

# **Basics für Level III**

## **(Luft- und Raumfahrt)**

### **VORBEREITUNGSSEMINAR**

**&**

### **GRUNDLAGEN**

**Version 1.0**

---

**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 (Korrekturlesen)
- Dr. Andreas Baus (Nieten und Schrauben)
- Thomas Brendel (dynamische Prüfverfahren, Bruchmechanik)
- Werner Buchmann (Schmieden)
- Martin Fessler-Knobel (Kleben)
- Benjamin Henkel (Magnetpulververfahren)
- Dr. Falko Heutling (metallische Werkstoffe, Billetherstellung)
- Dr. Ulrich Knott (Löten)
- Astrid Kraus (Betriebsfestigkeit)
- Ralph Kropp (Schweißen)
- Johanna Menges (Ultraschall)
- Wilhelm Satzger (Shearografie)
- Michaela Schnell (Recherche und Skript)
- Stefan Schöner (Oberflächenbehandlung)
- Robert Schuster (Eindringprüfung)
- Siegfried Sikorski (Faserverbundwerkstoffe, Prüfung Klebeverbindung)
- Robert Wege (Gießen)
- Kilian Vogt (Recherche und Skript)
- Katharina Wolf (Recherche und Skript)

*München, März 2011*

*Stefan Neuhäusler*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Metallische Werkstoffe .....</b>	<b>11</b>
1.1. Einführung in die Metallkunde .....	11
1.2. Festigkeitssteigerung .....	11
1.3. Elektrische Leitfähigkeit.....	13
1.4. Werkstoffauswahl .....	15
1.5. Hauptsächlich verwendete Flugzeugwerkstoffe .....	16
1.6. Wichtige Werkstoffbezeichnungen am Beispiel: Triebwerksbau .....	20
<b>2. Fertigungsverfahren .....</b>	<b>22</b>
2.1. Gießen .....	22
2.1.1. Übersicht der Werkstoffgruppen .....	22
2.1.2. Gießverfahren .....	23
2.1.3. Gussfehler und geeignete Prüfverfahren .....	28
2.1.4. Anwendungen im Triebwerksbau .....	29
2.2. Schmieden .....	31
2.2.1. Grundlagen .....	31
2.2.2. Warm-, Halbwarm- und Kaltschmieden.....	31
2.2.3. Freiformen.....	32
2.2.4. Gesenkformen .....	32
2.2.5. Schmiedefehler und geeignete Prüfverfahren.....	32
2.2.6. Vor- und Nachteile des Schmiedens.....	33
2.2.7. Anwendungen im Triebwerksbau .....	34
2.3. Faserverbundwerkstoffe .....	35
2.3.1. Grundlagen .....	35
2.3.2. Matrixsysteme.....	36
2.3.3. Fasern.....	37
2.3.4. Halbzeuge.....	38
2.3.5. Bauweisen .....	39
2.3.6. Fertigungsverfahren.....	41
2.3.7. Prüfung von Kernverbunden .....	44

2.3.8. Anwendungen in der Luftfahrt.....	45
2.4. Billetherstellung von Titan und Titanlegierungen.....	47
2.4.1. Grundlagen .....	47
2.4.2. Herstellung von Titanschwamm .....	48
2.4.3. Herstellung von Titaningot .....	49
2.4.4. Herstellung von Titanbillet.....	52
2.4.5. Fehler und geeignete Prüfverfahren .....	53
2.4.6. Anwendungen im Triebwerksbau .....	53
2.5. Schweißen .....	54
2.5.1. Grundlagen .....	54
2.5.2. Schweißverfahren .....	54
2.5.3. Probleme beim Schweißen der unterschiedlichen Werkstoffe .....	60
2.5.4. Geeignete Prüfverfahren.....	62
2.5.5. Vor- und Nachteile des Schweißens .....	62
2.5.6. Anwendungen in der Luftfahrt.....	63
2.6. Löten .....	65
2.6.1. Grundlagen .....	65
2.6.2. Lötverfahren.....	67
2.6.3. Reparatur und Prüfung.....	69
2.6.4. Vor- und Nachteile des Lötens.....	70
2.6.5. Anwendungen im Triebwerksbau.....	71
2.7. Kleben .....	72
2.7.1. Grundlagen .....	72
2.7.2. Klebstoffarten.....	72
2.7.3. Klebefehler.....	73
2.7.4. Prüfung der Fügeverbindung .....	73
2.7.5. Vor- und Nachteile .....	73
2.7.6. Anwendungsbeispiele in der Luftfahrt .....	74
2.8. Niete und Schrauben.....	75
2.8.1. Grundlagen .....	75
2.8.2. Nieten.....	75
2.8.3. Nietarten .....	76

2.8.4.	Nietfehler und geeignete Prüfverfahren .....	80
2.8.5.	Nietanwendungen in der Luftfahrt .....	80
2.8.6.	Schrauben und Muttern .....	81
2.8.7.	Schrauben- und Mutterarten .....	81
2.8.8.	Prüfung von Schraubverbindungen.....	83
2.8.9.	Schraubanwendungen im Triebwerksbau .....	83
<b>3.</b>	<b>Zerstörungsfreie Prüfverfahren .....</b>	<b>85</b>
3.1.	Thermografie .....	86
3.1.1.	Historie .....	86
3.1.2.	Grundlagen .....	86
3.1.3.	Passive und aktive Thermografie .....	88
3.1.4.	Thermografieverfahren.....	89
3.1.5.	Vor- und Nachteile der Thermografie .....	94
3.2.	Ultraschall .....	96
3.2.1.	Historie .....	96
3.2.2.	Grundlagen .....	96
3.2.3.	Ultraschallprüfverfahren .....	99
3.2.4.	Methoden zur Anzeigen-Bewertung .....	103
3.2.5.	Anwendungen im Triebwerksbau .....	103
3.3.	Röntgen.....	105
3.3.1.	Historie .....	105
3.3.2.	Grundlagen .....	106
3.3.3.	Absorptions-Verhalten verschiedener Stoffe .....	109
3.3.4.	Röntgenprüfung von Festkörpern .....	111
3.3.5.	Streustrahlung.....	112
3.3.6.	Anwendungen im Triebwerksbau .....	114
3.4.	Computertomographie (CT) .....	116
3.4.1.	Historie .....	116
3.4.2.	Grundlagen .....	116
3.4.3.	Prinzip der Computertomographie .....	122
3.4.4.	Anwendungen im Triebwerksbau .....	126

3.5. Wirbelstromverfahren .....	128
3.5.1. Grundlagen .....	128
3.5.2. Induktionsgesetz .....	131
3.5.3. Wechselstromwiderstand und Induktivität einer Spule .....	132
3.5.4. Eindringtiefe .....	133
3.5.5. Wirbelstromprüfverfahren.....	134
3.5.6. Verwendete Spulsysteme .....	135
3.5.7. Prüfgerät .....	138
3.5.8. Anwendungen im Flugzeugbau.....	139
3.6. Magnetpulververfahren .....	140
3.6.1. Historie.....	140
3.6.2. Grundlagen .....	140
3.6.3. Prüfmittel.....	142
3.6.4. Magnetpulverprüfverfahren .....	144
3.6.5. Magnetisierungsmethoden.....	146
3.6.6. Auswertung .....	150
3.6.7. Entmagnetisierung .....	151
3.7. Eindringprüfung .....	152
3.7.1. Grundlagen .....	152
3.7.2. Verfahrensabläufe.....	152
3.7.3. Entwicklung und Auswertung/Anzeige .....	154
3.7.4. Prüfmittelsysteme .....	156
3.7.5. Eigenschaften der Prüfmittel .....	156
3.7.6. Anwendungen im Triebwerksbau .....	157
3.8. Shearografie.....	159
3.8.1. Geschichte .....	159
3.8.2. Grundlagen .....	160
3.8.3. Verfahrensablauf.....	161
3.8.4. Vor- und Nachteile der Shearografie.....	163
3.8.5. Anwendungen in der Luftfahrt.....	164

3.9. Sichtprüfung .....	165
3.9.1. Grundlagen .....	165
3.9.2. Allgemeine und spezielle Sichtprüfung .....	165
3.9.3. Arbeitstechnik der Sichtprüfung .....	166
3.9.4. Hilfsmittel .....	168
3.9.5. Anwendungen im Triebwerksbau .....	169
<b>4. Oberflächenbehandlung .....</b>	<b>170</b>
4.1. Allgemeines .....	170
4.2. Beschichtungen im Triebwerksbau .....	171
4.2.1. Oxidationsschutzschichten .....	171
4.2.2. Heißgaskorrosionsschutzschichten .....	173
4.2.3. Wärmedämmschichten .....	174
4.3. Geeignete Prüfverfahren .....	175
<b>5. Zerstörende Prüfverfahren .....</b>	<b>176</b>
5.1. Grundlagen .....	176
5.2. Beanspruchungsarten .....	178
5.3. Verformung von Metallen, Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen ...	179
5.4. Statische Prüfverfahren .....	182
5.4.1. Zugprüfung .....	182
5.4.2. Druckprüfung .....	186
5.4.3. Biegeversuch und Torsion .....	188
5.4.4. Zeitstand .....	190
5.5. Härteprüfung .....	192
5.5.1. Härteprüfung nach Brinell .....	192
5.5.2. Härteprüfung nach Vickers .....	193
5.5.3. Härteprüfung nach Rockwell .....	194
5.5.4. Härteprüfung nach Shore .....	195
5.6. Dynamische Prüfung .....	196
5.6.1. Dauerschwingfestigkeit .....	197
5.6.2. Betriebsfestigkeitsprüfung .....	202



5.7. Bruchmechanik.....	205
5.7.1. Risslängenmessmethode.....	206
5.7.2. Risszähigkeitsversuch.....	208
5.7.3. Rissfortschrittsuntersuchungen.....	210
5.7.4. Bruchmechanische Zeitstandversuche .....	211
5.7.5. Bruchmechanik bei Faserverbundwerkstoffen .....	211
5.8. Prüfung von Klebeverbindungen .....	213
5.8.1. Zugscherversuch .....	214
5.8.2. Scherversuch .....	214
5.8.3. Schälversuch .....	215
<b>6. Betriebsfestigkeit .....</b>	<b>219</b>
6.1. Begriffe der Betriebsfestigkeit .....	219
6.2. Vorschriften zur Betriebsfestigkeit.....	221
6.3. Konstruktionsprinzip .....	222
6.3.1. Konstruktionsprinzip „safe life“ .....	222
6.3.2. Konstruktionsprinzip „fail safe“ .....	222
6.3.3. Konstruktionsprinzip „damage tolerance“ .....	223
6.4. Strukturinspektionen.....	225
6.4.1. Erstellung eines Wartungsprogramms .....	225
6.4.2. Ermittlung der erforderlichen Strukturinspektionen .....	227
6.4.3. Ermittlung der detektierbaren Risslänge .....	229
6.5. Erkennbare Schäden und Inspektionsmethoden - Beispiele .....	230
<b>7. Aufbau einer „written practice“ (Zulassungsvorschrift).....</b>	<b>233</b>
7.1. Allgemeines.....	233
7.2. Qualifikationsstufen .....	233
7.3. Pflichten und Verantwortung des Personals.....	234
7.4. Ausbildungsprogramm .....	235
7.5. Anforderungen an die Erfahrung .....	235
7.6. Prüfungsordnung.....	236
7.7. Aufzeichnungen und Abwicklung.....	236
7.8. Anforderungen an die Erneuerung bzw. Verlängerung der Zulassung.....	236

<b>8. Wahrscheinlichkeitsbetrachtung</b>	<b>237</b>
8.1. Einführung	237
8.2. Statistik	237
8.2.1. Statistische Erhebung und zugeordnete Begriffe	238
8.2.2. Stichprobe	240
8.2.3. Auswertung statistischer Erhebungen	240
8.2.4. Graphische Darstellung von Häufigkeitstabellen	242
8.2.5. Lageparameter statischer Häufigkeitsverteilungen	244
8.2.6. Streuungsparameter statischer Häufigkeitsverteilungen	245
8.3. Wahrscheinlichkeitsrechnung	246
8.3.1. Definition der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses	247
8.3.2. Aufgabe der Wahrscheinlichkeitsrechnung	247
8.3.3. Wahrscheinlichkeitsverteilungen	248
8.4. Anwendungen aus der Qualitätssicherung	253
8.4.1. Zerstörungsfreie Prüfung	253
8.4.2. POD-Kurve	253
8.4.3. ROC-Kurve	254

# **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.

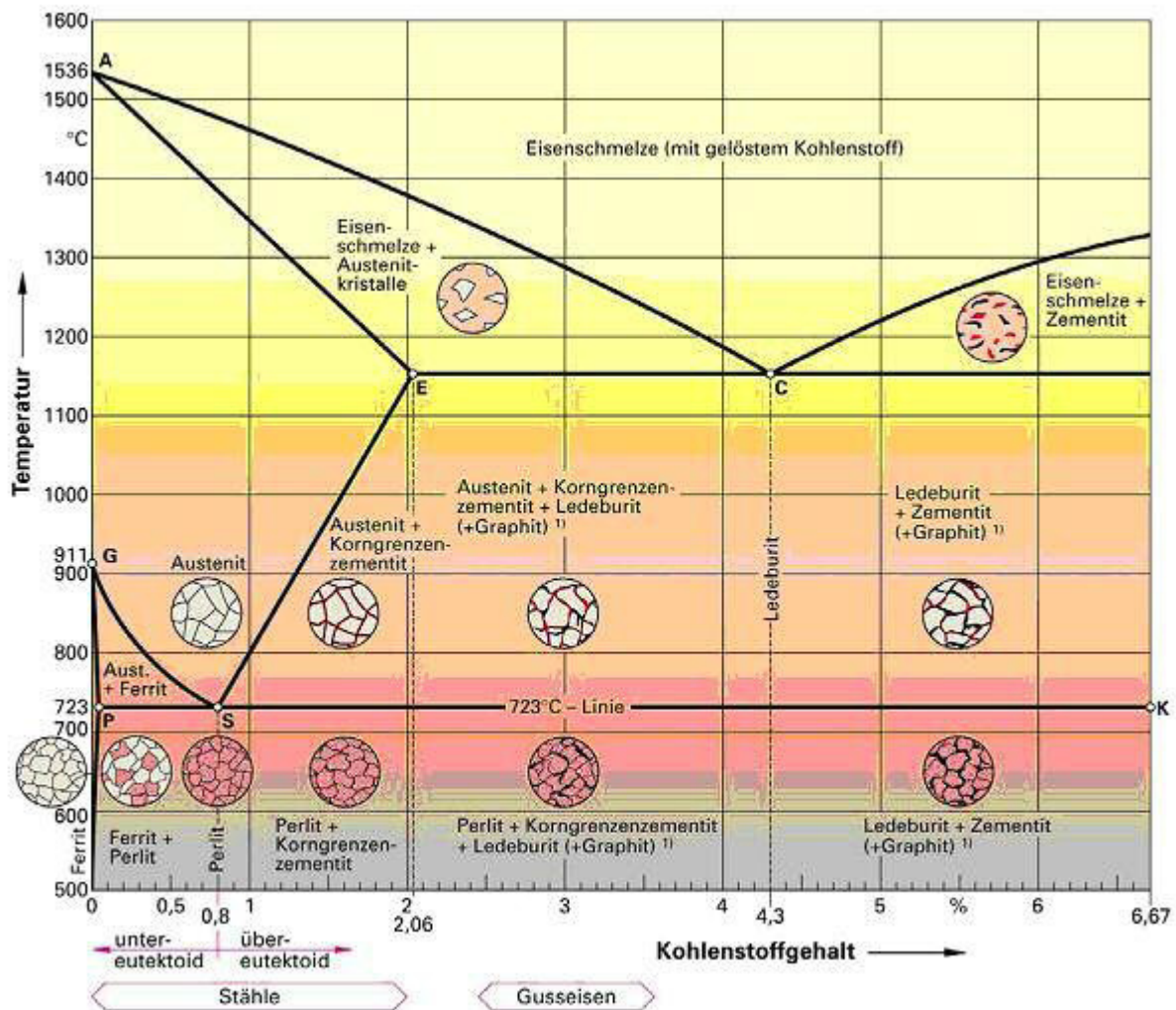
Durch Primärkristallisation, innere Oxidation und pulvermetallurgische Verfahren verteilen sich Dispersoide fein im Kristallgitter.

### Umwandlungshärtung

Ein weiteres wichtiges Härungsverfahren 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 Würfelmitte des kfz-Gitters lagert sich ein Kohlenstoffatom aus dem Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 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]

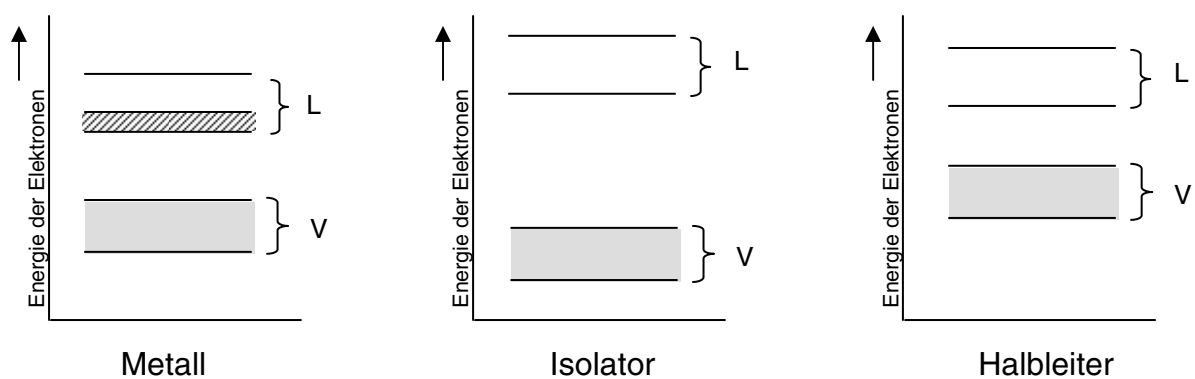
**Abbildung 1: Eisen-Kohlenstoff- Diagramm [1]**

### 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.

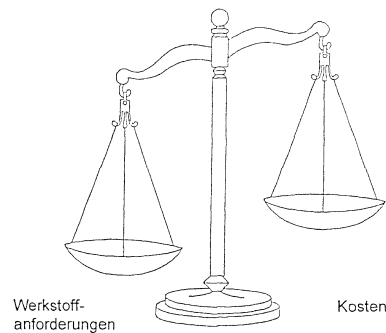


**Abbildung 2: Anordnung der äußeren Energiebänder**

-  Valenzband voll mit Elektronen besetzt
-  Leitungsband ohne Elektronen
-  Leitungsband teilweise mit Elektronen besetzt

### **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 Claire. 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.



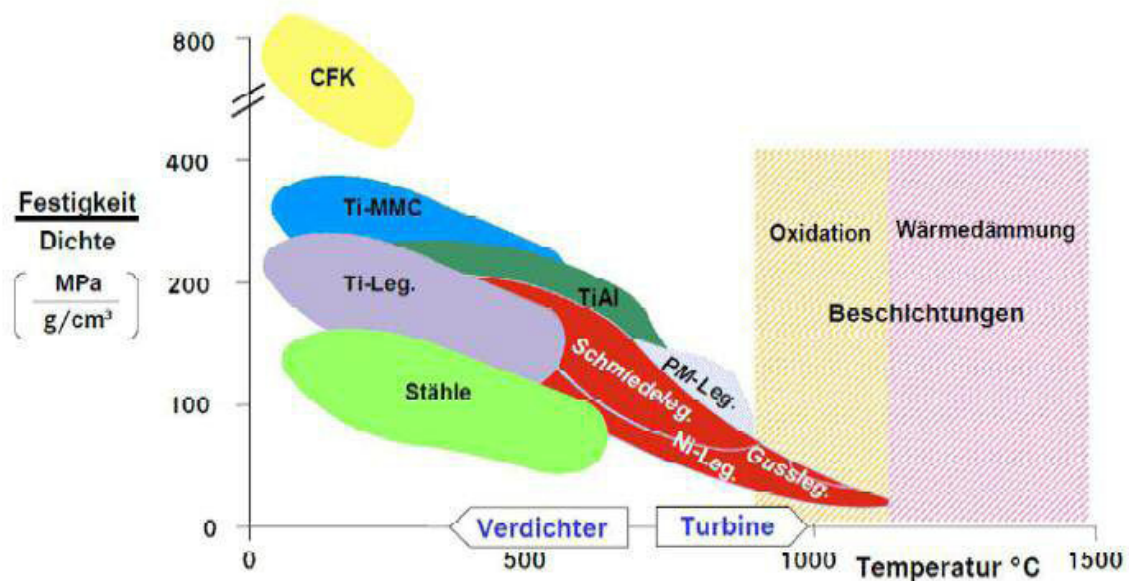


Abbildung 4: Werkstoffeinsatz im Triebwerk [2]

### 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.  $450^\circ\text{C}$
- 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 Niete 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 Niederdruckverdichterbereich, 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.

<b>Werkstoffbezeichnung</b>	<b>Anwendung, Besonderheiten</b>
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	Verdichterschaufeln und -scheiben (bis 450°C)

(Titan-Legierung)	
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 Vertretern 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

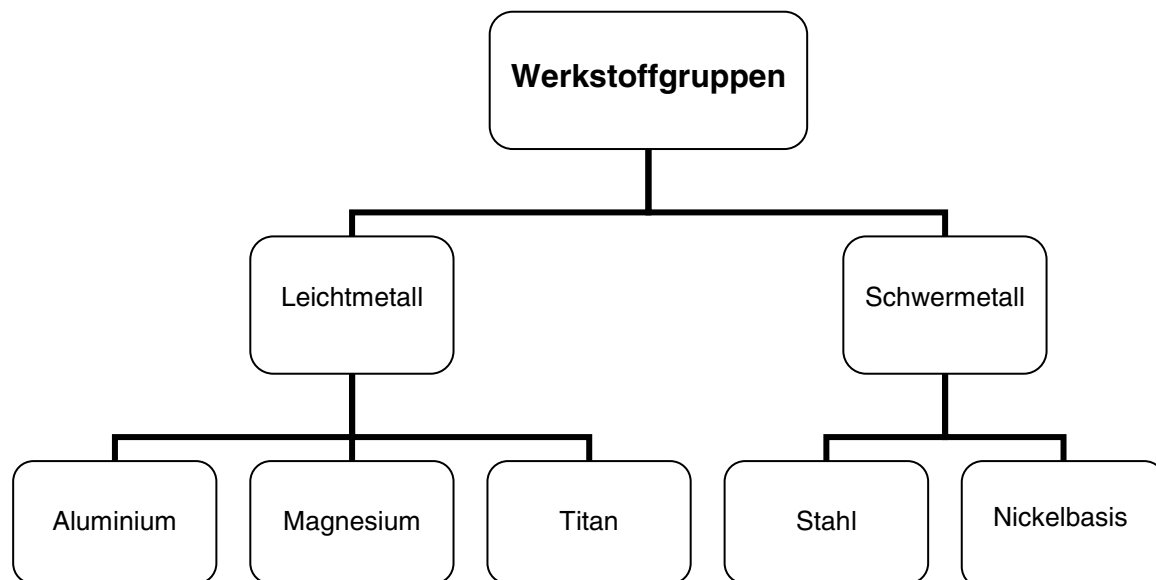
### 2.1. Gießen

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.

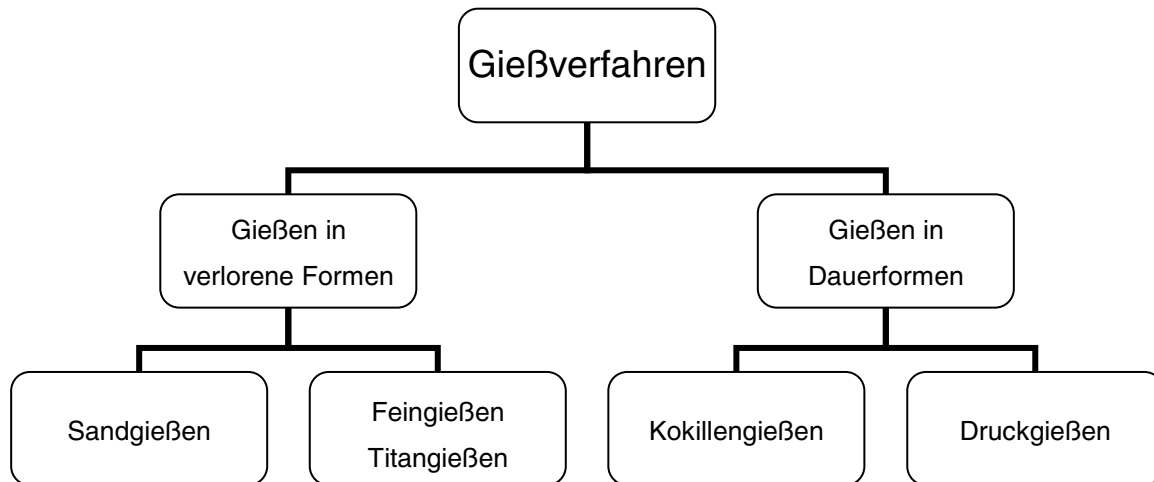
#### 2.1.1. Übersicht der Werkstoffgruppen

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



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



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 ( $\text{SiO}_2$ ), 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.

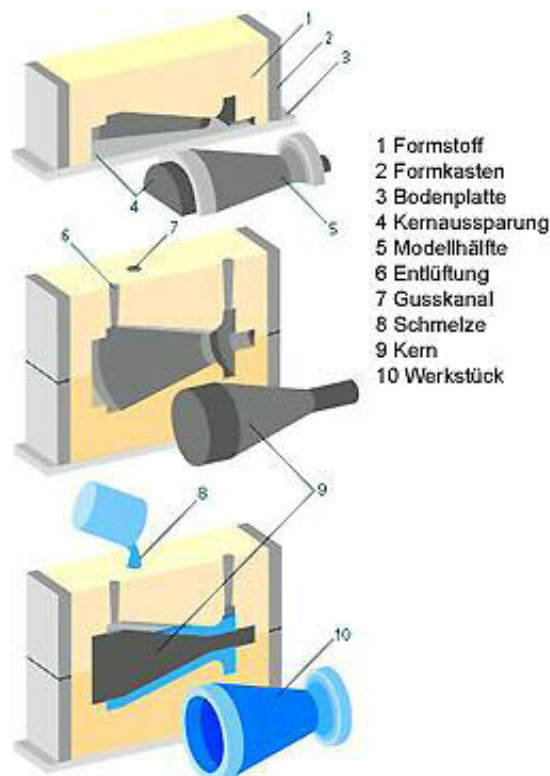
Wie auch bei den Formen gibt es bei den Modellen, Dauermodell und verlorene Modelle.

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 Formsandes hergestellt. Da Sandformen keine großen Kräfte aushalten, wird die Form allein durch die Schwerkraft mit der Schmelze aufgefüllt.



**Abbildung 5: 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
- Lunkerfrei

**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 Auswerfmakierungen. 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 Reperaturschweißung 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, Turbinenaustrittsgehäuse oder auch Ölhöhre 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 6: gegossene Laufschaufeln [2]**  
(CF6 Lauf 1 und 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](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 warmfesten 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 Gesenkhohlraum 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 wer-



den. 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 Faserichtung stattfindet. Überlappungen können auch durch schlechte Konstruktion des Gesenks entstehen.

#### Kernzerschmieden/ 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 Kernzerschmieden 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 7: Gehäuse [1]**



**Abbildung 8: Dichtring [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] 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 5-12µm. 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 Kühlagerung bei  $-18^{\circ}\text{C}$  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, dreidimensionale 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 wurden,



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 differentielle, 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 9: Sandwichstruktur in Differential- und Integralbauweise [1]



### **2.3.6. Fertigungsverfahren**

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 bei 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 auf druckärmere 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 Lamiant.

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 m<sup>2</sup>) Einzelbauteile bis zu einer Dicke von mehreren Zentimetern herstellbar. Diese Teile werden zu komplexe Strukturen, z.B. Tanks, Druckbehälter, Rumpfe 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.

### **2.3.7. 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 Waben an den Enden zur Krafteinleitung in einen Kunststoff eingegossen und auf Druck belastet. Versagen kann nicht durch Wabencrash sondern auch durch Knickung, Einknicken oder Beulen der Decklage erfolgen.

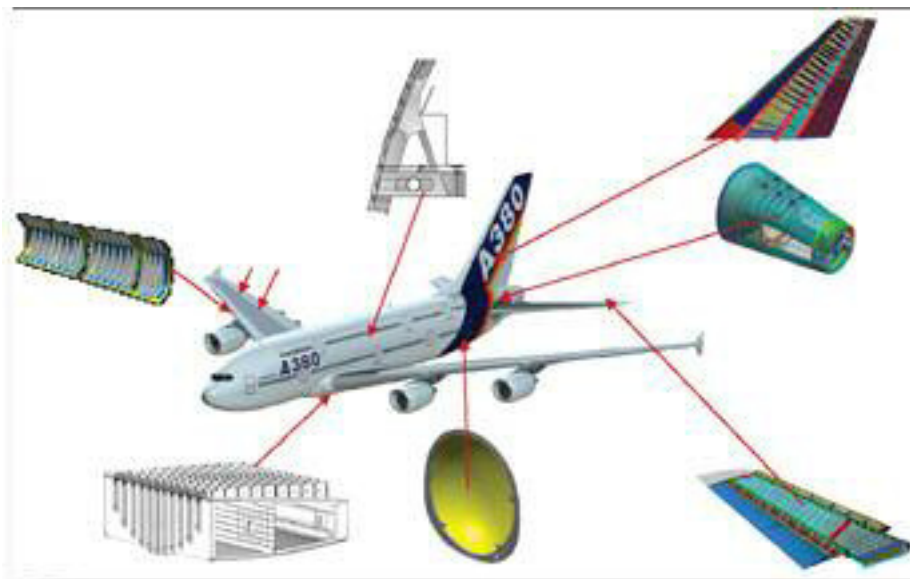
Auf geeignete Methoden zur Prüfung der Klebeverbindung von Faserverbundwerkstoffen wird detailliert in Kapitel 5.8 eingegangen.

### **2.3.8. Anwendungen in der Luftfahrt**

Der Anteil an Faserverbundteile 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 10 sind die einzelne Komponenten des A380 aufgezeigt, bei denen Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz kommen.



**Abbildung 10: Faserverbundbauteile am A380 [2]**

Bei Flugtriebwerken setzt vor allem die Firma General Electric Faserverbundwerkstoffe im FAN Modul ein (Abbildung 11). Bei dem GENx ist neben den Fan-Schaufeln auch das Fan-Gehäuse aus faserverstärkten Kunststoff (FVK).



**Abbildung 11: GE90 Fan-Schaufel,  
FVK-Schaufelblatt mit Ti-Vorderkante [3]**  
(seit 1996 im Flugbetrieb)

---

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>

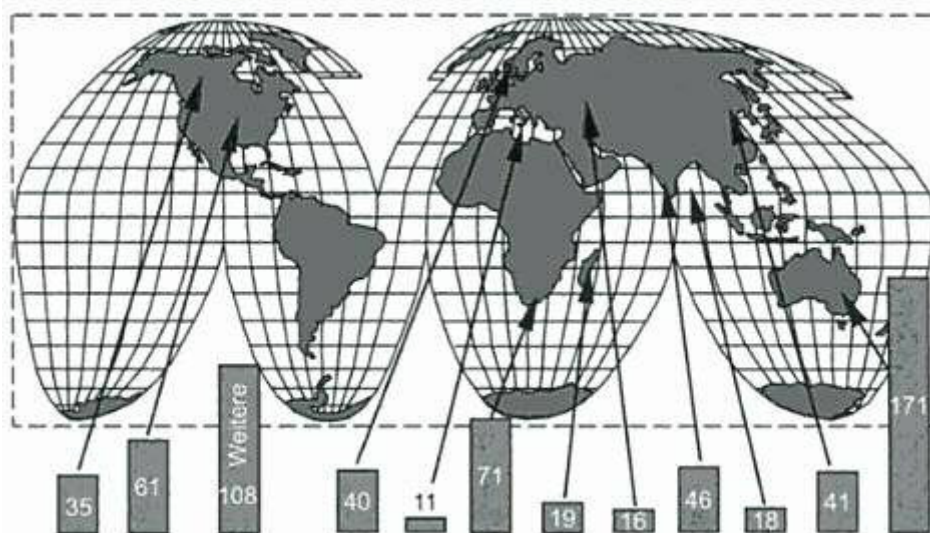
[3] MTU: Herr Siegfried Sikorski



## **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 12.



**Abbildung 12: Verteilung der globalen Vorkommen von  $\text{TiO}_2$  [1]**  
(in Mt, Zahlen von 1999)

Bereits im Jahre 1825 stellte J. J. Berzelius durch Reduktion von  $\text{TiO}_2$  mit Na unreines, metallisches Titan her. Erst 1910 reduziert der Amerikaner M. A. Hunter  $\text{TiCl}_4$  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.

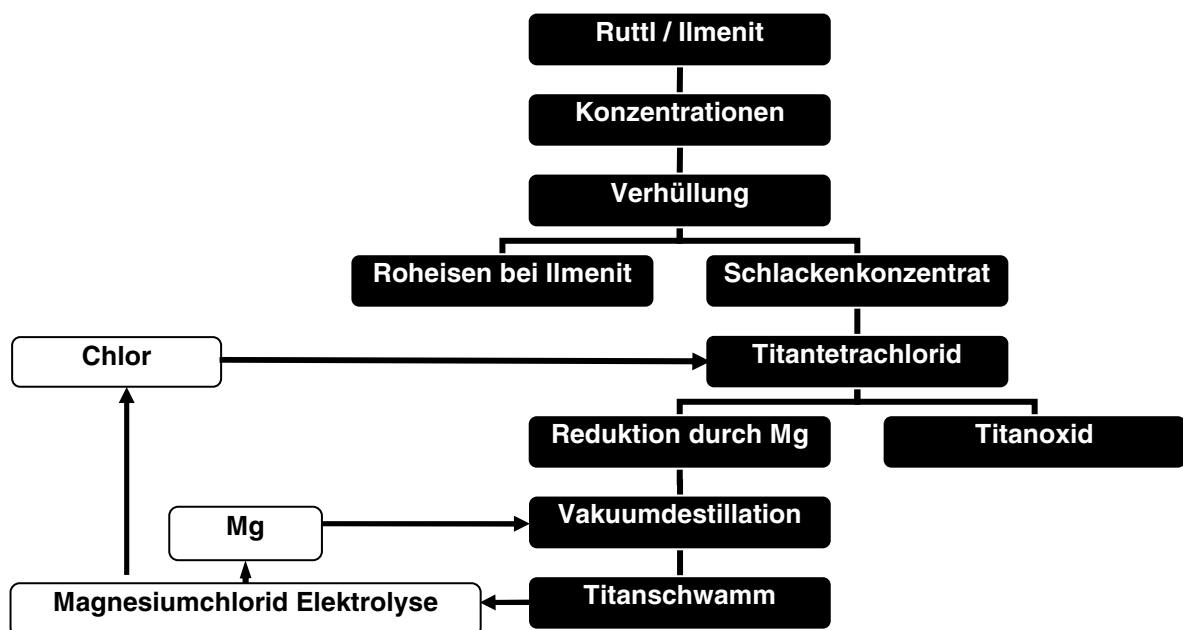
Der Herstellungsprozess vom Titanerz zum Titanbillet wird nachfolgend beschrieben.

## 2.4.2. Herstellung von Titanschwamm

Als Ausgangsmaterial dient das in der Natur vorkommende Rutil ( $\text{TiO}_2$ ) und Ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ).

Zu Beginn ist eine Vorreinigung des Ilmenit nötig, dabei wird das Eisen vom preiswerten Ilmenit getrennt. Die entstehende Titanschlacke wird angereichert, so dass diese eine vergleichbare Konzentration mit dem Rutil ( $\text{TiO}_2$ ) 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 13 ist der durchzuführende Reduktionsablauf (erweiterter „Kroll-Prozess“) für Ilmenit und Rutil dargestellt.



**Abbildung 13: erweiterter Kroll-Prozess zur Herstellung von Titanschwamm**

Bei diesem Prozess wird  $\text{TiO}_2$  in mehreren Schritten zu  $\text{TiCl}_4$  umgewandelt. Die Endreduktion erfolgt mit Magnesium. Die dabei verbleibenden Rückstände von Mg und  $\text{MgCl}_2$  werden durch Vakuumdestillation aus dem  $\text{TiCl}_4$  herausgelöst. Als Endprodukt bleibt der sogenannte Titanschwamm, dessen Reinheit von der Menge an Verunrei-



nigungen (z. B. Mg) bestimmt wird. Die Zunahme des Anteils an Verunreinigungen hat den Anstieg der Brinellhärte von  $\text{TiCl}_4$  zur Folge.

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



**Abbildung 14: Titanschwammkuchen [2]**



**Abbildung 15: zerkleinerter Titanschwamm [3]**

Titanschwamm stellt die Ausgangsbasis für die Herstellung jeglicher Halbzeugfabrikate auf Titanbasis dar, aber auch zur Auflegierung 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.

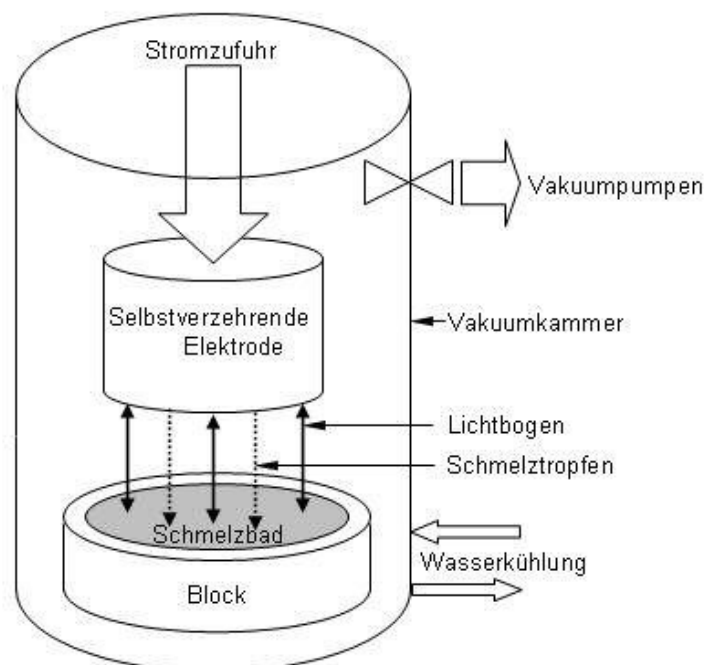
Bei den Schmelzverfahren ist zwischen dem Vakuumlichtbogenofen (VAR), dem „Cold-Hearth-Melters“-Verfahren und dem „Skull-Melters“-Verfahren zu unterscheiden.

### 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  $\text{TiO}_2$  verbindet.

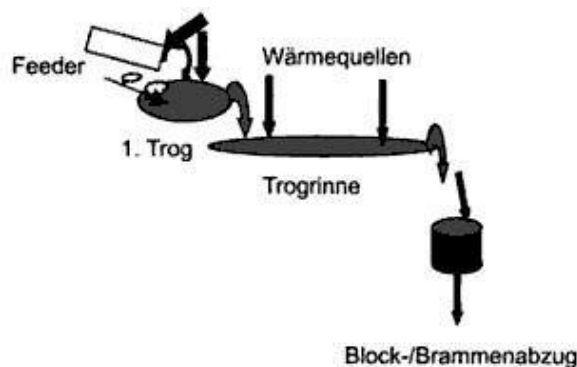
Im klassischen Fall wird die entstandene Elektrode im Vakuumlichtbogenofen mindestens zweimal umgeschmolzen. Zwischen der Elektrode und dem mit Zündspänen versehenen wassergekühlten Tiegelboden wird ein Lichtbogen gezündet. Aufgrund dieser Wärmeenergie schmilzt die Elektrode tropfenförmig ab. Das Schmelzbad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



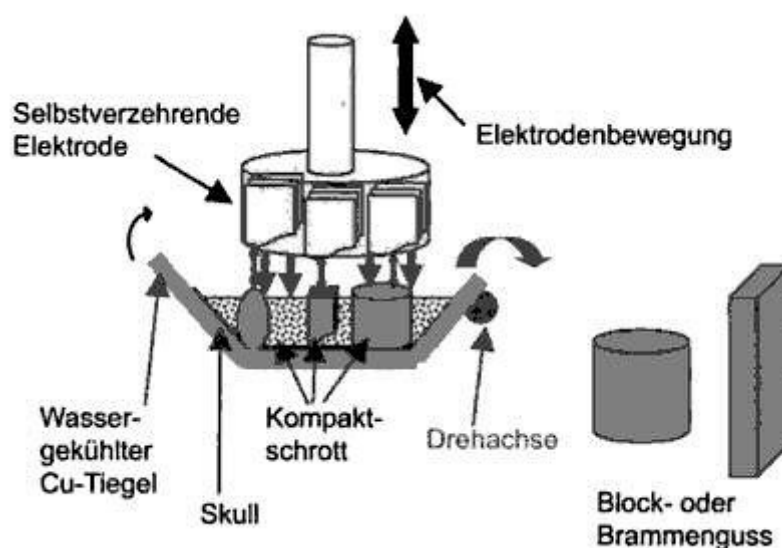
**Abbildung 16: Prinzipskizze eines Vakuumlichtbogenofens**

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 wird bei dem „Cold-Hearth-Melters“-Prinzip Elektronenstrahl- bzw. Plasmakanonen eingesetzt. Die klassische Lichtbogentechnologie kommt beim „Skull-Melters“-Verfahren zum Einsatz.



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

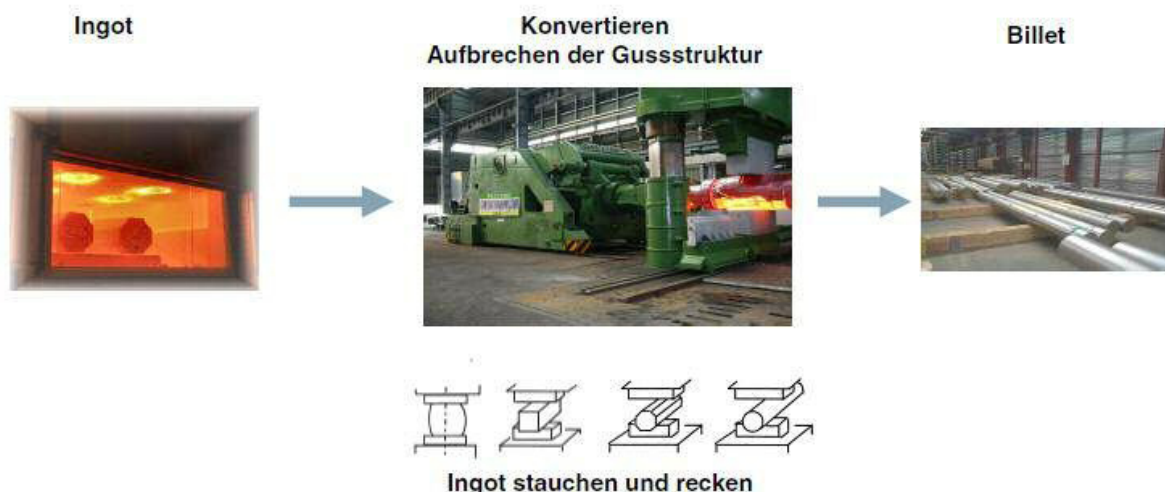


**Abbildung 18: Prinzipskizze eines "Skull-Melters"-Prozesses [5]**

#### 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  $\beta$ -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  $\alpha/\beta$ -Umformschritt eingestellt werden.

Diese thermomechanische Behandlung im Vormaterialwerk beeinflusst wesentlich die späteren Eigenschaften.



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

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 finden 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 Niederdruckturbine. Zur Herstellung dieser TiAl-Schaukeln werden Billets als Rohmaterial verwendet.

Die MTU Aero Engines plant zukünftig an die Titanbillets Herstellung einen Schmiedeprozess anzuschließen und diese Teile anschließend weiterzubearbeiten. Hiermit wird das obengenannte Ziel verfolgt, Nickelschaufeln durch TiAl-Schaukeln 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**

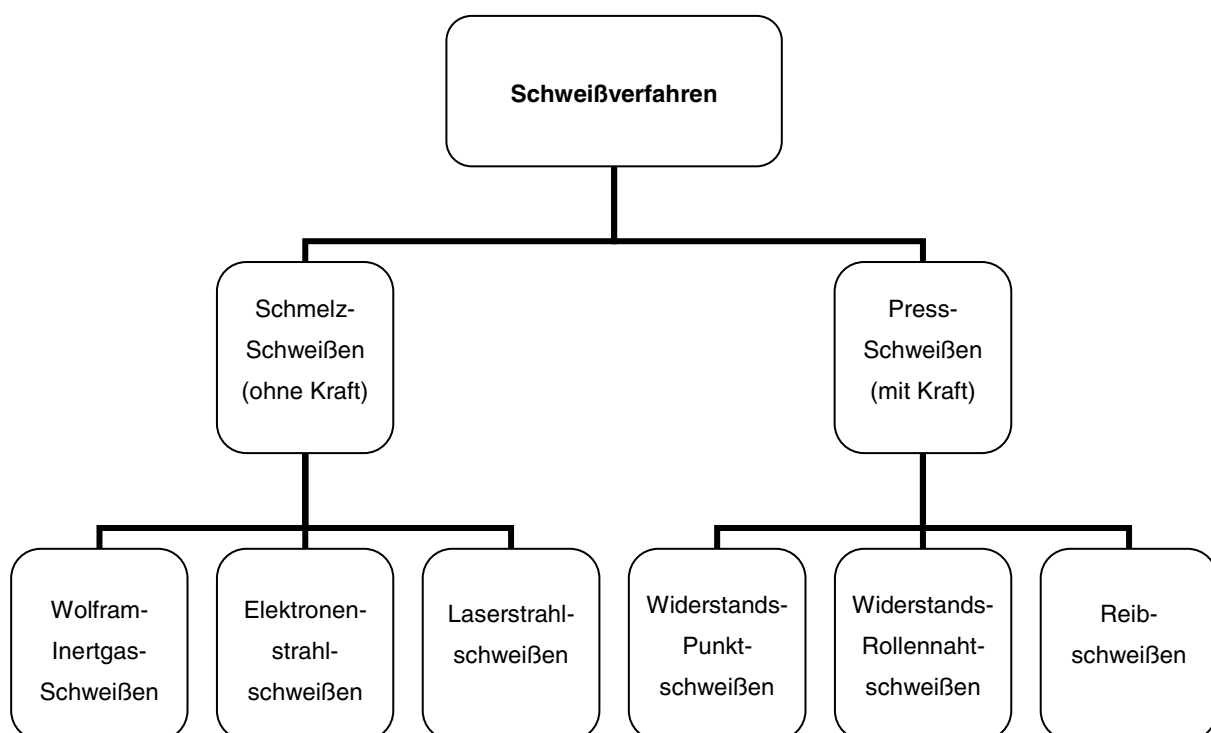
### **2.5.1. Grundlagen**

Gemäß DIN-Norm 1910 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 Erkalting 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.

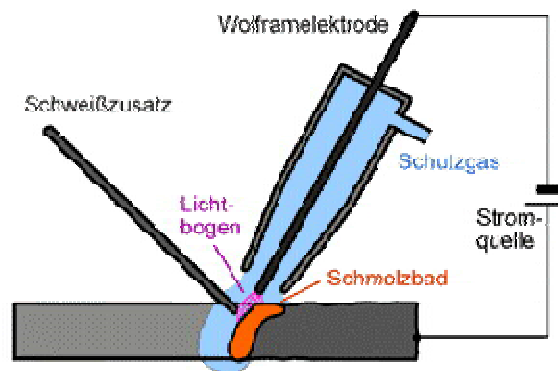
### **2.5.2. Schweißverfahren**

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



### 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.



[© Thomas Seilnacht]

**Abbildung 20: WIG-Schweißen [1]**

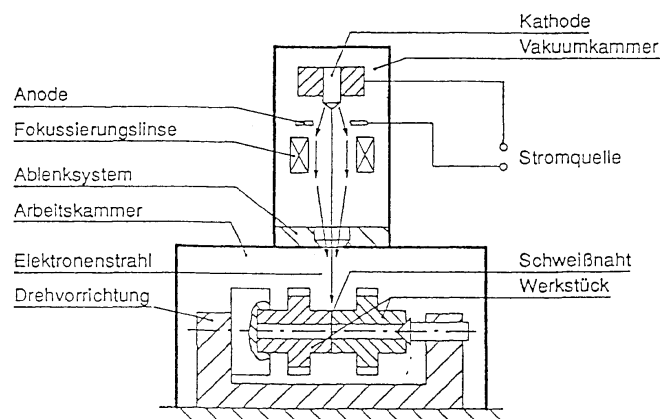
Verfahrensmerkmale:

- 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 würde, minimiert.



**Abbildung 21: Elektronenstrahlschweißen**

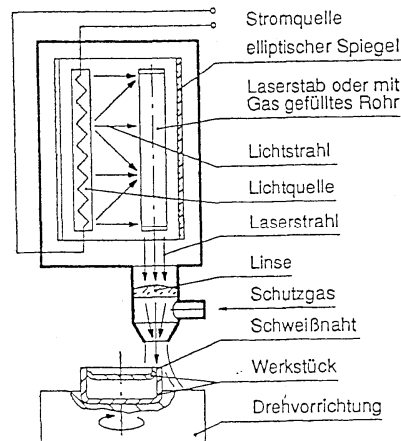
Verfahrensmerkmale:

- 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.



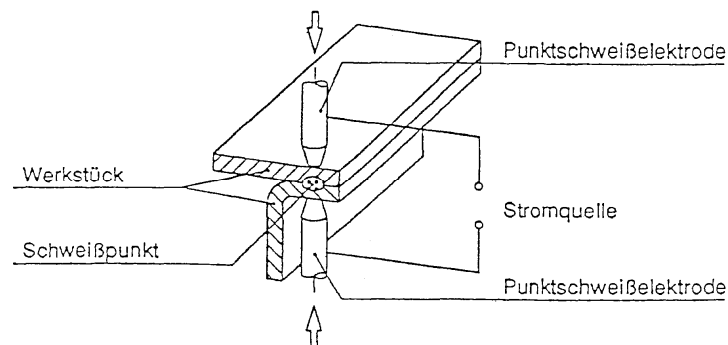
**Abbildung 22: Laserstrahlschweißen**

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.



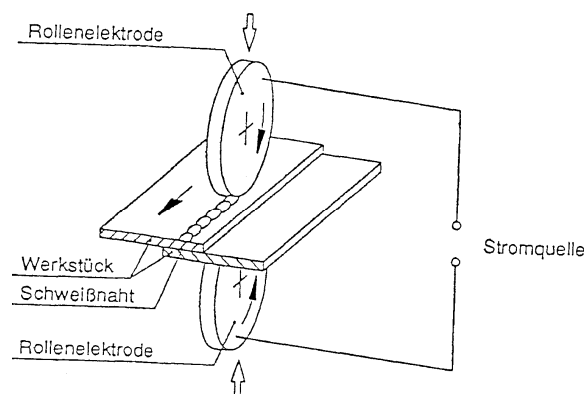
**Abbildung 23: Widerstands-Punktschweißen**

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 werden 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.



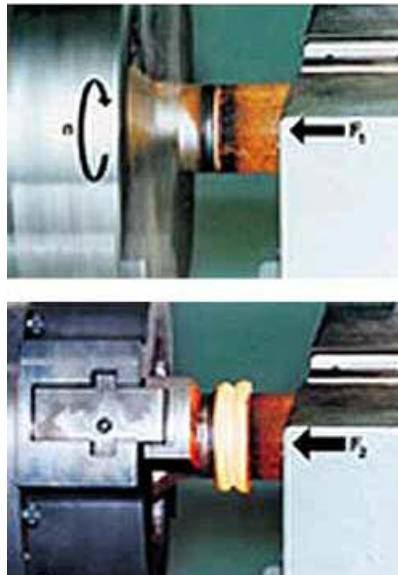
**Abbildung 24: Widerstands-Rollnahtschweißen**

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 plastisch Zustand. Daraufhin wird das drehende Bauteil gestoppt und beide Bauteile gegeneinander gedrückt.



**Abbildung 25: 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 Schweißbeignung 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 Schrumpfsreaktionen diese 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 26 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 26: Verdichter-Läufer [3]**  
(CF6 Stufe 3-9)

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.

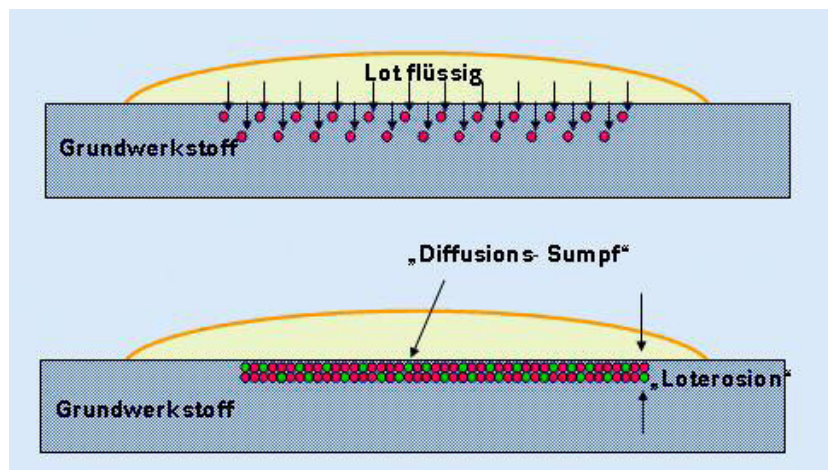


Abbildung 27: Diffusionsvorgang während des Lötens [1]

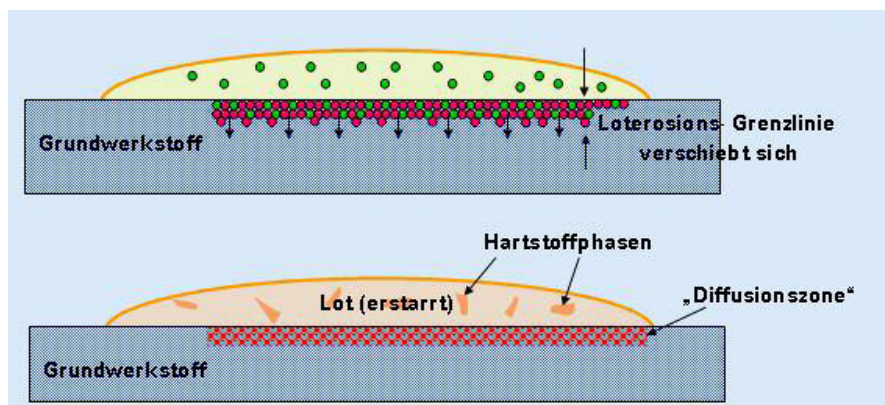
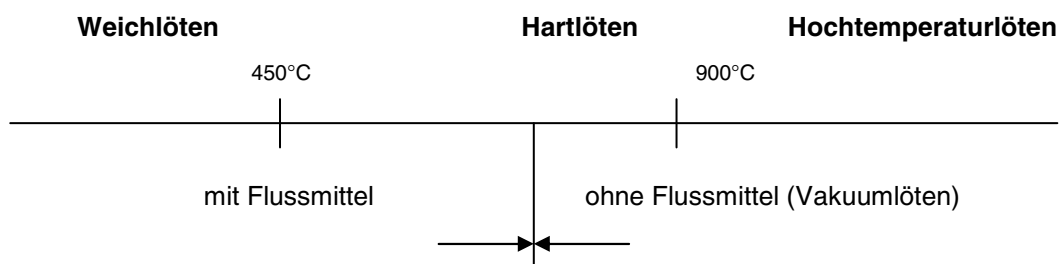


Abbildung 28: [2]

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.

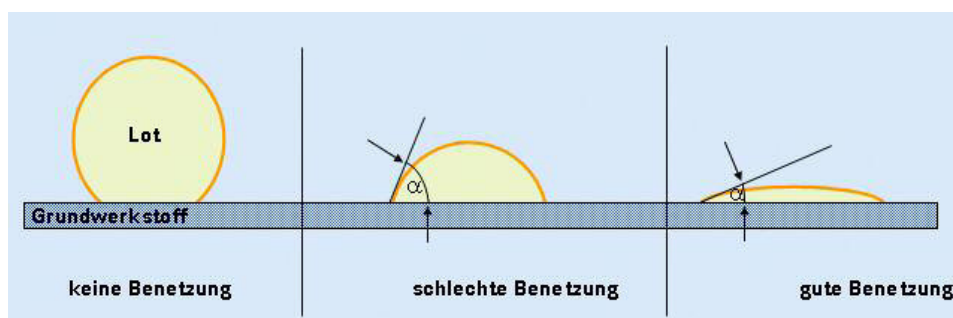


**Abbildung 29: Solidustemperaturen beim Löten**

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 setzt 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 30: 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. Heftsweißpunkte 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 erforderli-

che 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 der 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, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>)
- Schutzgas: Verwendung von Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 900 °C liegen und die, 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 Schliff-Lichtmikroskopie ihren Einsatz. Röntgen, Risseindringprüfung, Ultraschall oder Thermographie dienen der zerstörungsfreien Überprüfung der Lötverbindung.

#### **2.6.4. Vor- und Nachteile des Lötens**

Vorteile:

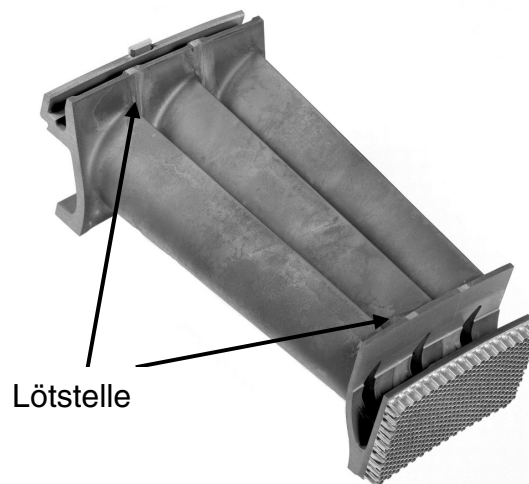
- Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe, beispielsweise auch nichtmetallischer Werkstoffe
- große Fügeflächen realisierbar (mit Lotfolien)
- geringer Verzug und geringe Gefügeänderung des Bauteils durch moderate und homogene Wärmeeinbringung
- gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit der Lötnaht

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 Löten (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 Laufschaukel der Stufen 1 bis 4 gelötet. Dieses Fügeverfahren findet des weiteren Einsatz beim Verbinden der Waben am Innendeckband von Leitschaufelsegmenten (Abbildung 31), sowie beim Zusammenfügen von diverse Leitungen.



**Abbildung 31: 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 Löten MTU Polska 2010.ppt, 24.08.2010

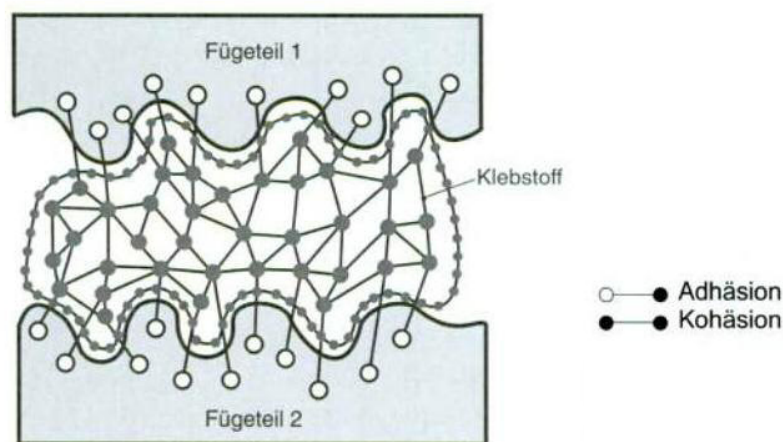
[1], [2], [3], [4]: Dr. U. Knott: Schulung Löten MTU Polska 2010.ppt, 24.08.2010



## **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 32: 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 den Fügepart und Kleber statt finden.

### **2.7.4. Prüfung der Fügeverbindung**

Zu den gängigsten zerstörenden Prüfverfahren zählt der Zug- und Scherversuch, wie 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:

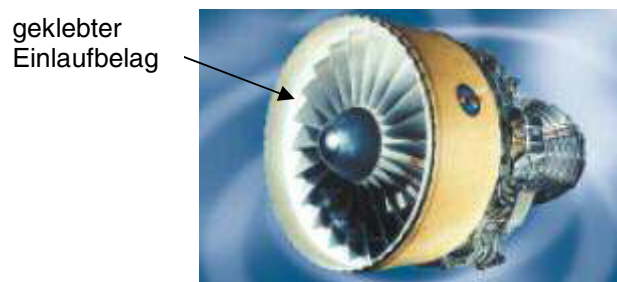
- Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe
- keine Gefügeänderung
- dichte Verbindungen
- Schwingungsdämpfung
- Verbindung von hitze- bzw. wärmeempfindlichen Bauteilen

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 33: 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 unlösbar und überwiegend formschlüssige Verbindung entsteht.

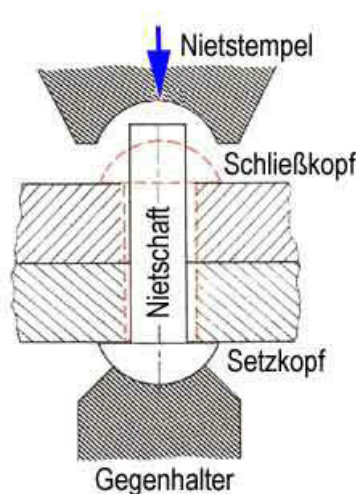
Im Gegensatz zur Nietverbindung handelt es sich bei Schrauben um eine lösbare Verbindung.

### **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, so dass dessen Nietschaft über das Bauteil hinaus steht. Mit Hilfe des Nietstempels wird dieser Nietschaft zu einem Schließkopf geformt und es entsteht eine unlösbar 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 34: Funktionsprinzip Nieten [1]**

### 2.8.3. Nietarten

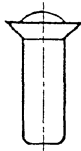
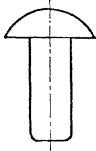
Im Flugzeugbau werden unterschiedliche Arten von Nieten verwendet. Zu ihnen gehören:

- 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:

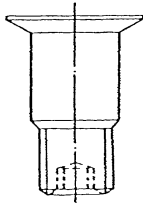
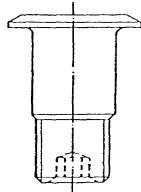
100° Senkkopf	Universalkopf
	
Anwendungsgebiet: Flächen mit aerodynamischen bzw. geometrischen Bündigkeitsanforderungen	Anwendungsgebiet: Heckbereich des Rumpfes, Innenstruktur

Mit Aluminium-Vollnieten werden Aluminiumbleche und -bauteile mit geringer Gesamtbauteildicke genietet. Diese Nieten werden bei Temperaturen bis 80°C eingesetzt. Das Setzen einer Vollniet erfolgt überwiegend mit Hilfe der Nietquetsche, d.h. der Kraftschluss wird durch Quetschen des Nietenchaftes 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, höherfeste Verbindungselement im Flugzeug.

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

100° Senkkopf	Universalkopf
	
Anwendungsgebiet: Flächen mit aerodynamischen bzw. geometrischen Bündigkeitsanforderungen	Anwendungsgebiet: Innenstruktur

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

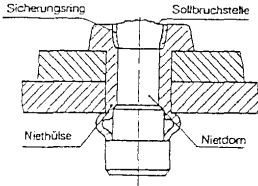
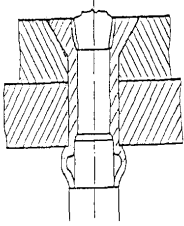
Diese Nietart wird überwiegend für das Herstellen von geschlossenen nicht zugänglichen Strukturen wie z.B. Steuer- und Auftriebshilfen am Flügel verwendet. Der Blindniet ist eine spezielle Form von Niet, welche nur den Zugang zu einer Seite der zu verbindenden Teile erfordert.

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

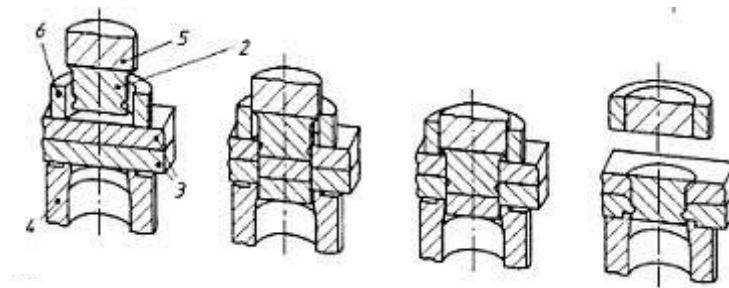
Stanznieten haben gegenüber Voll-, Pass- und Blindnieten den Vorteil, dass das Vorlochen entfällt.

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.

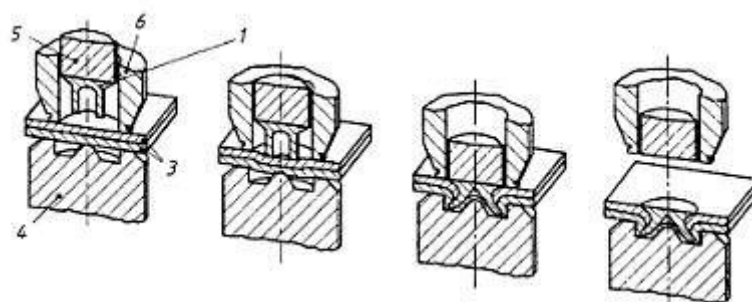
Es ist zwischen Stanznieten mit Vollniet und Stanznieten mit Halbholniet zu unterscheiden.

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



**Abbildung 35: Stanzniet mit Vollniet [2]**  
 (2 Vollniet mit Ringnut, 3 Fügeteil, 4 Matrize, 5 Nietstempel, 6 Niederhalter)

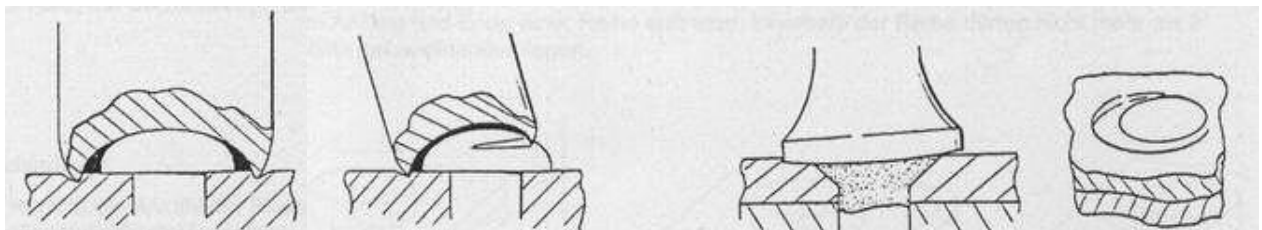
Beim *Stanzniet mit Halbhohniet* wirkt der Niet anfangs als Schneidstempel und bildet anschließend durch plastische Verformung mit dem matrizen seitigen Blech den Schließkopf aus. Somit entsteht ein matrizen seitig geschlossenes Nitelement, das den Stanzbutzen des oberen Bleches einschließt. Das Blech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



**Abbildung 36: Stanzniet mit Halbhohniet [3]**  
 (1 Halbhohniet, 3 Fügeteil, 4 Matrize, 5 Nietstempel, 6 Niederhalter)

#### **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 37: 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 Superairbus 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 Fügeteile 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.

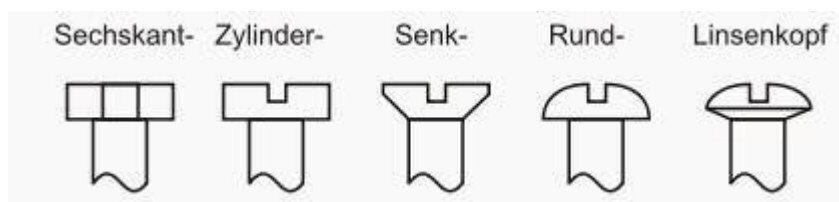
### Gewindestifte

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

### Schaftschrauben

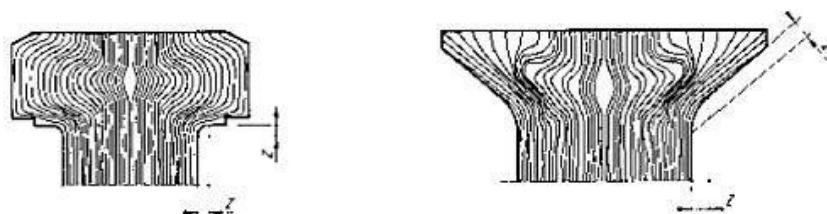
Kopfschrauben mit Teilgewinde, wobei der Bolzendurchmesser gleich Kerndurchmesser ist.

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



**Abbildung 38: genormte Schraubenkopfformen [5]**

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



**Abbildung 39: 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 Nutmutter 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 Schraubenverbindung 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 vorgegebenen Anzugsmoment die Größe der Spannkraft.

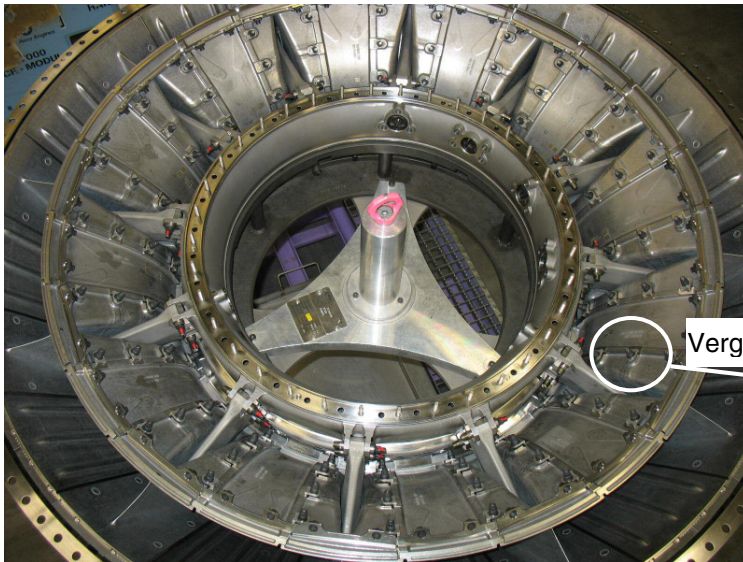
Schraubverbindungen werden i. d. R. auf Dauerschwingfestigkeit geprüft. Das ermittelte Prüfergebnis wird mit den bestehenden, genormten Werkstoffkennwerten des verwendeten Schraubenwerkstoffes verglichen. Bei Unterschreitung der Normwerte der Schraube, muss eine Neuauslegung bzw. Berechnung der Schraubverbindung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

### **2.8.9. Schraubanwendungen im Triebwerksbau**

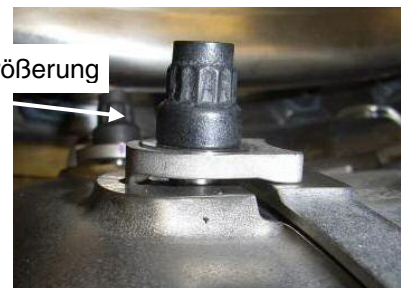
Je nach Anwendungsbereich, Art der mechanischen Beanspruchung und Korrosionsschutzanforderungen kommen Schrauben aus verschiedenen Materialien zum Einsatz. Meist werden in der Luftfahrt Schrauben aus rostfreiem Stahl oder Titanlegierungen (z.B. Ti6Al4V) oder Inconel verwendet.

Das Turbinenzwischengehäuse des GP7000 Triebwerks und der GENx besteht aus 12 Fairings. Diese werden mit Hilfe einer Schraube-Mutter Verbindung (Abbildung 40

und 41) zusammen gefügt und bilden somit den TCF (Turbine Center Frame), welcher sich zwischen der Hoch- und Niederdruckturbine befindet



**Abbildung 40: montierter TCF [7]**



**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 [1]**

### **3.1.2. Grundlagen**

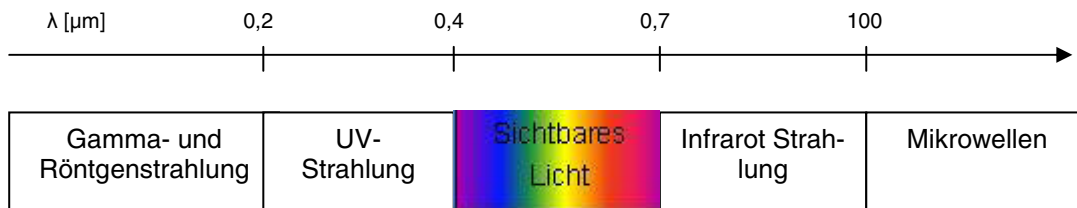
Die Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren, das mit Hilfe einer IR-Kamera das für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotlicht eines Objektes oder Körpers sichtbar macht. Mit Hilfe der Thermografie lassen sich Temperaturverteilungen flächenförmig erfassen und bildhaft darstellen. In der Anfangszeit 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.





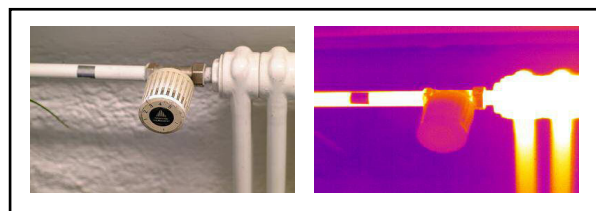
**Abbildung 43: Elektromagnetisches Spektrum**

### Emissions-Koeffizient

Der Emissions-Koeffizient  $\varepsilon$  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.

Dies soll an folgendem Beispiel näher erläutert werden. Zu sehen ist in Abbildung 44 ein Teilbereich eines warmen Heizkörpers mit Zuleitung und Thermostat. Die rechte Abbildung zeigt die gleiche Szene als Thermogramm (Wärmebild). In



**Abbildung 44: Bild warmer Heizkörper – Thermogramm [3]**

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 Emissionskoeffizient 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“.

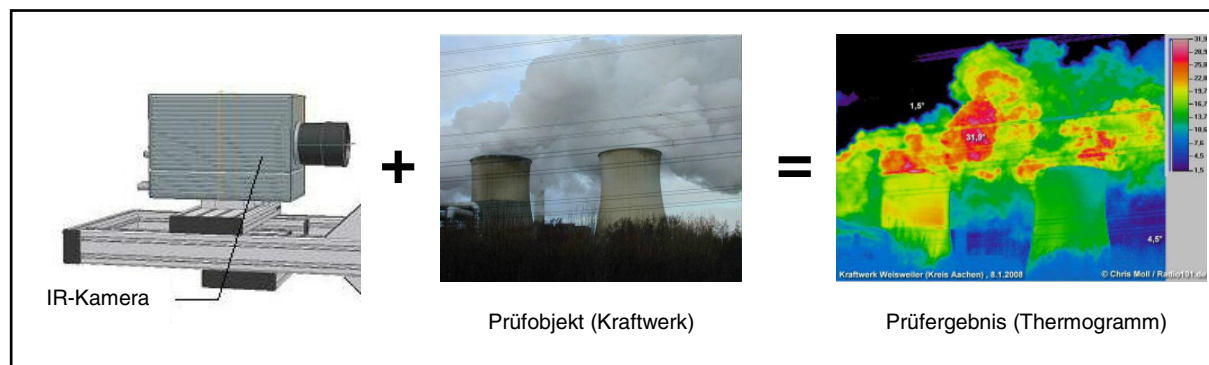
Es ist also besonders wichtig, dass der Thermograf Kenntnis über die verschiedenen Emissionskoeffizienten hat. Ist dies nicht der Fall, so führt dies zu Fehlinterpretationen.

### 3.1.3. Passive und aktive Thermografie

#### Passive Thermografie

Mit einer Thermografie-kamera, 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 passiver oder Abkühlungs-Thermografie gesprochen. Es wird die Strahlung aufgenommen, die das Bauteil aufgrund seiner Eigenwärme emittiert.

Abbildung 45 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 45: Messanordnung einer passiven Thermografie [4]**

#### 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 46 zeigt schematisch das Prüfsetup der Impuls-Thermografie, sowie das erzielte Prüfergebn. 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 46) ist ein Materialfehler (rötliche Färbung) im Prüfobjekt zu erkennen.

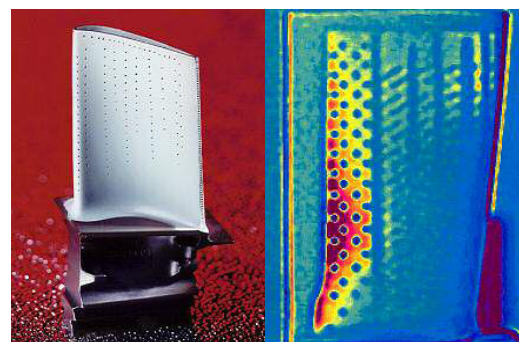


**Abbildung 46: Messanordnung einer aktiven Thermografie [5]**

### 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.



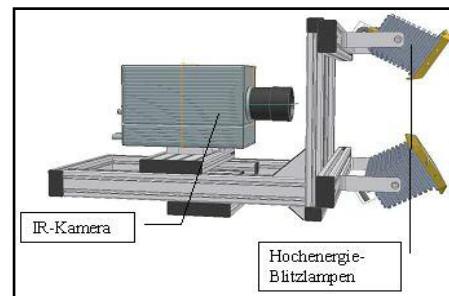
**Abbildung 47:**  
links- hohlgegossene Turbinenschaufel  
rechts- qualitatives Wanddickenbild [6]

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.

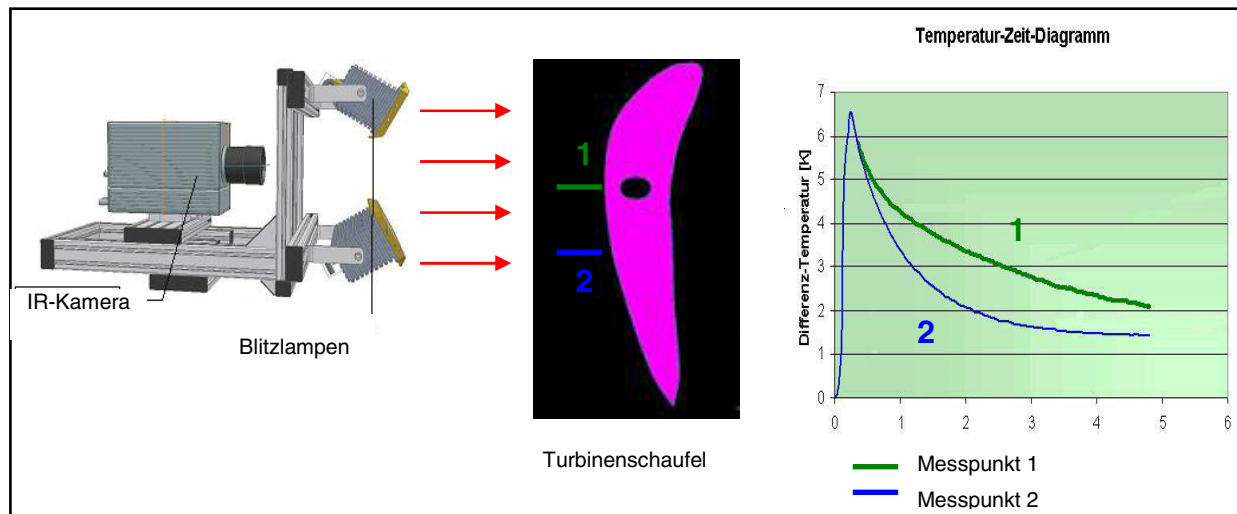
Die Impuls-Thermografie wird in der MTU Aero Engines, unter anderem, zur Detektion von Ablösungen bei Schichtsystemen (z.B. Keramikschichten auf Leitschaufeln) eingesetzt.

Abbildung 48 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.



**Abbildung 48: Thermografie Prüfsystem [7]**

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 49: Temperatur- Zeitverlauf bei einer Impulsthermografie [8]**

Abbildung 49 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 Konvexe Seite (Saugseite) der Turbinenschaufel. Dabei wird die Energie von der Bauteiloberfläche absorbiert. Die Oberfläche erwärmt sich impulsartig, was im Temperatur-Zeit-Diagramm von Abbildung 49 als sprunghafter Anstieg zu sehen ist. Die Wärme (Energie) fließt nun in das Bauteil hinein.

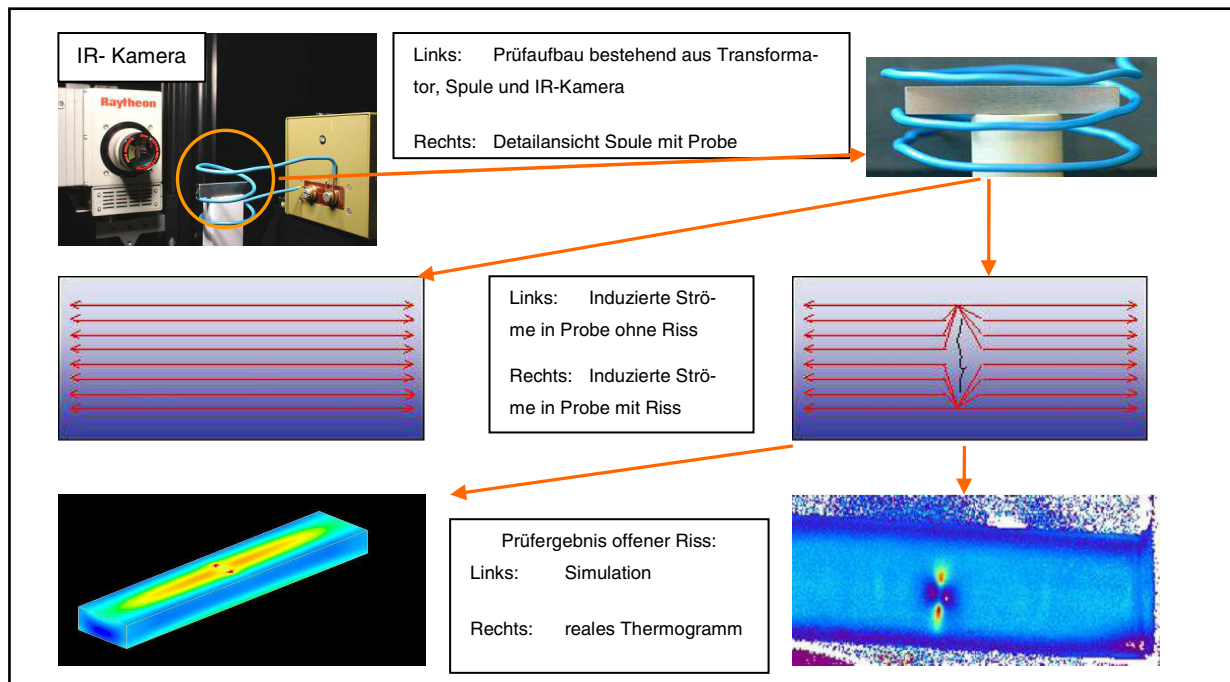
Im folgenden werden die zwei verschiedenen Fälle – Bereich mit Fehler und Bereich ohne Fehler- betrachtet.

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 können.



**Abbildung 50: Thermografie Prüfsystem [9]**

Abbildung 50 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.

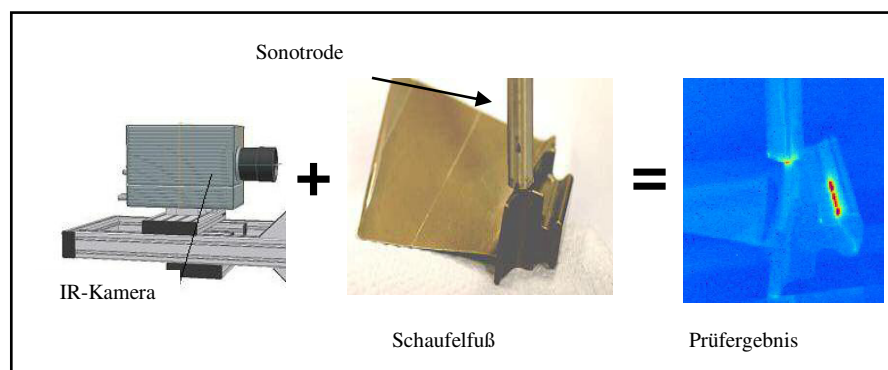
Zusätzlich werden von dem Testkörper mit Riss eine Simulation und ein reales Thermogramm gezeigt. Typische Merkmale sind hier die Bereiche höherer Stromdichte, die an den Rissspitzen entstehen. Durch die hohe Stromdichte erwärmt sich das Bauteil lokal an den Rissspitzen mehr. Diese erwärmten Bereiche 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, so dass vorhandene Rissflanken aneinander reiben und sich erwärmen. Diese Wärme wird von einer Infrarotkamera detektiert.



**Abbildung 51: Messanordnung einer Ultraschallthermografie [10]**

Abbildung 51 zeigt eine Sono-Therm Prüfianordnung eines Turbinenschaufelfußes, sowie das erzielte Prüfergebn. 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 Abfallprodukte
- Anwendung des Verfahrens ist kostengünstig
- Prüfverfahren ist „mobil“ einsetzbar

#### Nachteile

- teils einschränkende Sicherheitsvorkehrungen nötig, wie Schutz vor Verblitzungen
- bei Bedarf Änderung des Emissionskoeffizienten, z.B. müssen glänzende Oberflächen geschwärzt werden
- „geringe“ Tiefenreichweite, nur oberflächennahe (wenige mm) Fehler werden gefunden

---

#### Quellenangaben:

[http://www.dsi.uni-stuttgart.de/bildungsprogramm/ir-strahlung/was\\_ist\\_ir.html](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](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>

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

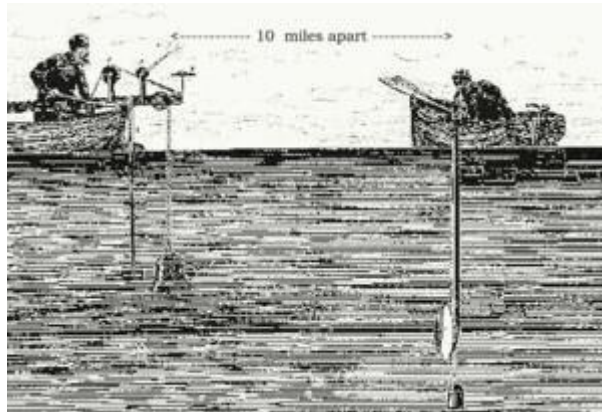
[3], [5], [6], [7], [8], [9], [10] MTU: Thermografie.doc – Problemorientierte Triebwerkstechnik, Teil 2 „Neue ZfP-Verfahren“ Thermografie, TEF



## **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 die-



**Abbildung 52: Messung der Schallgeschwindigkeit [1]**

ser 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.

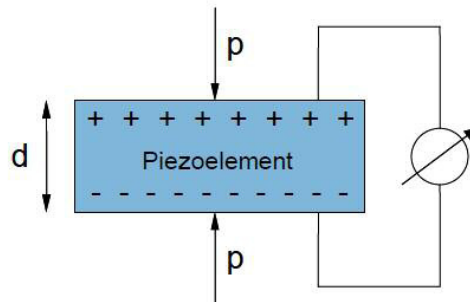
### **3.2.2. Grundlagen**

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



### Piezoeffekt

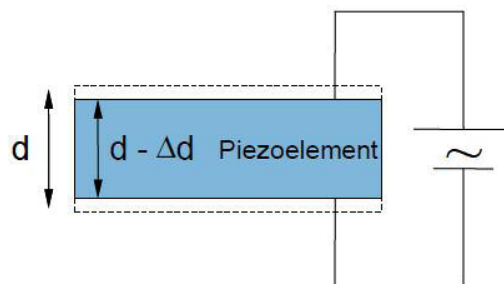
Durch Verformung eines Piezo-Materials, wie beispielsweise Quarz, entstehen Dipole in den Elementarzellen, wodurch Spannung erzeugt wird.



**Abbildung 53: 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. Das Empfangen der Ultraschallwellen mit dem Piezo-Effekt.



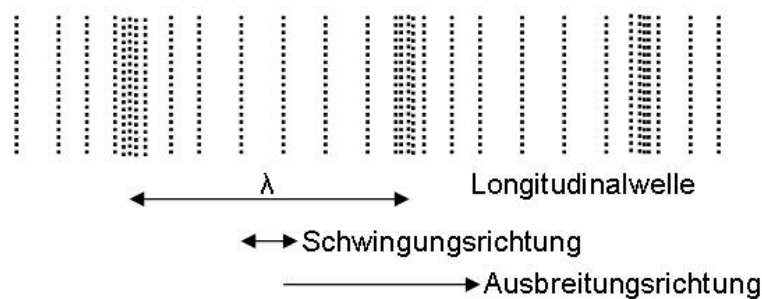
**Abbildung 54: Reziproker Piezoeffekt**

## Ultraschallwellen

Es gibt verschiedene Wellenarten:

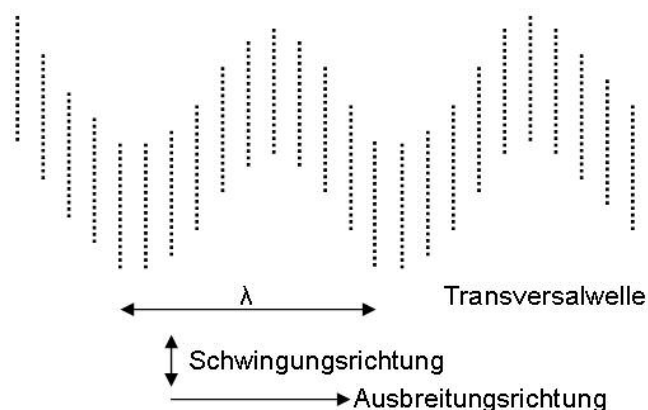
- Longitudinalwellen
- Transversalwellen
- Oberflächenwellen
- Plattenwellen

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



**Abbildung 55: Longitudinalwelle**

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



**Abbildung 56: Transversalwelle**

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  $\lambda$ .

Für die Wellenlänge  $\lambda$  gilt:

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

$\lambda$  = Wellenlänge [m]

$c$  = Schallgeschwindigkeit [m/s]

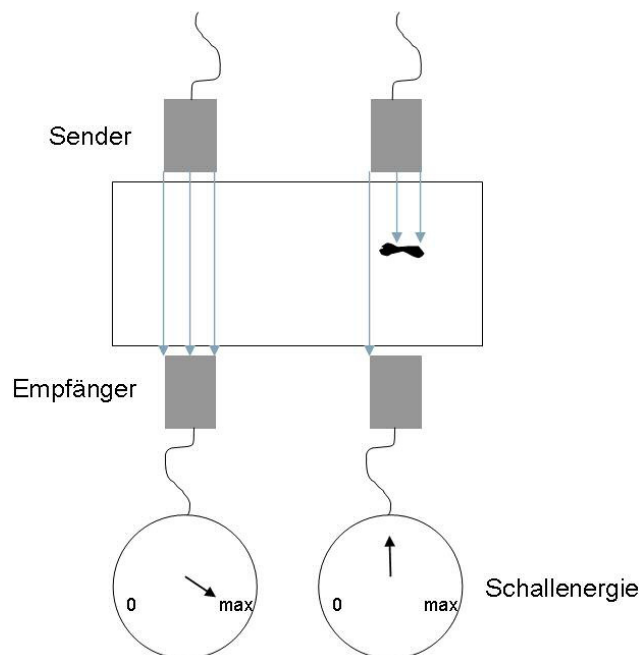
$f$  = Frequenz [Hz]

### **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 Ungänge bestimmen, die genaue Tiefe und Winkel allerdings schwer.

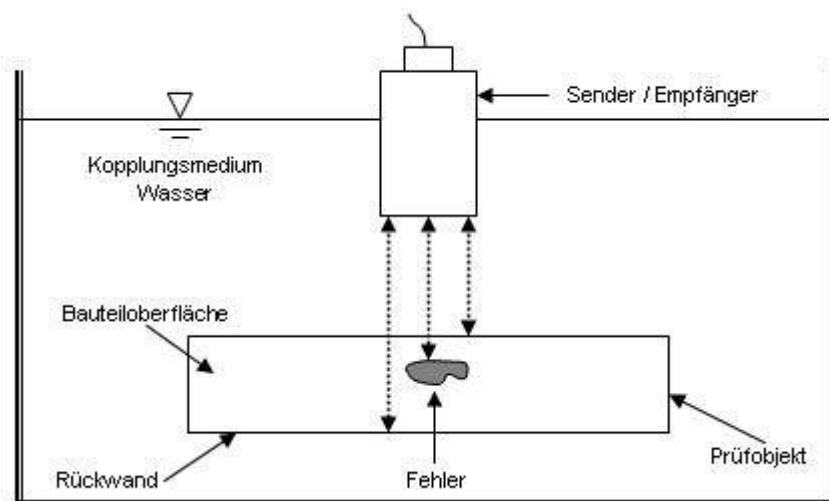
Dieses Verfahren kommt allerdings nur selten zum Einsatz.



**Abbildung 57: Durchschalltechnik**

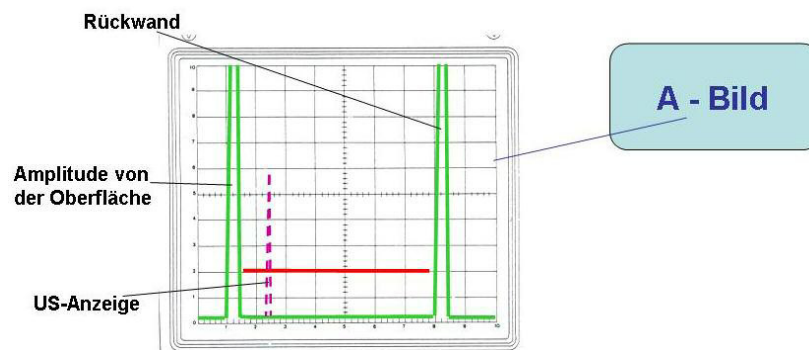
### Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren

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 58: 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.

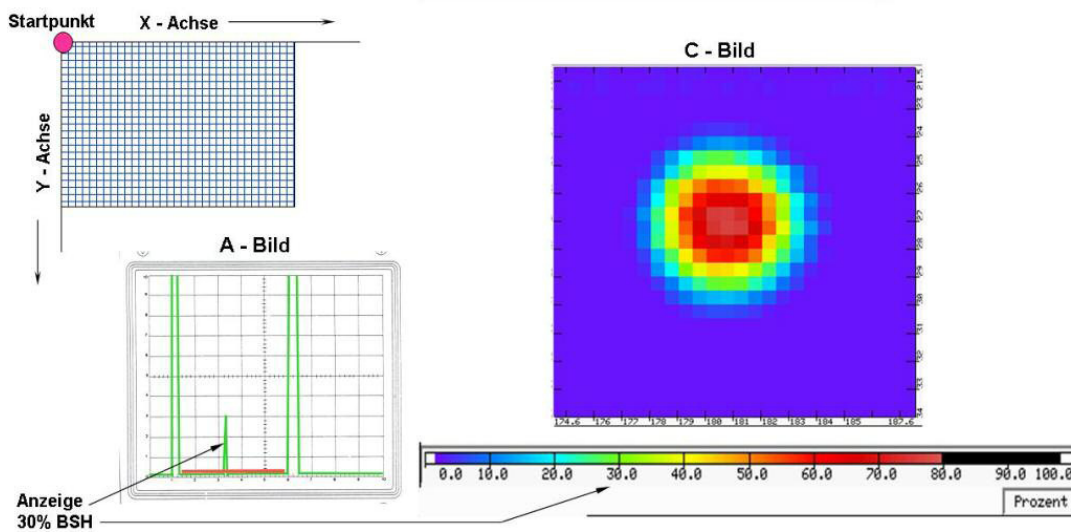


**Abbildung 59: A-Bild [2]**

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

Aus dem A-Bild kann die Laufzeit des Echosignals gelesen 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 60: Ableitung eines C-Bildes [3]**

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

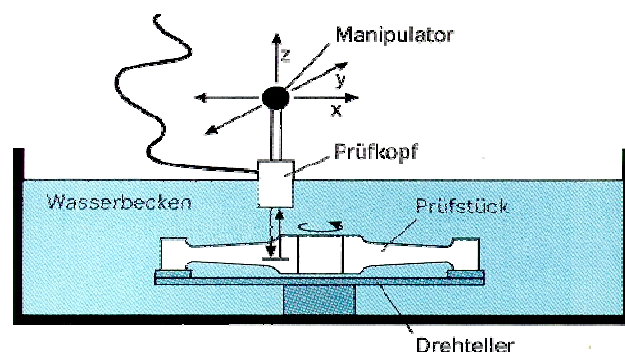
Die Bezugslinien-Methode ist eine Methode zur indirekten Bewertung von Anzeigen aus dem Prüfgegenstand. Diese Bewertung erfolgt durch den Vergleich der Anzeigen, die unter Berücksichtigung von Schallweg und Geometrie des Bezugsreflektors ermittelt werden.

### 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.

Wie z.B. bei der Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben.

Dabei liegt der Prüfling im Kopplmedium 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



**Abbildung 61: Turbinenscheibe in Wasserbad [4]**

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>

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

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

MTU: Ultraschallprüfung.ppt, Maximilian Schweter

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

[2], [3] MTU: Zusammenfassung der 6 ZfP-Verfahren.doc – ZfP-Verfahren, Ultraschallprüfung

[4] MTU: Thermografie.doc – Problemorientierte Triebwerkstechnik, Teil 2 „Neue ZfP-Verfahren“ Bildgebende Ultraschallprüfung



### **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 62:**  
**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  $\lambda$  (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 420kV, 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 ( $\lambda$ ) elektromagnetischer Strahlung wird ausgedrückt in Meter (m), Centimeter (cm [ $10^{-2}$ m]), Millimeter (mm [ $10^{-3}$ m]), Mikrometer ( $\mu$ 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.

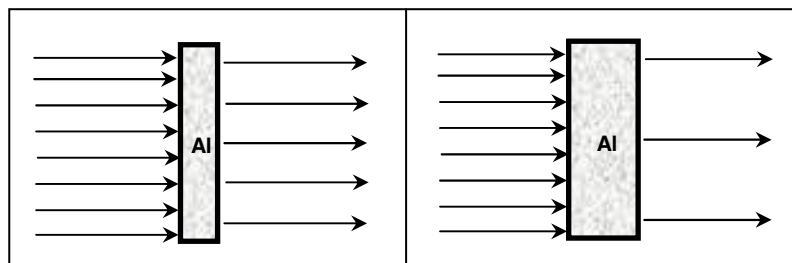
Bringt man eine positive Ladung an die Anode und eine negative Ladung an die Kathode, können die negativ geladenen Elektronen zur positiv geladenen Anode fließen. Vergrößert man den Ladungsunterschied, müssen sich die Elektronen schneller bewegen. Umgekehrt bewegen sie sich langsamer, wenn der Ladungsunterschied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



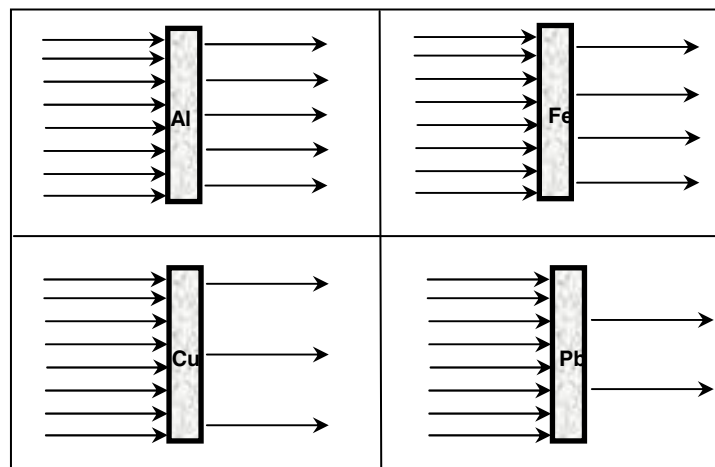
**Abbildung 63: Abnahme der Intensität infolge zunehmender Materialdicke**

#### 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.

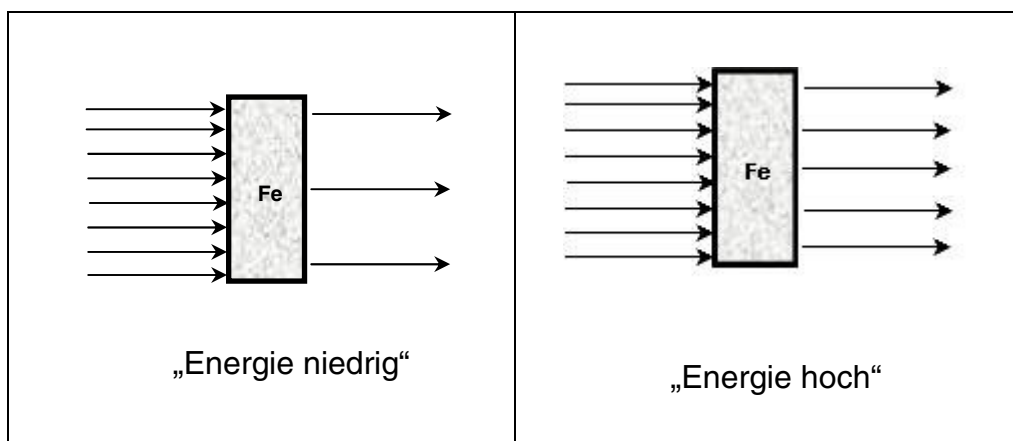
Versuche zeigen, dass Röntgenstrahlen einen Körper schlechter durchdringen, wenn die Dichte hoch ist.



**Abbildung 64: 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 65: Veränderung der Intensität bei Änderung der Energie**

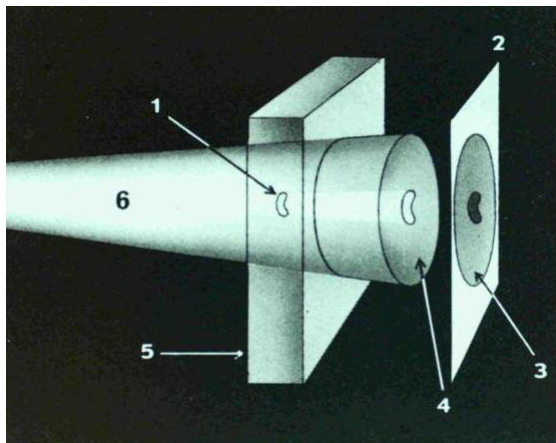
In Versuchen wurde festgestellt, dass die durchgehende Intensität auch von der Energie und somit von der Hochspannung abhängt. Harte Röntgenstrahlen können Materie besser durchdringen als weiche Röntgenstrahlen. Die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen hängt also auch von ihrer Wellenlänge (Härte) 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 66: Schwächung von Röntgenstrahlung im Festkörper mit Fehlstelle [2]**

In Abbildung 66 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 Ab-

sorption 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. Streustrahlung**

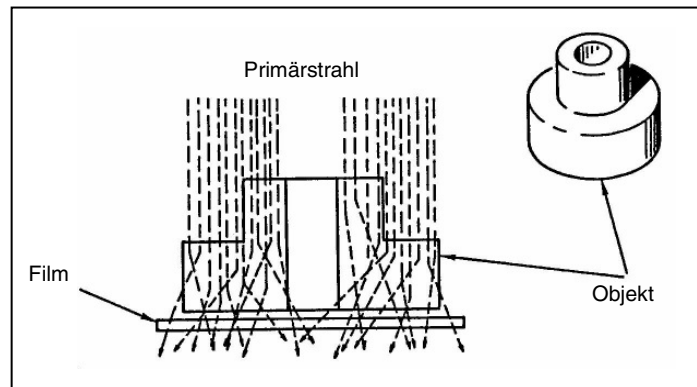
Da Röntgenstrahlung immer dann entsteht, wenn freie Elektronen mit Materie zusammenprallen, ist klar, dass auch die durch Röntgenstrahlung erzeugten Elektronen wieder Röntgenstrahlen erzeugen, wenn sie auf Materie treffen. Im Gegensatz zur Primärstrahlung nennt man diese Strahlung Sekundärstrahlung,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

Nachfolgend die verschiedenen Arten der Streustrahlung.

#### Innere Streuung

Innere Streuung entsteht im Objekt selbst, das geröntgt wird. 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, was als Unschärfe leicht sichtbar ist.

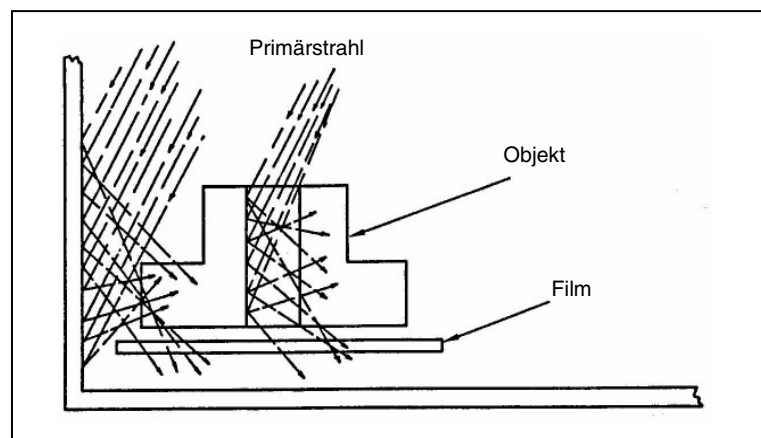




**Abbildung 67: Innere Streuung**

### Seitenstreuung

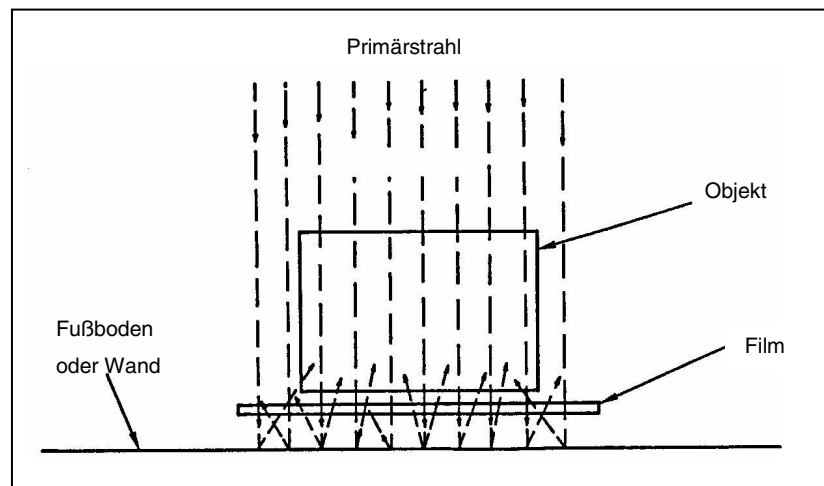
Trifft die Primärstrahlung Wände oder Objekte in der Nähe des Prüfobjektes oder Teile des Prüfobjektes selbst, so entsteht wiederum Streustrahlung, die als Seitenstreuung bezeichnet wird. Das Röntgenbild wird ebenfalls ungünstig beeinflusst.



**Abbildung 68: 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 69: Rückstreuung**

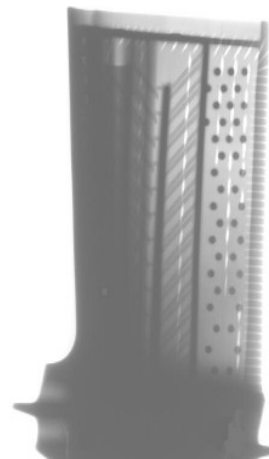
### **3.3.6. Anwendungen im Triebwerksbau**

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

Nachfolgend zeigt die bearbeitete Laufschaufel und das dazugehörige Röntgenbild.



**Abbildung 70: Prüfobjekt [3]**



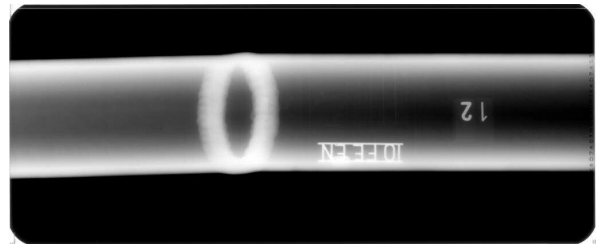
**Abbildung 71: Röntgenbild [4]**

Des weiteren werden die Gußteile vor Auslieferung an die MTU vom jeweiligen Lieferanten auf deren geforderte Qualität überprüft.

Zudem werden die Schweißnähte von Rohrverbindungen durch Röntgen überprüft.



**Abbildung 72: geschweißte Rohr-  
verbindung [5]**



**Abbildung 73: Detektor [6]**

---

#### Quellenangaben:

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

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

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

[2] MTU: Zusammenfassung der 6 ZfP-Verfahren.doc – ZfP-Verfahren, Röntgen

[3], [4]: MTU: Inline Turbine blade Inspection.ppt, S. Neuhäusler und B. Henkel

[5], [6]: MTU Bilderarchiv - Röntgen

### **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 74: 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.

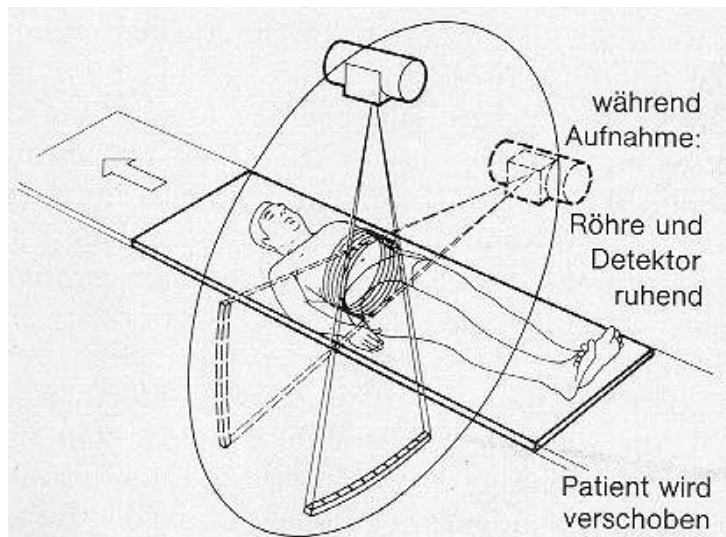
Mit diverser Software lässt sich das Bauteil Schnitt für Schnitt auf innen liegende Geometrien oder Fehler untersuchen und es ist möglich ihre Größe und Lage zu bestimmen.

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 das Bauteil gedreht und bei industriellen Anlagen 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 75: Prinzip der medizinischen CT [2]**

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

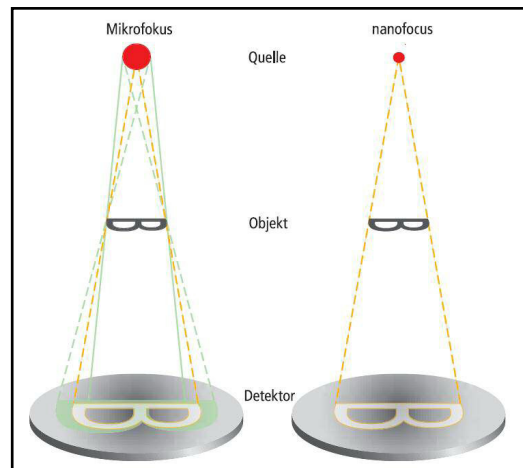
- Röntgenquelle bzw. der Röntgenröhre
- Detektoren
- Objektmanipulator bei industriellen Anlagen bzw. Auflagetisch für Patienten in der Medizin
- Computergestützte Kontroll- und Auswertsysteme

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 Detailerkennbarkeit, aufgrund der geringen geometrischen Unschärfe, erzielt werden. Minifokusröhren haben Brennfleckdurchmesser von einigen zehntel Millimetern, Mikrofokusröhren haben einige Mikrometer und Nanofokusröhren liegen im Nanometerbereich ( $1000\text{nm}=1\mu\text{m}=0,001\text{mm}$ ). Die geringste Unschärfe ist also mit



**Abbildung 76: Geometrische Vergrößerung und Unschärfe [3]**

Nanofokusröhren (kleinere Brennflecke) zu erzielen, wie es Abbildung 76 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 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.

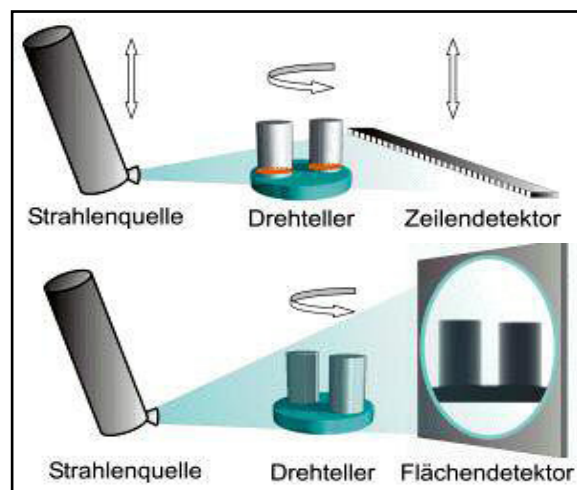
Zu beachten ist allerdings, dass der Detektor durch seine Pixel (Auflösung) in Kombination mit der geometrischen Vergrößerung die wirkliche Auflösung vorgibt.

### Detektoren

In erster Linie wird zwischen Flächendetektoren und Zeilendetektoren unterschieden.

Bei einer 2 dimensional CT mit einem Zeilendetektor (Abbildung 77 oben) wird das Bauteil mit einem Fächerstrahl durchstrahlt und die transmittierte Intensität mit einem Zeilendetektor gemessen.

Bei der Kegelstrahl CT (Abbildung 77 unten) wird das Bauteil von einem sog. Kegelstrahl durchstrahlt und die Intensität per Flächendetektor aufgenommen. Dies



**Abbildung 77:**  
**oben: 2D CT mit Zeilendetektor**  
**unten: 3D CT mit Flächendetektor [4]**

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 Röntgenkonus, wobei mehrere hundert Projektionen aufgezeichnet werden. Aus diesen zweidimensionalen Projektionen wird eine dreidimensionale Rekonstruktion berechnet, so dass mit nur einer Umdrehung Informationen über die dreidimensionale Struktur des Objektes vorhanden sind.

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.

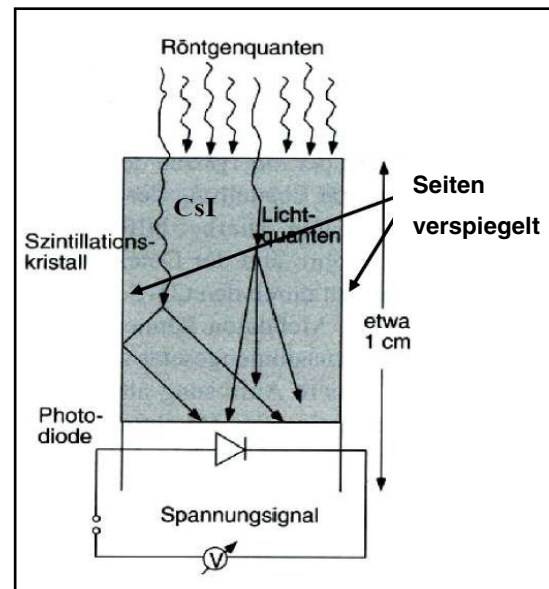
Außerdem nehmen die Röntgenstrahlen, die das Objekt nicht senkrecht zur Drehachse durchstrahlen, einen Winkel  $\alpha > 0^\circ$  mit der Horizontalebene ein. Nimmt der

Winkel  $\alpha$  große Werte an, kommt es zu Einbußen in der Auflösung. Durch sorgsames 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 Szintillationskristalle 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 78). 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.



**Abbildung 78: Prinzip der Szintillation [5]**

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.

Dabei ist die Auflösung von der Anzahl der Detektorpixel abhängig, d.h. je mehr Szintillationskristalle der Detektor pro einer gewissen Fläche hat, je höher kann der Detektor das Bauteil auflösen und darstellen. Bei dem 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 wer-



den, 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 Computertomografieranlagen sehr sensible Messsysteme sind, ist darauf zu achten das 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 das selbe Prinzip. Patienten die einer CT unterzogen werden, müssen während des Vorganges fixiert werden.

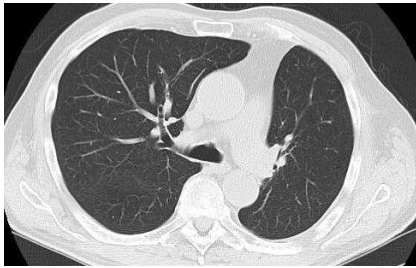
Erschütterungen führen zu einer Bewegung des Bauteils, dies ist mit ein Grund für unscharfe Aufnahmen.

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



**Abbildung 79: CT einer Lunge 2D [6]**



**Abbildung 80: CT eines Herzens 3D [7]**

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.

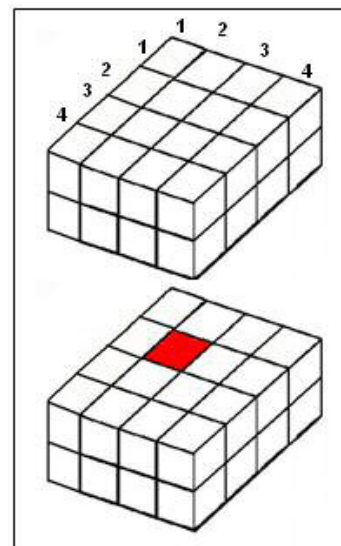
### 3.4.3. Prinzip der Computertomographie

Im folgenden soll nun erläutert werden wie ein Computertomograph 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.

Exemplarisch wird nun die fehlerhafte Schicht gescannt. Anhand der schematischen Zeichnungen der Röntgensysteme (Abbildung 82, 83 und 84) bestehend



**Abbildung 81: Schnitt eines Würfels**

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 das 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).

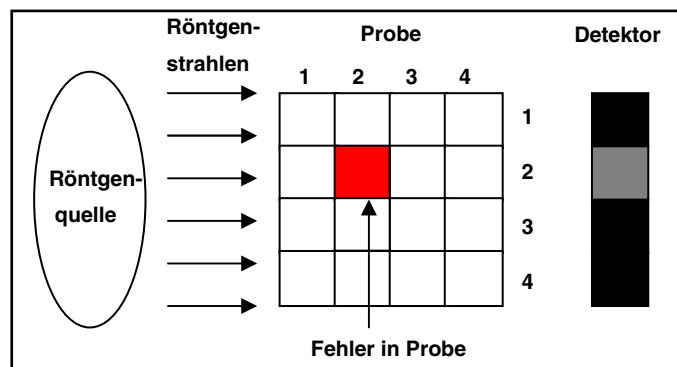
Bitte beachten, es handelt sich hier um eine Draufsicht!

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.

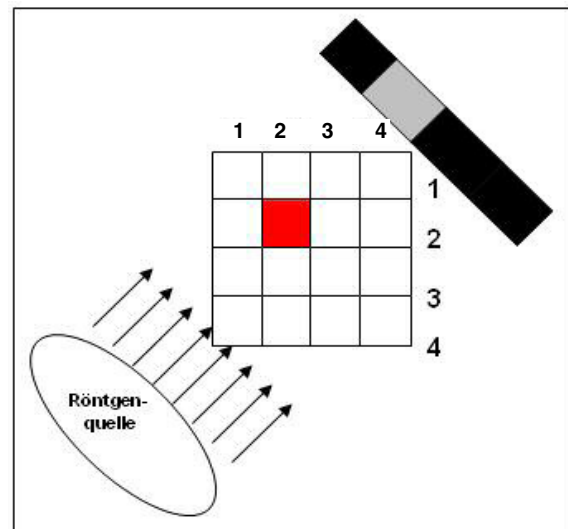
Diese Daten werden ebenfalls gespeichert. Wie tief der Fehler im Bauteil liegt ist nur bedingt durch den Intensitätsverlust zu errechnen.



**Abbildung 82: Prinzip CT: Einstrahlung links**

Schritt 2: Röntgenquelle und Detektor werden synchron um  $45^\circ$  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 zum einen in ihrer Menge, als auch in dem Ausmaß in dem sie auf den Detektor treffen, von denen der Horizontaleinstrahlung. Mit Ausmaß ist die Länge des Fehlers auf dem Detektor gemeint.

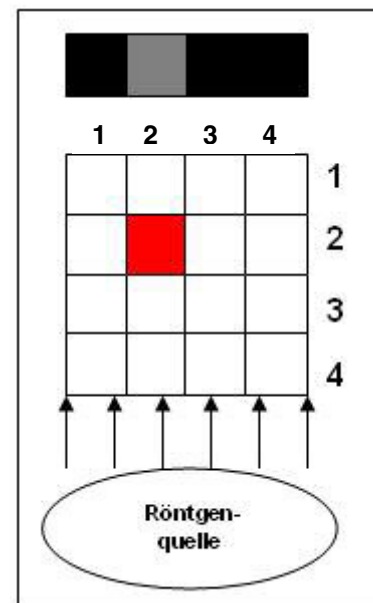
Diese Position zeigt uns also den Abstand des Fehlers von den Kanten 1/1 und 4/4 (Diagonale) der Probe.



**Abbildung 83: Einstrahlung  $45^\circ$**

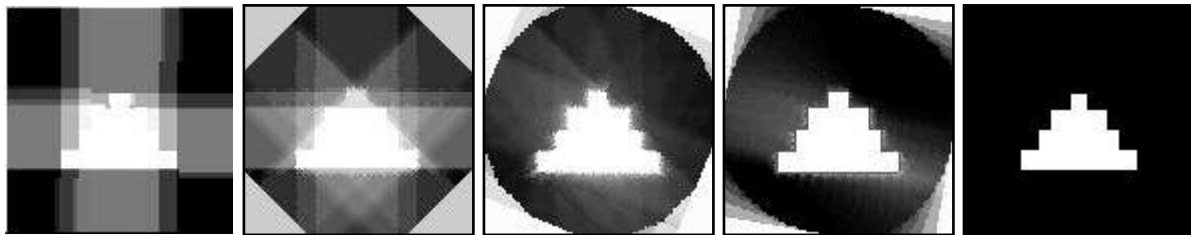
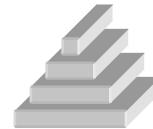
*Schritt 3:* In Abbildung 84 wird die Probe von unten durchstrahlt (Vorsicht: Draufsicht!!!). Dabei wird wie bei den anderen Darstellungen die Positionen aller Komponenten und die hinter dem Bauteil gemessenen verschiedenen Intensitäten gespeichert. Durch diese dritte Durchstrahlung ist es nun möglich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

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.



**Abbildung 84: Prinzip CT:  
Einstrahlung von unten**

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 nebenstehender Treppenkörper verwendet.



**Abbildung 85: Darstellbarkeit einer Probe in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchstrahlungen [8]**

- 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 das 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 wird von dies als 2D-Computertomografie bezeichnet.
- Durch die Zusammensetzung aller diese 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.

Der 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 [9]**

---

Quellenangaben:

Industrielle Computertomografie Tagung, Shaker Verlag, 2008

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

MTU: Röntgenvortrag.pdf, 6) Röntgendiagnostik

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

[2] – [9 ] Zusammenfassung der 6 ZfP-Verfahren.doc – ZfP-Verfahren, Computertomografie

### **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
- Den Abstand der Prüfspule zur Probe so gering wie möglich 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, so dass 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  $R$  [ $\Omega$ ] entgegen. Diese drei stehen über das „ohmsche Gesetz“ in Beziehung:

### Ohmsche 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  
 $\rho$  = 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 Formel-

zeichen  $H \left[ \frac{A}{m} \right]$ .

## 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.

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

### Magnetische Flussdichte einer Luftspule

$$B_0 = \mu_0 \cdot H$$

μ<sub>0</sub> = magnetische Feldkonstante (Permeabilitätswert von Luft: 4π 10<sup>-7</sup> Vs/Am ≅ 1,257 10<sup>-6</sup> 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 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 entgegensetzt, als dem Fließen des Gleichstromes.

Erhöht man die Frequenz der Wechselfrequenz bei jeweils gleich gehaltener Wechselspannungsamplitude, 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  $\delta$  (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

$\kappa$  = Leitfähigkeit

$\sigma$  = Leitfähigkeit (IACS = International Annealed Copper Standard)

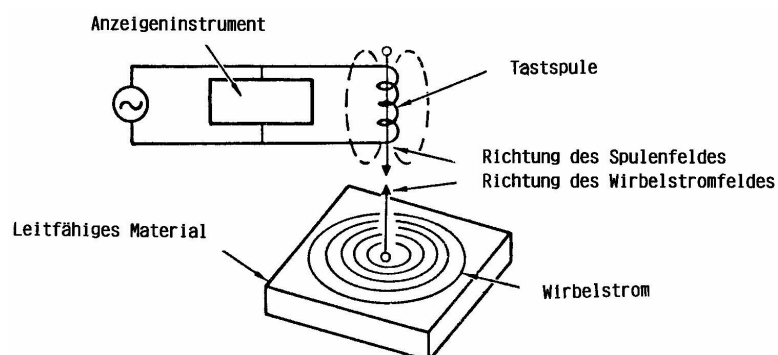
$\mu_r$  = relative Permeabilität

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  $H_s$ , 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  $H_w$ , dass dem Magnetfeld der Spule entgegengerichtet ist. Es schwächt das Spulenfeld und durch Überlagerung beider Felder  $H_s$  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  $\varphi$  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:

<u>austenitisch</u>	mit einer Leitfähigkeit von 0,4 - 0,5 $\kappa$ = 0,7 - 0,9% IACS
<u>ferromagnetisch:</u>	mit einer Leitfähigkeit sowohl im austenitischen als auch im Bereich der Nicht-Eisen-Metalle. Hier spielt die relative Permeabilität die Hauptrolle.
<u>nicht-Eisen-Metalle:</u>	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

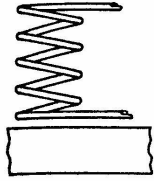
Enden oder Kanten lenken die Wirbelströme ab, die somit entstehende Falschanzeige wird als Kanteneffekt bezeichnet. Die Kante wirkt quasi wie ein großer Riss und kann andere Fehlstellen in der Nähe überdecken.

### **3.5.6. Verwendete Spulsysteme**

Zur Erzeugung der Wirbelströme im Bauteil und Messen 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.

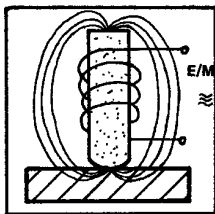
## Tastspulen

### einfache Tastspule:



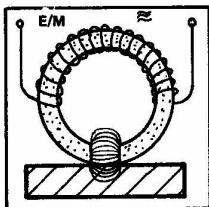
Die Tastspulen werden auf das Werkstück aufgesetzt, wobei die Achse der Spule meistens senkrecht auf der Bauteilfläche aufsitzt. Das magnetische Feld hat etwa den gleichen Durchmesser wie die Spule.

### Zylinderkernspule:



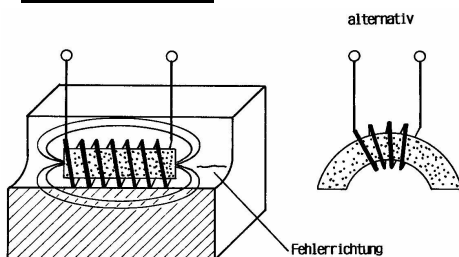
Diese Spule hat die einfachste Bauart. Um einen zylindrischen Ferritkern ist eine Spule aus Kupferlackdraht von ca. 0,05 bis 0,1mm Durchmesser gewickelt. Der Kanteneffekt der Zylinderkernspule ist erheblich, da das Magnetfeld dieser Spule weit streut.

### 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.

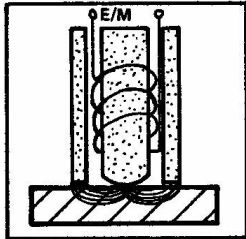
### Parallelspe:



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. Hiermit lassen sich Fehlstellen parallel zur Spulenachse entdecken. Der Kanteneffekt ist erheblich.

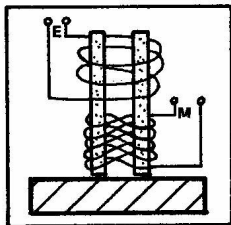


### Fokussierte Spule:



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.

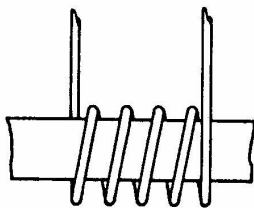
### Differenzspule:



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.

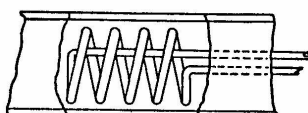
### Durchlaufspulen

#### umfassende Durchlaufspule:



Bei Rundmaterial und Rohren ist es sehr zeitaufwendig, die Oberfläche mit kleinen Tastspulen zu prüfen. Man verwendet daher Spulen, die den Außendurchmesser des Teiles umfassen. Damit wird im Bereich der Spule die gesamte Oberfläche erfasst.

#### Innen-Durchlaufspulen:



Bei der Prüfung von Rohrrinnenwänden können Spulen eingesetzt werden, die dem inneren Durchmesser des Rohres angepasst sind. Auch hier werden Teil und Spule während der Prüfung zueinander bewegt.

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 Roterspulen

### **3.5.8. Anwendungen im Flugzeugbau**

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

- Messen der elektrischen Leitfähigkeit von Al- und Ti-Legierungen im Anlieferungszustand zur schnellen Identifikation einer Legierung bei der Wareneingangsprüfung.
- Prüfung auf Werkstoffverwechselung 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:

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

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

## **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:

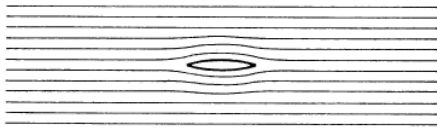
1. Das zu prüfende Material/Bauteil muss ausreichend magnetisierbar sein, d.h. diese Art der Prüfung ist nur an ferromagnetischen Werkstoffen möglich.
2. Die zu findende Fehlstelle muss ein genügend starkes Streufeld ausbilden können, damit sie durch das Prüfmittel nachgewiesen werden kann.
3. Die Oberfläche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

#### Physikalische Grundlagen

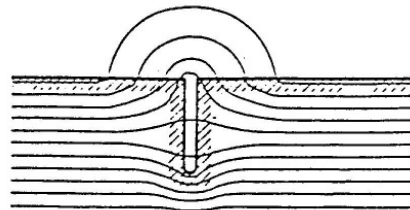
Ferromagnetische Stoffe können magnetische Feldlinien sammeln. Treten Störungen in den magnetischen Eigenschaften durch Materialtrennungen oder Permeabilitätsänderungen auf, werden die magnetischen Feldlinien in ihrem Verlauf gestört und im günstigsten Fall an die Oberfläche gedrängt. Sie bilden hier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

Streufeld ist in der Lage magnetisierbare Teilchen, 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). Damit kann diese Stelle nicht sichtbar gemacht werden. Dagegen verändert ein Spalt, der quer zum magnetischen Feld verläuft, das Bild wesentlich (Abbildung 89). Dieser Effekt kann so erklärt werden, dass an der Fehlstelle die magnetische Leitfähigkeit wesentlich geringer ist, und dadurch der magnetische Fluss behindert wird.



**Abbildung 88: Fehlstelle in Feldrichtung [1]**



**Abbildung 89: Fehlstelle senkrecht zur Feldrichtung [2]**

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 so genannte 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, 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 Magnetnadel 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 Magnetnadel 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  $\mu_r$  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 Fehlernachweisvermögen der Trockenprüfung für Fehlstellen unter der Oberfläche höher.

### **Magnetpulver**

Das Magnetpulver besteht entweder aus Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oder  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 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  $\mu\text{m}$ .

### **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 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.

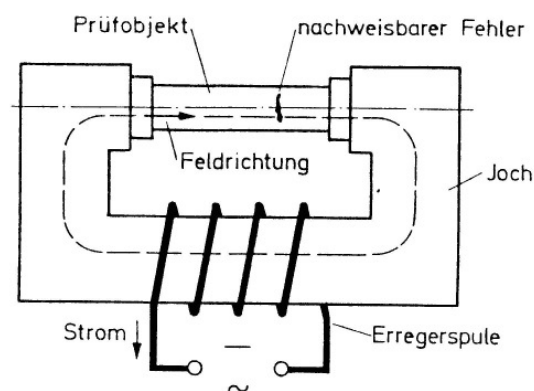
### 3.6.5. Magnetisierungsmethoden

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 90: Jochmagnetisierung [3]**

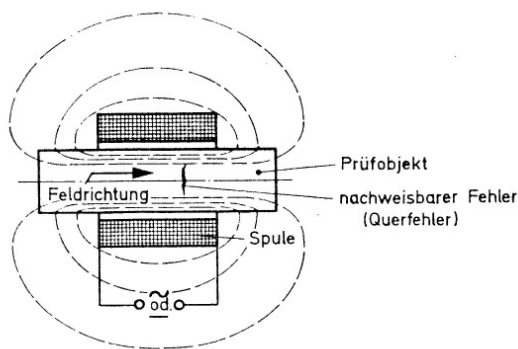
### Magnetisierung mit stromdurchflossenem Leiter

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

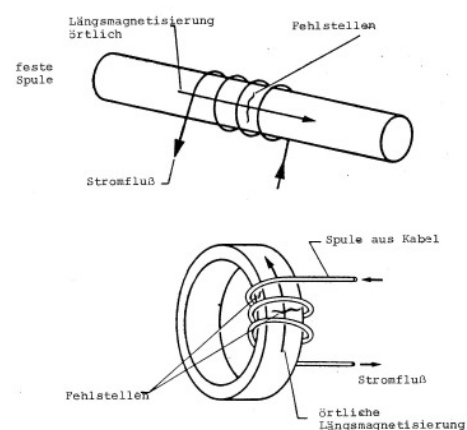
Es werden bevorzugt solche Fehler angezeigt, deren Längsrichtung mit der Richtung des Stromflusses übereinstimmt. Die Stärke der Magnetisierung nimmt mit der Entfernung vom Leiter ab.

Man unterscheidet zwischen Magnetisierung mit Spulen (Abbildung 91) und übrigen Leiteranordnungen, z.B. Hochstromkabeln oder Hilfsleitern (Abbildung 92).

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.



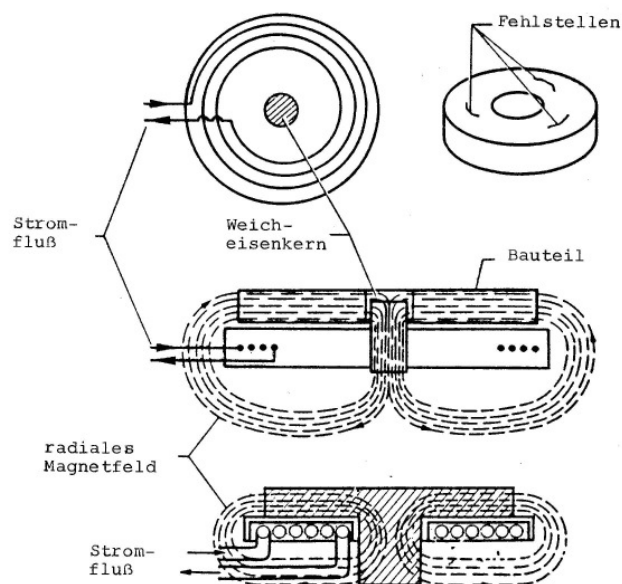
**Abbildung 91: Längsmagnetisierung mit stromdurchflossener Spule [4]**



**Abbildung 92: Längsmagnetisierung mit stromdurchflossener Spule (Hochstromkabel) [5]**

Laufscheiben für Triebwerke müssen gelegentlich auf Umfangsrissen 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 93).

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



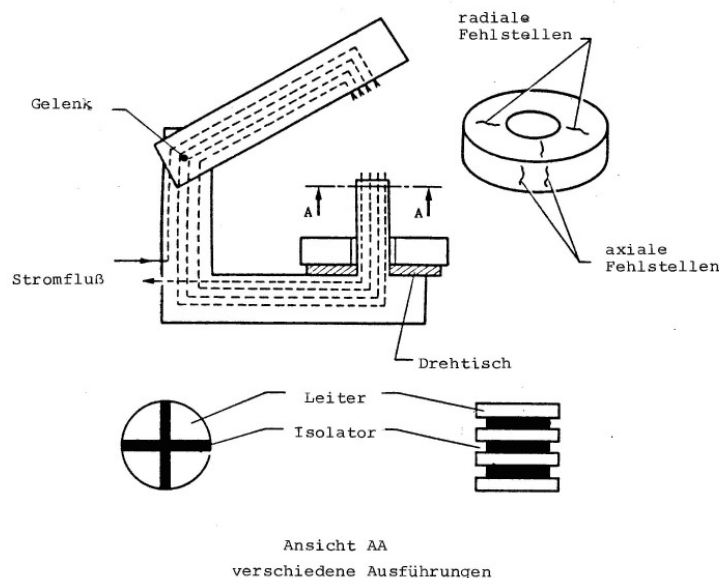
**Abbildung 93: Flachspule [6]**

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 94: Klappspule [7]**

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 aufklappbarem 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:

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

<http://www.ndt.net/article/dgzfp01/papers/v28/v28.htm>

MTU: Magnetpulverprüfung\_Zusammenfassung.doc

MTU: Magnetpulverprüfung\_Zusammenfassung.pdf

[1] - [7] MTU: Zusammenfassung der 6 ZfP-Verfahren.doc – ZfP-Verfahren, Magnetpulverprüfung

## ***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 aufgetragene 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**

#### 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:

- Dampfentfetten
- Lösemittel
- Wässrige Reinigung
- Chemische Entrostung