verursacht und die Intervalle werden so gewählt, dass das Risswachstum, wenn es eine kritische Größe überschreitet detektiert werden kann.

Dafür wird eine maximale Fehlergröße, abhängig von der Fehlerart, definiert. Um sicherzustellen, dass kein Defekt diese Größe überschreitet werden zerstörungsfreie Prüftechniken eingesetzt. 100% der sicherheitskritischen Bauteile werden mit mindestens einer, im Normalfall aber mit verschiedensten zerstörungsfreien Prüftechniken geprüft.

Für die Auslegung mit der Schadenstoleranz Methode muss eine Risikoanalyse gemacht werden. Diese liefert eine Aussage über die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente während eines definierten Zyklus.

Die Risikoanalyse wird mit folgenden Daten bestimmt:

- Komponentenvolumen und –beanspruchung
- Materialeigenschaften
- Rissausbreitung
- Verteilung der Anomalitäten (Materialdefekte)
- Lebensdauerberechnungen
- POD
- Instandhaltungsintervalle

Die POD ist also einer der Eingabeparameter für die Risikoanalyse.

Die Materialdefekte werden in einem Diagramm angegeben als Anzahl der vorgekommenen Defekte über ihrer Größe. Diese Kurven werden auch *Exceedence Curves* (also Überschreitungskurven) genannt und stellen eine der grundlegenden Hilfsmittel der Strukturmechanik dar.

8.7. Durchführung einer POD-Studie

Das Prüfverfahren, für das die POD durchgeführt werden soll, muss definiert werden: Welche Technik? Nach welcher Prüfanweisung wird geprüft? Welche Fehlergrößen?

Anhand dieser Informationen werden die Referenzkörper mit einer großen Anzahl an definierten Defekten entworfen und hergestellt. Diese werden dann von Unterschiedlichen Prüfern, an unterschiedlichen Prüferten, zu unterschiedlichen Zeiten nach der vorgegebenen Prüfanweisung geprüft. Somit wird ein großes Datenset an Prüfergebnissen erstellt.

Für die Auswertung dieser Daten kann die kostenlose Software des Military Handbook 1823 verwendet werden. Sie kann von der Seite www.statisticalengineering.com heruntergeladen werden.

Das Datenset muss so aufgebaut sein, dass es Prüfergebnisse zwischen 0% und 100% hat. Falls das Datenset dieser Anforderung nicht gerecht wird, muss dies der Auswertung mitgeteilt werden, in dem ein Left-Censor (Wert für die Einschränkung des Datensets auf der linken Seite, zum Beispiel 20%) und ein Right-Censor (Wert für die Einschränkung des Datensets auf der rechten Seite, zum Beispiel 80%) angegeben wird.

Die Daten müssen in einer dreispaltigen Tabelle abgespeichert werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 136 gegeben.

	A	B	C	D
1	ID	$a = d_{mil}^2 \cdot \pi / 4$	\hat{a} = Amplitude	
2	1	779,0935582	68	
3	2	1752,960506	100	
4	3	194,7733895	35	
5	4	1752,960506	100	
6	5	1752,960506	100	
7	6	779,0935582	98	

Abbildung 136: Beispiel für \hat{a} über a Datenset

Diese Daten können eingelesen werden und dann in einem \hat{a} über a-Diagramm angezeigt werden. Es gibt mehrere Darstellungsarten, doppelt logarithmisch, nur eine der Achsen logarithmisch oder dezimale Darstellung. Anhand der Diagramme kann entschieden werden, welche Darstellung für die Auswertung verwendet wird.

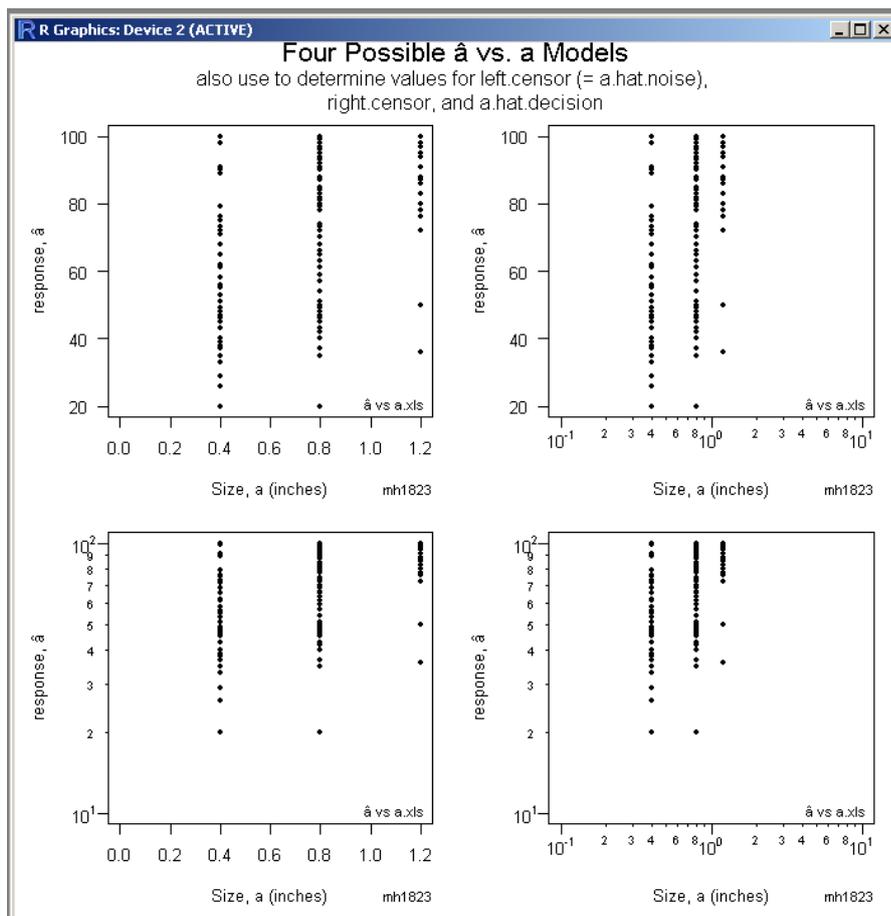


Abbildung 137: Mögliche Darstellungsarten der \hat{a} über a Daten

In die Datenwerte wird eine Regressionsgerade gefittet. Um die herum das 95% Konfidenzintervall gelegt wird. Aus diesen Werten kann dann die POD berechnet werden

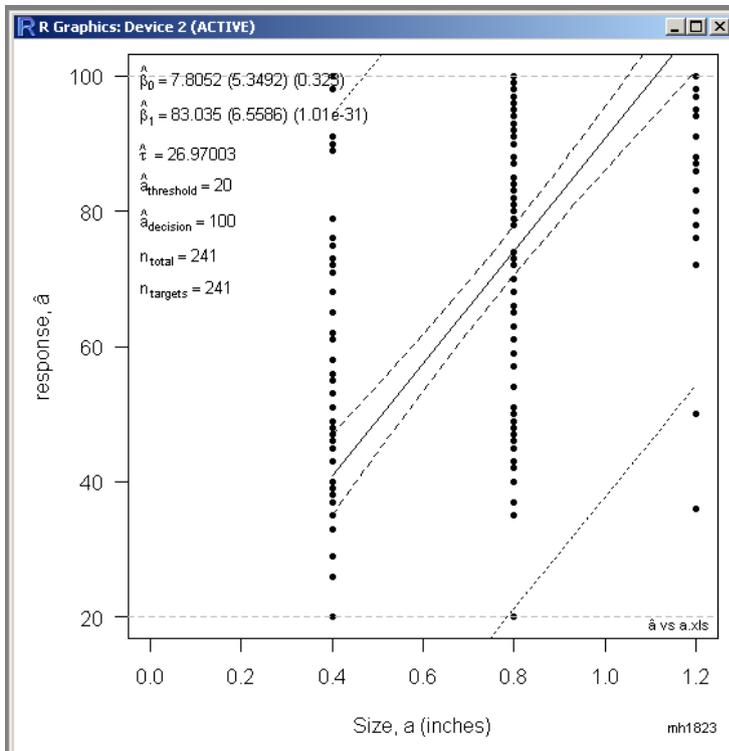


Abbildung 138: Regressionsgerade und Konfidenzintervall

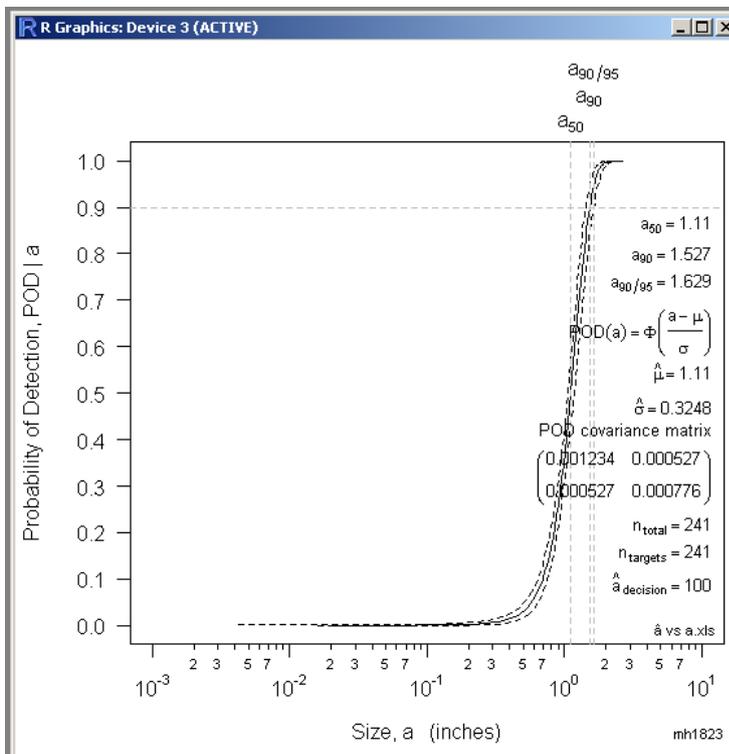


Abbildung 139: POD-Kurve

Quellenangaben:

Generell:

- Baron, H-U; MTV2002 (08-2014) POD-Ermittlung für ZfP-Verfahren
- FAA-AC33.14-1 „Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors (Januar 2001)
- Military Standard MIL-HDBK-1823 (April 1999)
- Update of Default Propability of Detection Curves for the Ultrasonic Detection of Hard Alpha Inclusions in Titanium Alloy Billets, FAA report DOT/FAA/AR-07/63, 2008

Hit/Miss Methode:

- Generazio, E. R., Interrelationships Between Receiver/Relative Operating Characteristics Display, Binomial, Logit and Bayes' Rule Probability of Detection Methodologies, NASA report NASA/TM-2014-218183,2014

29/29 Methode

- Generazio, E. R., Binomial Test Method for Determining Probability of Detection Capability for FractureCritical Applications, NASA report NASA/TP-2011-217176, <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015149.pdf>
- Schnars, U., Kuck, A., Application of POD Analysis at Airbus, 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, 2009, <http://www.ndt.net/article/reliability2009/Inhalt/we3a1.pdf>

â über a Methode:

- Berens, A. P., NDE Reliability Data Analysis, Metals Handbook, 9th edition, Vol. 17, pp. 689-701, ASM International, 1989
- Berens, A. P., Hovey, P. W., Flaw Detection Reliability Criteria, Volume I – Methods and Results, AFWALTR-84-4022, Air Force Wright-Aeronautical Laboratories, 1984, <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA142001>

Referenzkörper herstellen:

- Gigliotti, Perocchi, Nieters, Gilmore, Design and Fabrication of forged ti-6al-4V blocks with synthetic inclusions for estimation of detectability, Review of Progress in QNDE, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E. eds, Plenum Press, New York, NY, Vol.14, 1995, pp.2089-2096
- Kempainen, M., Virkkunen, I., Production of Real Flaws in Probability of Detection (POD-) Samples for Aerospace Applications, 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012