



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Entwicklung eines großserientauglichen Prüfkonzeptes für Leichtbauventile

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer

Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Graf

E315

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau

und

Dipl. Ing. Marcus Abele

MAHLE Ventiltrieb GmbH

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Roman Mottinger

9725838

Salzgries19/11

1010 Wien

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde bei der Firma MAHLE Ventiltrieb GmbH in Stuttgart Bad-Cannstatt verfasst.

An dieser Stelle möchte ich mich bedanken bei Herrn Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer und Herrn Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Graf, die es mir ermöglicht haben, die Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der Firma Mahle Ventiltrieb GmbH am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau der Technischen Universität Wien zu verfassen. Ich möchte mich weiters für ihre sachliche Unterstützung und freundliche Beratung, sowie für die rasche Korrektur meiner Arbeit bedanken.

Meinen Dank aussprechen möchte ich weites allen involvierten Mitarbeitern der Firma Mahle Ventiltrieb für die Mithilfe bei dieser Arbeit, allen voran Herrn Dipl.-Ing. Marcus Abele, dem ich die Vermittlung dieser Diplomarbeit zu verdanken habe und der mich vor Ort bestens betreut hat. Besonders möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Alexander Müller, Herrn Dipl.-Ing. Alexander Puck und allen Mitarbeitern der Abteilung für ihre Hilfestellungen und wertvollen Anregungen während der Diplomarbeit bedanken.

Großer Dank gilt auch meinen Eltern E. und M. Mottinger, die mir im laufe meines Studiums mit Rat und Tat zur Seiten standen und mich auch in vielen persönlichen und finanziellen Problemen immer unterstützt haben.

Weiters möchte ich noch Frau Gobl erwähnen, die meine Arbeit einer Rechtschreibprüfung unterzogen hat und meinen Freunden danken, die in dieser schweren Zeit für mich da waren.

Wien, Februar 2008

Roman Mottinger

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Entwicklung eines großserientauglichen Prüfkonzeptes für Leichtbauventile

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Februar 2008

Name

Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte ohne die vorherige Einverständniserklärung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau nicht gestattet.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit zerstörungsfreien Prüfmethoden, die für eine 100%-Prüfung bei der Serienproduktion von Ventilen eingesetzt werden können. Unter diesen Methoden der Prüfung versteht man, dass jeder Teil an allen vorgesehenen Stellen geprüft wird, bevor der Kunde die Ware ausgeliefert bekommt. Weiters sollte geklärt werden, ob sich ein vorhandenes Prüfverfahren, wie etwa das digitale Röntgen, für die Serienprüfung eignet.

Erstellt wurde ein Serienprüfkonzept für ein neuartiges Ventil, das in Verbrennungsmotoren zum Einsatz kommen soll. Es besteht aus einzelnen Stahlblechelementen, die mit modernen Schweißmethoden miteinander verbunden werden. Dieses Leichtbauventil bietet neben dem geringen Gewicht noch einige weitere Vorteile, wie geringere Ventiltriebsbelastungen, weniger Verschleiß an Ventilsitz und Ventilsitzring, erhöhte Motordrehzahl und reduzierte Reibleistung gegenüber konventionellen Ventilen.

Es wurden aus der Vielzahl von zerstörungsfreien Prüfverfahren, die sich für das Prüfen der Schweißstellen eignen, eine Reihe von möglichen Kandidaten ausgewählt und nach ihrer Serientauglichkeit bewertet. Hierfür werden Bewertungskriterien definiert und in einem Paarvergleich beurteilt. Danach erfolgte eine Benotung der ausgewählten Prüftechniken. Die ersten neun platzierten Prüfmethoden stellen potentielle Kandidaten für eine Serienprüfung dar. Drei grundlegende Ergebnisse kristallisierten sich heraus:

1. Das digitale Röntgen ist nach dem heutigen Stand der Technik für den Einsatz in einer 100%-Überprüfung ungeeignet. Besonders bei der Prüfzeit und der Prüfgenauigkeit ist erhebliches Entwicklungspotential von Nöten, um für die Serienprüfung interessant zu werden. Es zeigt sich weiters, dass man mit der vorhandenen Röntgenanlage die Möglichkeit hat, Kleinstmengen zu prüfen. Ein Vorteil für die MAHLE Ventiltrieb GmbH ist, dass man mit der vorhandenen Röntgenanlage die Möglichkeit hat, Kleinstmengen zu prüfen. Ein Umrüsten der bestehenden Fertigungsanlagen der Serienproduktion, die für die Überprüfung dieser Teile still steht, würde entfallen.
2. Ein Prüfverfahren, das durch die Bewertung der Prüfmethoden besonders positiv aufgefallen ist, ist die Thermographie. Durch die einfache Handhabung und die

schnelle Ergebniserstellung bietet diese Technik alle nötigen Voraussetzungen für die Überprüfung der Leichtbauventile.

3. Bekannte Verfahren, wie das Ultraschallmessen und das induktive Messen, würden bei der Endkontrolle eine kostengünstige, wie auch einfache Methode bieten, da aus dem konventionellen Ventilbau sehr viel Erfahrung vorliegt. Aus geometrischen Gründen ist das Prüfen der Schweißstellen im Fertigungsablauf nur bedingt möglich.

Nach einer ausführlichen Überprüfung der Wiederholgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der vorhandenen Röntgenanlage, konnte festgestellt werden, dass diese für die Serienprüfung unbrauchbar ist. Nach der Gaußschen Fehlerberechnung ergab sich ein relativer Fehler von 12% und eine Prüfzeit von mehr als 4 Sekunden pro Ventil. Durch einen Vergrößerungsvorgang beim Untersuchen der Ventile würde sich der relative Fehler halbieren lassen. Eine Verbesserung der Prüfzeit würde sich nur durch schnellere Hardware bewerkstelligen lassen. Die Möglichkeit, die Anlage für Kleinserien und schnelle Untersuchungen einzusetzen, bleibt bestehen. Allerdings lässt sich durch die schnelle Entwicklung von Soft- und Hardware nur sehr schwer einschätzen, ob nicht in naher Zukunft das digitale Röntgen als Prüfverfahren auch in der Serienproduktion in Frage kommen würde. In diesem Zusammenhang kann man an die bereits möglich gewordene Computertomographie, die dreidimensionale Bilder von den Objekten liefert, verweisen.

Das hier gezeigte Prüfkonzept stellt einen sehr effizienten Prüfablauf dar. Schwerpunkt bei der Erstellung des Prozesses war es, dass die vorgegebenen Prüfzeiten von vier Sekunden eingehalten und alle vorhandenen Schweißstellen am Ventil auf Fehlern untersucht werden. Das Prüfschema der konventionellen Ventile diente als Richtlinie bei der Erstellung des Konzeptes, wobei sich diese durch die unterschiedlichen Prüfmethoden und Prüfstellen unterscheiden.

Innovative Produkte, wie das Leichtbauventil, werden mit dem erstellten Konzept auf sichere Art und Weise geprüft, um den hohen Ansprüchen der MAHLE Ventiltrieb GmbH zu entsprechen.

Abkürzungsverzeichnis

AR	akustische Resonanzanalyse
bzw.	beziehungsweise
CCD	Charge Coupled Devices
CT	Computertomograph
d.h.	das heißt
d_{Pore} [mm]	Porendurchmesser
ggf.	gegebenen falls
HV	Härte Vickers
i.a.	im allgemeinen
LBV	Leichtbauventil
l_{max} [µm]	maximale Risslänge
o. a.	oben angeführt
RS	Reibschweißen
SPSI	Speckle Pattern Shearing Interferometrie
u.a.	unter anderem
v.a.	vor allem
VSE	Ventilschaftende
VSR	Ventilsitzring
YAG	Yttrium – Aluminium – Granat
z.B.	zum Beispiel
ZB	Zusammenbau
ZfP	zerstörungsfreie Prüfverfahren
ZP	zerstörendes Prüfverfahren

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Das Ventil	1
1.2 Das Leichtbauventil (LBV)	3
2. Zielsetzung der Diplomarbeit	5
2.1 Aufgabenstellung	6
3. Allgemeines zum Leichtbauventil	7
3.1 Design des Leichtbauventils	7
3.2 Herstellvorgang	8
3.3 Vor- und Nachteile	9
3.4 Tribologie	10
4. Angewandte Schweißtechnologien am Leichtbauventil	13
4.1 Laserstrahlschweißen	13
4.2 Reibschweißen	14
4.3 Schweißnähte am Leichtbauventil	16
4.3.1 Verbindung Teller/Rohr (ZB1)	18
4.3.2 Verbindung Teller/Kegel (ZB2)	20
4.3.3 Verbindung Rohr/Kegel (ZB2)	22
4.3.4 Verbindung Rohr/Ventilschaftende (ZB3)	23
5. Schweißfehler am Leichtbauventil	25
5.1 Poren	26
5.2 Kerben	27
5.3 Risse	29
6. Prüfverfahren	32
6.1 Allgemeine Prüfverfahren	33
6.1.1 Volumetrische Prüfverfahren	33
6.1.2 Oberflächenprüfverfahren	33
6.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Die Auswahl	33
6.2.1 Einfache Schnellprüfverfahren	35
6.2.1.1 Druckprüfung	35
6.2.1.2 Biegeumlaufprüfung	36
6.2.2 Elektrische und magnetische Verfahren	36
6.2.2.1 Streuflussprüfung ohne Magnetpulver	36
6.2.2.2 Wirbelstromprüfung	38

6.2.3	Optische Verfahren	39
6.2.3.1	Sichtprüfung	39
6.2.3.2	Eindringprüfung	41
6.2.3.3	Magnetpulverprüfung	41
6.2.4	Thermische Verfahren	42
6.2.4.1	Infrarot-Strahlungsthermometer	42
6.2.4.2	Passive Infrarot-Thermographie	42
6.2.4.3	Aktive Infrarot-Thermographie	43
6.2.4.4	Induktions-Thermographie	44
6.2.5	Akustische Verfahren	45
6.2.5.1	Ultraschallprüfung	45
6.2.5.2	Akustische Resonanzanalyse	46
6.2.5.3	Schallemissions-Analyse	47
6.2.6	Durchstrahlungsprüfung	48
6.2.6.1	Röntgenprüfung	48
6.2.6.2	Prüfung mit Gammastrahlen	49
6.2.7	Dynamische Verfahren	49
6.2.7.1	Laservibrometer	49
6.2.7.2	Frequenzanalyse	50
6.2.8	weitere Prüfverfahren	51
6.2.8.1	Holographie	51
6.2.8.2	Tomographie	53
7.	Bewertung und Auswahl der Konzepte	54
7.1	Paarvergleich der Bewertungskriterien	54
7.2	Definition der Bewertungskriterien	55
7.2.1	Lage Schweißnaht	55
7.2.2	Einfachheit	56
7.2.3	Anwendbarkeit	56
7.2.4	Zeitaufwand	57
7.2.5	Automatisierbarkeit	57
7.2.6	Sauberkeit	57
7.2.7	Zuverlässigkeit	58
7.2.8	Auswertung	58
7.2.9	Investitionskosten	59
7.2.10	Bearbeitung	59
7.3	Bewertung und Auswahl der favorisierten Prüfverfahren	59
7.4	Vergleich der Auswertung zum konventionelles Ventil	60
7.4.1	Vergleich Bewertungskriterium	60
7.4.2	Vergleich Prüfverfahren	61
8.	Das digitale Röntgen	62
8.1	Mikrofokus-Röntgenanlage	62
8.1.1	Funktionsprinzip	62
8.1.2	Röntgenröhre	63
8.1.3	Detektor	64

8.2 Röntgenanlage	65
8.2.1 Grundbegriffe	65
8.2.2 Programmierung	67
8.3 Genauigkeit	68
8.3.1 Wiederholgenauigkeit	68
8.3.2 Reproduzierbarkeit	70
8.3.3 Eichschablone	72
8.4 Bildbearbeitung und Filter	74
8.5 Ergebnisse	76
9. Fertigungsablaufplan Leichtbauventil	77
9.1 Allgemeines	77
9.2 Aufbau	78
9.3 Prozessablauf	78
9.4 Begriffserklärung	80
9.4.1 Allgemeines	80
9.4.2 Anwendung der Messtechnik	81
9.5 Zusammenfassung Prozessablauf	82
10. Zusammenfassung und Ausblick	84
10.1 Zusammenfassung	84
10.2 Ausblick	87
11. Literaturverzeichnis	89
12. Anhang	93

1. Einleitung

1.1 Das Ventil

Die Ventile sind jene Bauteile, die den Motor steuern. Sie haben die Aufgabe den Verbrennungsraum eines Zylinders vor der Umgebung abzudichten und den Gaswechselvorgang vorzunehmen.

Die Position der Steuerelemente ist der Zylinderkopf. Neben den Ventilen an sich, wobei man von Ein- und Auslassventilen spricht, haben diese eine Menge an Einbaukomponenten. Diese sind notwendig, um eine eindeutige Führung und Betätigung zu gewährleisten.

Abbildung 1-1 zeigt die einzelnen Komponenten neben dem Ventil.

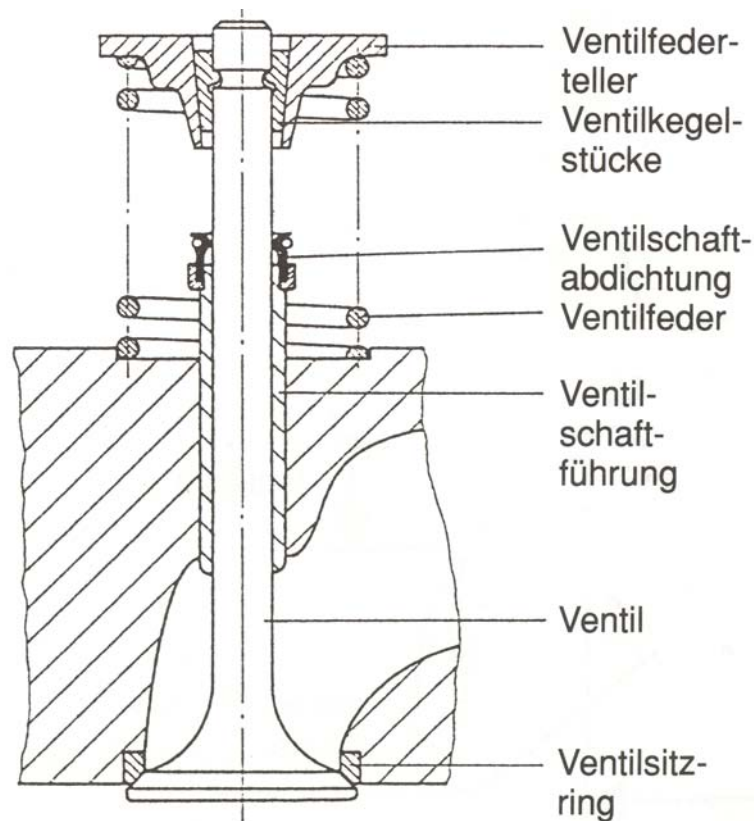


Abbildung 1-1 Ventil mit Einbauzubehör im Zylinderkopf [1]

Die Nocken der Nockenwelle haben bei der Steuerung der Ventile die Aufgabe, die Steuerorgane möglichst schnell, weit und stoßfrei zu öffnen und zu schließen. Hierbei erzeugt die nötige Schließkraft die Ventilfeder, die auch für den ständigen Kraftschluss (ständiger Kontakt der Bauteile) zwischen Nocken und Ventil sorgt [2].

Die Ventile bestehen aus einer Vielzahl kleiner, aber funktionswichtiger Details.

In Abbildung 1-2 sind alle Merkmale zu sehen, die für eine Fertigung eines Ventils notwendig sind. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Details findet man in der Literatur.

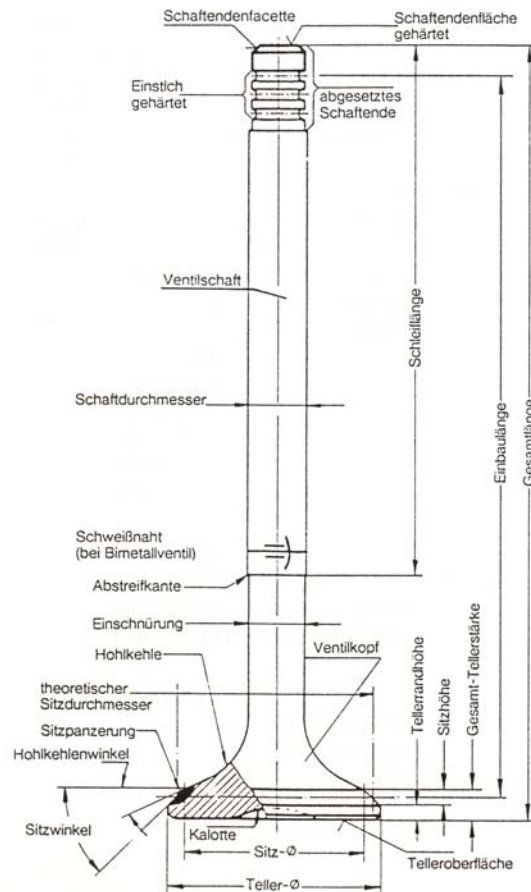


Abbildung 1-2 Ventil mit Erläuterung der konstruktiven Merkmale [1]

Die Werkstoffe für Ventile reichen von Chromstählen bis zu hochlegierten, austenitischen Stählen. Besonders die Auslassventile sind thermisch hoch belastet. Dieser Tatsache wirkt man mit besonderen Werkstoffen und Sonderbauformen entgegen. Typische Vertreter von Ventilwerkstoffen sind CrSi-Stähle und hochlegierte CrMoV- oder CrMnMo-Stähle. Auch Nickel-Basis-Legierungen sind in modernen Motoren zu finden.

Bei thermischen Belastungen von Temperaturen um 1000°C werden Auslassventile zusätzlich am Ventilsitz mit einer *Stellit* Panzerung versehen. Diese reduziert den Verschleiß durch ihre ausgezeichnete Warmhärte. Sonderformen von Ventilen sind die Bimetall-Ventile, wobei zwei unterschiedliche Werkstoffe für Schaft und Teller zum Einsatz kommen. (siehe Abbildung 1-2). Um einerseits Material und Gewicht einzusparen werden moderne Ventile am Schaft gebohrt. Bei Auslassventilen kann dieser

Hohlraum dazu genutzt werden Natrium einzufüllen. Dadurch wird eine bessere Wärmeabfuhr gewährleistet, die vom Ventilkopf zum Schaft erfolgt und dort an die Ventileitung abgegeben wird. Die thermische Entlastung ermöglicht in einigen Fällen das Entfallen der Sitzpanzerung.

Bei dem LBV sind diese Vorteile vereint. Durch die dünnen Wandstärken und hochfesten Nickel-Basis-Legierungen entstehen Hohlräume die je nach technischer Anforderung mit Natrium gefüllt werden können und so ein thermisch ausgeglichenes Bauteil schaffen.

Abbildung 1-3 zeigt das Leichtbauventil mit Natriumfüllung.



Abbildung 1-3 Natriumfüllung am LBV (Quelle: Mahle Ventiltrieb GmbH)

1.2 Das Leichtbauventil (LBV)

Die Idee, leichte, gebaute Ventile in Verbrennungskraftmaschinen einzusetzen ist fast so alt wie der Verbrennungsmotor selbst. Bereits in frühen Jahren der Geschichte des Verbrennungsmotors haben sich Ingenieure Gedanken darüber gemacht, wie man das Gewicht bewegter Massen reduzieren kann.

Abbildung 1-4: Ein Patent aus dem Jahr 1919 zeigt einige Ausführungsbeispiele von gebauten Ladungswechselventilen. Bereits damals hat man mit hohlen Formen experimentiert und versucht, Gewicht zu reduzieren.

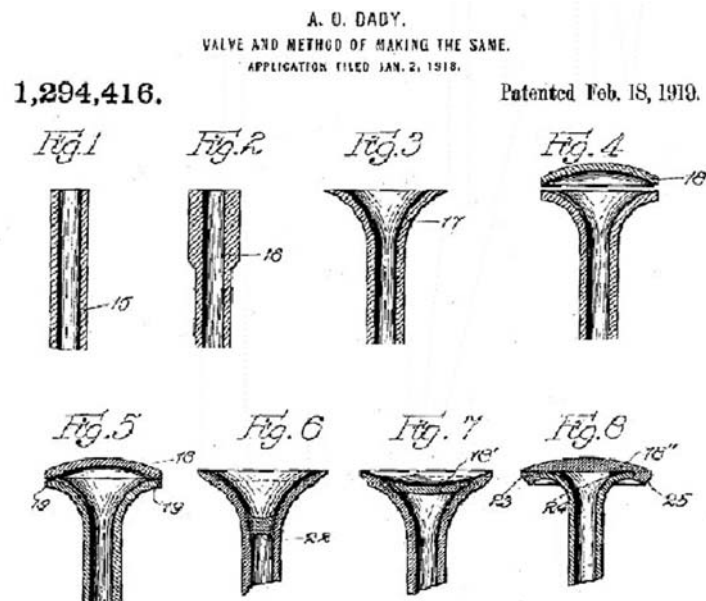


Abbildung 1-4 Ansätze zur Entwicklung von leichten gebauten Ventilen, Beginn des 20. Jahrhunderts (Quelle: US-Patent 1 294 416)

Die Probleme der damaligen Umsetzung der leichten Ventile lagen an der mangelnden Werkstoffqualität und den fehlenden Technologien zur Umformung.

In den nächsten fünfzig Jahren verfiel dieser Bereich der Motorenentwicklung in einen tiefen „Dornröschenschlaf“. Nach den Weltkriegen und dem Wirtschaftsaufschwung begann man Ende der Siebziger Jahre mit neuen hochtechnologischen Werkstoffen, wie Titan, Keramik (Si_3N_4 , SiC) und Aluminiumlegierungen reine Werkstoffansätze zu verfolgen. Durch die geringeren Dichten der Materialien reduzierte sich das Gewicht der Ventile und somit auch die Kräfte der bewegten Massen. Jedoch war der Einsatz solcher moderner Werkstoffe mit hohen Kosten verbunden und für eine Serienanwendung viel zu teuer.

Abbildung 1-5 zeigt die Ein- und Auslassventile eines Formel1-Motors, die aus Titan gefertigt sind.



Abbildung 1-5 Titanventile aus der Formel1 (Quelle: AVL List GmbH)

Die Motivation der MAHLE Ventiltrieb GmbH, ein Leichtbauventil aus Stahl zu entwickeln, bestand darin, ein Ladungswechselventil fürnockenwellenlose Motoren anbieten zu können. Dieses Konzept ermöglicht saugrohr-einspritzende Ottomotoren vollständig entdrosselt zu betreiben. Bei dieser Bauart von Motoren ist es Voraussetzung, sehr leichte Ventile zu verbauen, diese werden durch Magnete elektrisch betätigt. Die Leistungsaufnahme der Aktuatoren hängt im wesentlichen vom Gewicht der Ventile ab [3].

Auch die Verwendung der LBV in gängigen Verbrennungsmotoren bewirkt eine Verbesserung der Motorleistung und des Wirkungsgrades. Eine Steigerung der Motorleistung wird durch eine Erhöhung der Motordrehzahl durch die verringerte Masse des Ventils erreicht. Die Anwendung von LBV in Benzin Direkteinspritzende Ottomotoren ermöglichen durch die bessere Innenkühlung und die damit einhergehende höhere Klopficherheit die Verdichtungsverhältnisse zu erhöhen. In den modernen Ottomotoren werden in der Regel höhere Verbrennungsspitzen drücke erreicht, daher ist die Lebensdauerauslegung der Ventile von starker Wichtigkeit. Da zur Minimierung von oszillierender Masse die Ventile zusehends schlanker gestaltet werden, überwiegend durch das Einbringen von Kalotten auf der Tellerunterseite und einer strömungsoptimierten Hohlkehle, entsteht durch die reduzierte Steifigkeit des Ventilkopfes Instabilitäten unter Brennraumdruck und es kommt zu elastischen Verformungen am Teller. Hiermit ergibt sich durch die ständig wiederkehrende elastische Verformung eine reduzierte Lebensdauer. Weiters ist durch die große Relativbewegung mit erhöhtem Verschleiß zwischen Ventilsitzring und Ventil zu rechnen [4].

2. Zielsetzung der Diplomarbeit

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll ein Prüfkonzept für die Serienfertigung eines Leichtbauventils erstellt werden. Der Schwerpunkt liegt bei der Überprüfung der Schweißnähte, die sich aus Laserschweißnähten und einer Reibschweißnaht zusammensetzen. Es sind zerstörungsfreien Prüfmethoden zu suchen, die sich für eine 100% Überprüfung in der Serie eignen.

Ein wesentlicher Bereich der Arbeit ist die Einschätzung der Prozessfähigkeit, der Kosten und der Prüfzeiten. Es soll durch eine Bewertungsmatrix eruiert werden, welche Technologien sich am besten für ein Serienprüfkonzept eignen.

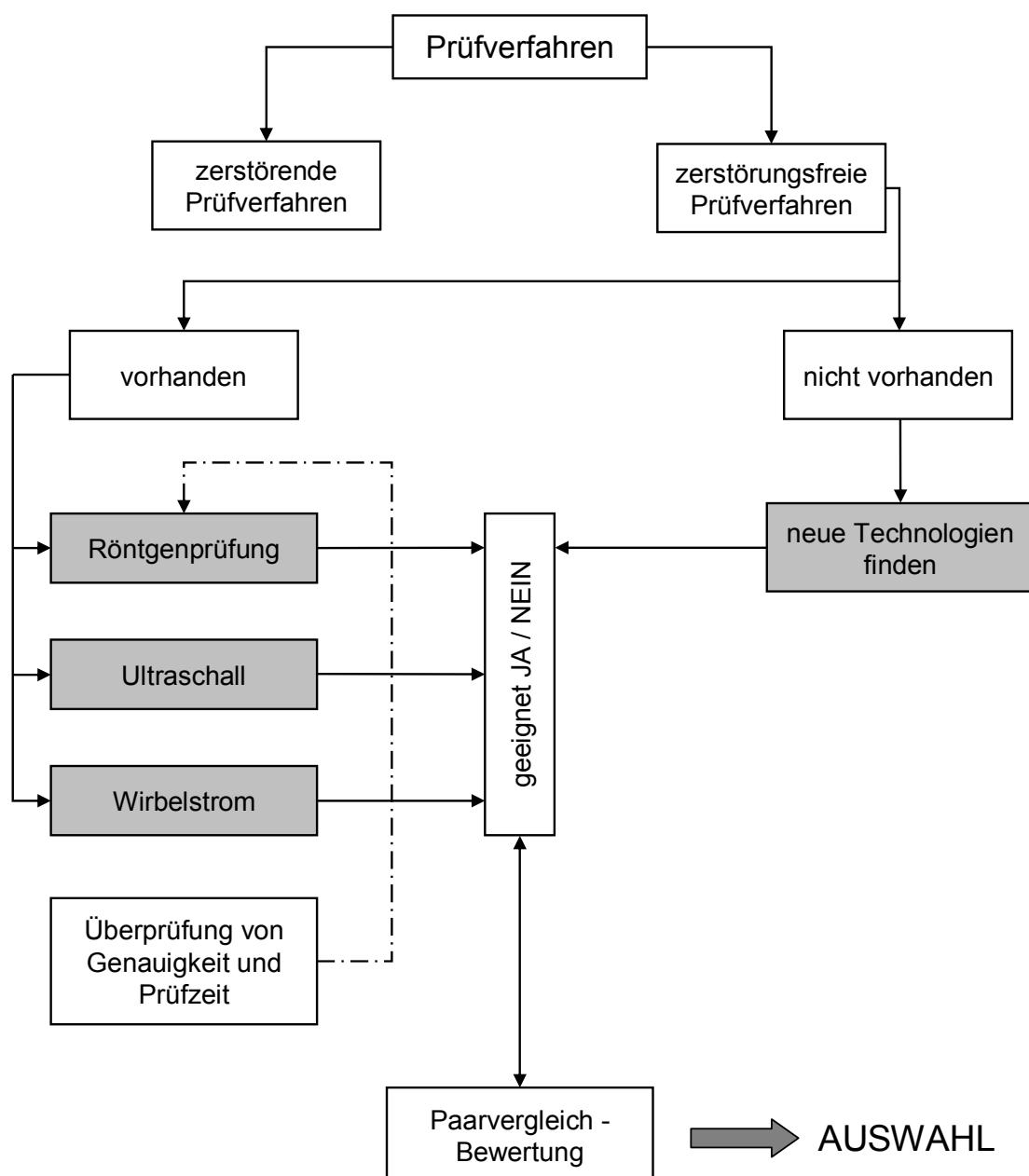
Die Untersuchungen beschränken sich auf folgenden Fehlerkatalog:

Tabelle 2-1 Zu untersuchende Fehlergrößen

Fehlerart	Fehlergröße
Bindefehler	50 bis 100 μm
Risse	$l_{\text{max}} = 100 \mu\text{m}$
Oberflächennahe Poren	$d_{\text{Pore}} > 0,1 \text{ mm}$

2.1 Aufgabenstellung

In der Abbildung 2-1 ist der Arbeitsablauf in Rahmen dieser Arbeit graphisch dargestellt.

**Abbildung 2-1** In der Diplomarbeit zu untersuchenden Varianten und durchzuführende Auswahl

3. Allgemeines zum Leichtbauventil

3.1 Design des Leichtbauventils

Das von MAHLE Ventiltrieb GmbH entwickelte Leichtbauventil ist vollständig aus Stahl gefertigt. Dieses Ventil ist im Vergleich zu konventionell hergestellten Ventilen um bis zu 50% leichter, weil es innen hohl ist.

Die Abbildung 3-1 zeigt die Baustufen in geordneter Reihenfolge. Beim „Prototyp“ (Baustufe 1) hat man ein Vollventil als Basis verwendet und spanend bearbeitet. Die nachfolgende Stufe (Baustufe 2) ist eine Optimierung der ersten, als Ausgangsprodukt wurde ein konturgeschmiedeter Rohling verwendet und spanend nachbearbeitet. Da dieser Herstellungsprozess aufwendig war, hat man versucht, das Ventil aus Blechteilen zu fertigen. Dieses Design ist in der dritten Designstufe (Baustufe 3) verwirklicht worden. Die Idee des gebauten Ventils wurde verfeinert und die erste Baustufe (Baustufe 4) des „near series“ – Design war entstanden. Die nachfolgenden Baustufen beinhalten Optimierungen für Strömung, Schweißprozess und Blechteilfertigung. Die Grafik soll die Evolutionsstufen bildlich verständlich machen.

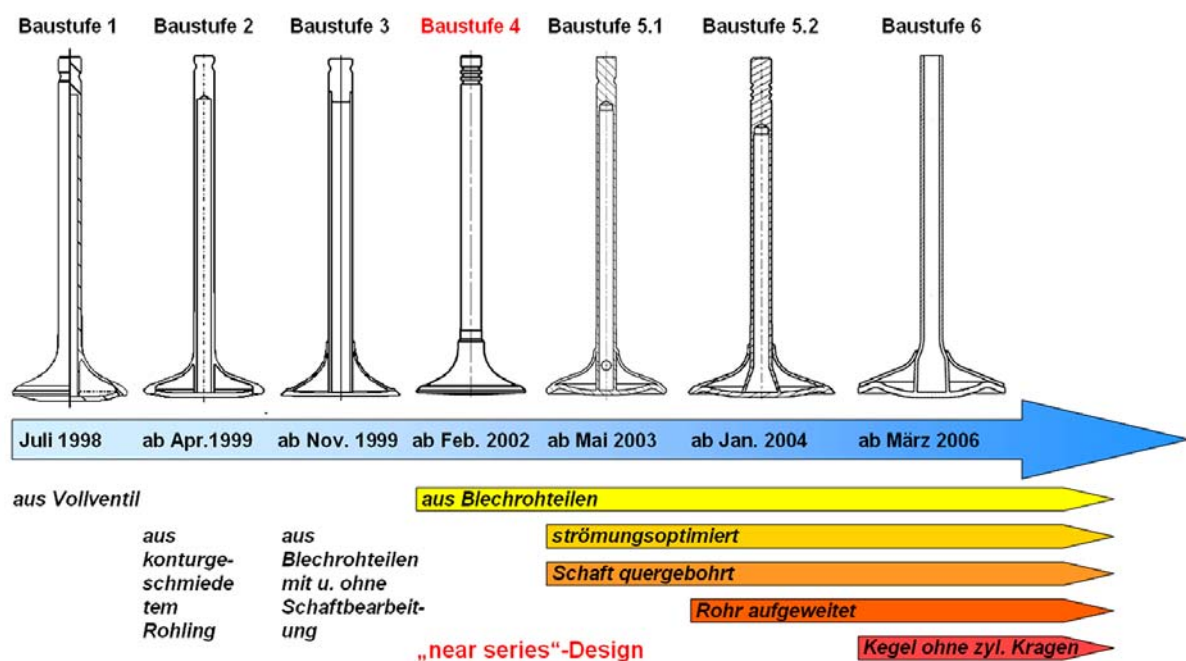


Abbildung 3-1

Entstehung des Leichtbauventils

(Quelle: Mahle Ventiltrieb GmbH)

Im Laufe der Entwicklung der LBVs hat sich das Design in sechs Baustufen weiterentwickelt.

In Abbildung 3-2 wird der Aufbau des LBVs gezeigt. Es besteht aus vier Komponenten. Der Schaft besteht aus einem Präzisionsrohr, Teller und Schaft werden in einem mehrstufigen Umformprozess aus Blechteilen gefertigt. Als Werkstoffe kommen, den jeweiligen Anforderungen angepasst, hoch warmfeste Stähle zum Einsatz. Das Fügen der Einzelteile erfolgt mittels Laserstrahlschweißen. Die Blechdickenangaben sollen verdeutlichen, wie filigran die Ventile gestaltet sind.

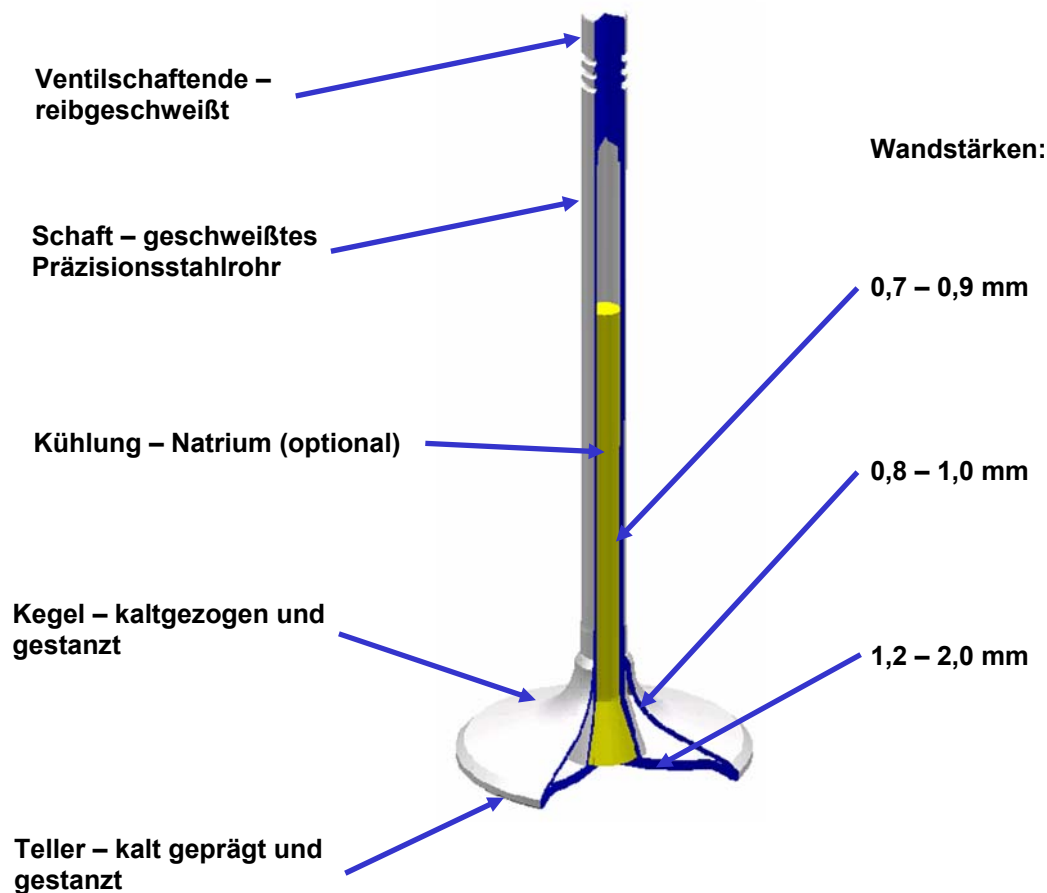


Abbildung 3-2 Struktur des Leichtbauventils (LBV) (Quelle: Mahle Ventiltrieb GmbH)

3.2 Herstellvorgang

Ausgehend von den Blech-Einzelteilen wird zunächst das Schaftrohr mit dem Teller verbunden. Danach wird der Kegel über das Rohr geschoben und zuerst am Teller und danach am Schaft verschweißt. Im dritten Schritt kann das Füllen des Rohres mit Natrium erfolgen. Das Schaftendstück wird auf das Rohr geschweißt. Im letzten Schritt erfolgt eine entsprechende Endbearbeitung und Oberflächenbehandlung, wie bei den konventionellen Ventilen.

Abbildung 3-3 verdeutlicht den Produktionsvorgang, wie er oben beschrieben wird.

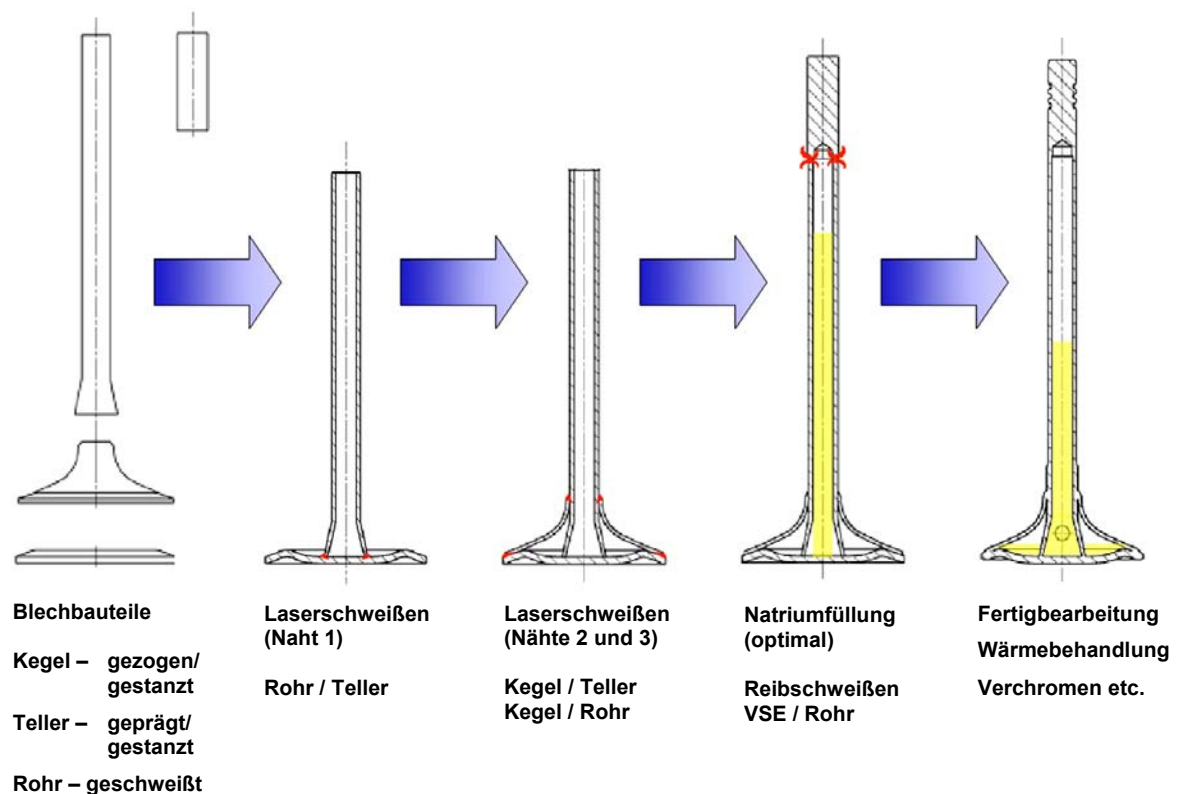


Abbildung 3-3 Herstellvorgang Leichtbauventil (Quelle: Mahle Ventiltrieb GmbH)

3.3 Vor – und Nachteile

Das Leichtbauventil bietet viele Vorteile gegenüber konventionellen Ventilen, ein Überblick:

Vorteile

- 30 bis 50% leichter als Vollventile
- erhöhte Motordrehzahl und / oder reduzierte Reibleistung
- wesentlich verringerter Verschleiß am Ventilsitzring (VSR) und Ventilsitz
- geringere Kosten im Vergleich mit anderen Leichtventilkonzepten
- höchste thermische Stabilität durch Ni – Basiswerkstoffe
- Temperaturverteilung einstellbar
- Verdichtungserhöhung möglich
- erhöhte Leerlaufstabilität durch geringere Schwankung der Kompressionsvolumina

Der Nachteil des LBVs liegt darin, dass die Ventilgröße bzw. Belastungen durch die verwendeten Blechdicken begrenzt sind.

Das MAHLE Leichtbauventil hat bereits in einer Reihe von Funktions- und Dauerlaufprüfungen seine Eignung bewiesen. Die Hersteller haben die Möglichkeit, auf einfache Weise eine Optimierung durchzuführen, ohne kostenintensive Veränderungen der Zylinderköpfe, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden.

3.4 Tribologie

Das Thema der Tribologie ist zurzeit in Wissenschaft und Technik ein sehr aktuelles Thema. Daher wird auch an dieser Stelle darauf eingegangen, weil das LBV hinsichtlich der Tribologie ausführlichen Untersuchungen unterzogen wird.

„Die Definition ist aus der englischen Originalfassung abgeleitet: *Tribologie – science and technology of interacting surfaces in relative motion and the practices related there to*. Die Tribologie umfaßt die Teilgebiete *Reibung*, *Verschleiß* und *Schmierung* [5].“

Beim Betrachten zweier Bauteile, die in Wechselwirkung zu einander stehen, spricht man von einem tribologischen System. Dabei ist der Verschleiß als Systemeigenschaft zu betrachten.

Abbildung 3-4 zeigt systematisch ein tribologisches System zweier Elemente. Die Eigenschaften und Wechselwirkungen der Elemente formen die Struktur des Tribosystems. Die Eingangsgrößen wirken auf die Struktur, die das Kollektiv in Nutzgrößen umwandeln. Dabei entstehen Verlustgrößen, die berücksichtigt werden müssen [2].

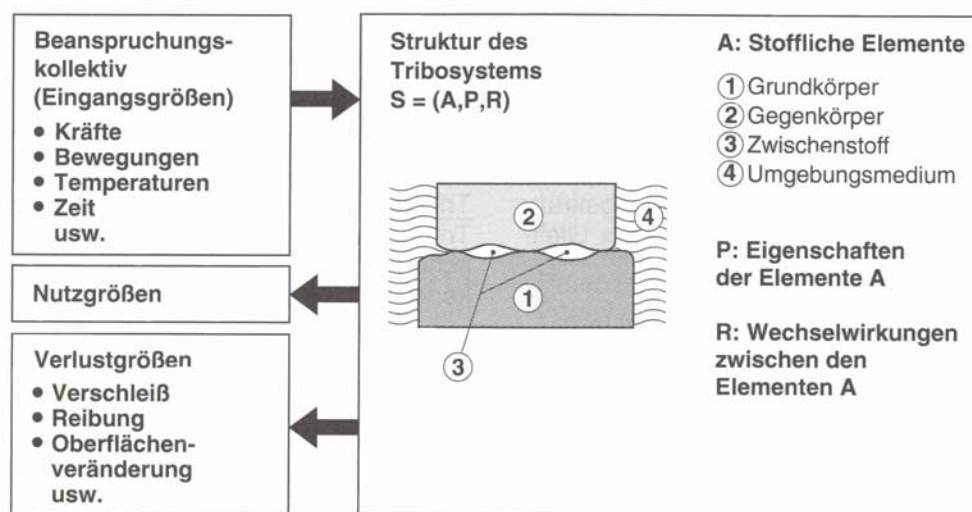


Abbildung 3-4

Tribologisches System (allgemein)

(Quelle: Bosch)

Bei der Tribologie wird der Schwerpunkt im ersten Schritt auf die Paarung Ventilsitz – Ventilsitzring (VSR) gelegt. In den möglichen geringen Verschleißraten wird, neben der Anhebung der Drehzahlgrenze oder der Reibungsreduzierung, eines der großen Potenziale des LBV gesehen. Diverse Dauerläufe bestätigen diese Annahme.

Eine wichtige Aufgabe ist es, für das LBV geeignete Tribopartner aus dem eigenen MAHLE-Lieferprogramm zu ermitteln. Es zeigte sich in verschiedenen Erprobungsläufen, dass Serien-aktuelle VSR bei Kundenerprobungsläufen nicht die erwünschten Verschleißraten gegenüber den konventionellen Ventilen zeigten. Ein optimiertes Tribosystem bietet hier auch ökonomische Potentiale. Dauerlaufergebnisse zeigen, dass in der Herstellung grundsätzlich aufwendigere und höher spezifizierte LBV möglicherweise auch in hoch beanspruchten Motoren mit einfacheren, also kostengünstigeren Ventilsitzringwerkstoffen sehr gute Verschleißergebnisse erzielen. Wenn es gelingt, dies als „Paket“ zu vermarkten, ist das ein großer Vorteil für das LBV.

In Abbildung 3-5 ist eine Systemanalyse des Tribosystems Ventilschaft-Ventilsitzring ausgearbeitet, um sich der unterschiedlichen Laufbedingungen von konventionellen Ventilen und LBV bewusst zu werden.

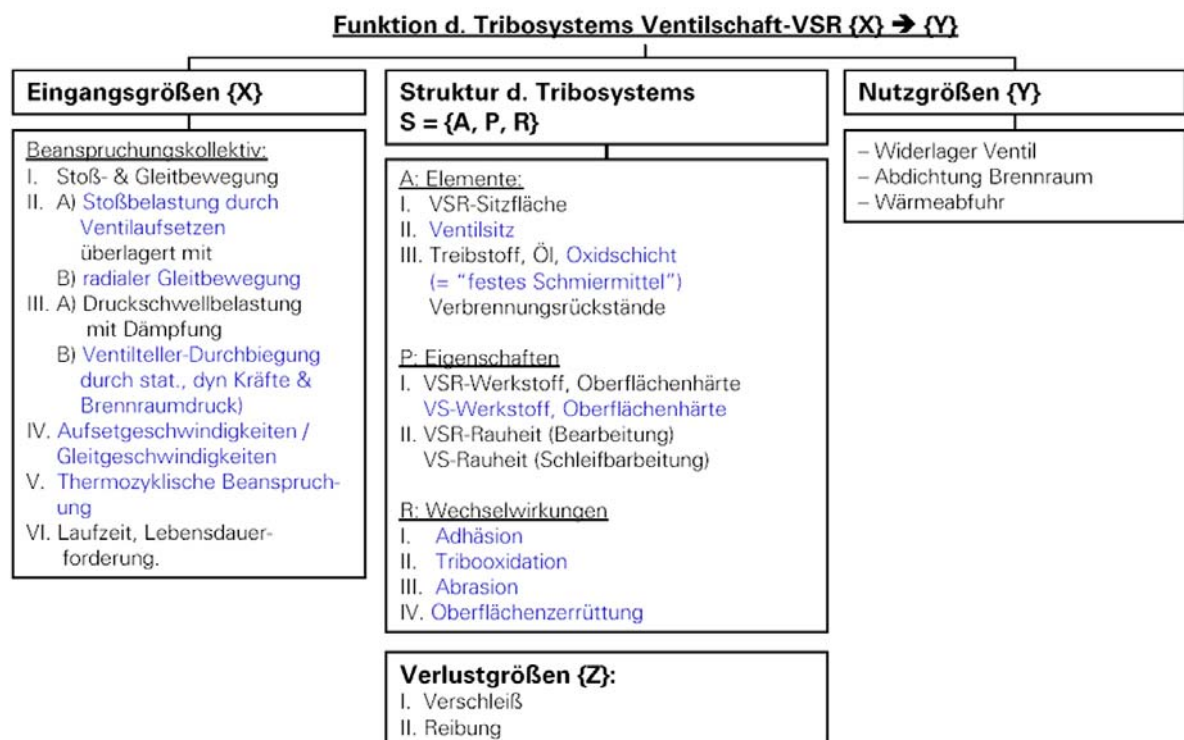


Abbildung 3-5

Systemanalyse des Tribosystems LBV-VSR [6]

Die theoretisch gegebenen Vorteile des LBV hinsichtlich seines Verschleißverhaltens stellen sich wie folgt dar:

- In vielen „dynamisch schwierigen“ Ventiltrieben zeigen sich bei LBV-Einsatz deutlich reduzierte Aufsetzgeschwindigkeiten aufgrund der reduzierten dynamischen Überhöhungen.
- Die geringere Masse des LBV verursacht einen verminderten Aufsetzimpuls.
- Das Produkt aus beiden obengenannten Vorteilen hat große Vorteile hinsichtlich des Verschleißes (Impuls = Masse x Geschwindigkeit).
- Beim Einsatz von Oxidschicht-bildenden Werkstoffen (z.B. Nickel-Basis-Legierungen) kann diese als wirksamer Verschleißschutz auf dem Auslass-Ventilsitz angesehen werden.
- Im Vergleich zu den meisten „gewichtsoptimierten“, konventionellen Ventilen mit „schlankem“ Ventilkopf und großer Kalotte bietet das LBV eine höhere Steifigkeit, die zu geringeren Relativbewegungen im Sitz führt.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Nickelbasis-Legierungen verfügen im Vergleich zu klassischen Ventilstählen über relativ geringe Grundhärten. Dies betrifft insbesondere den Einlassventilsitz, da im typischen Temperaturbereich des Einlassventilsitzes keine schützenden Oxidschichten gebildet werden.
- Im Vergleich zum klassischen Einlassventilwerkstoff X45 CrSi 9 3 (1.4718) mit einer Härte von ca. 400 HV 1 bei Raumtemperatur, verfügt NiCr23Fe (2.4851 bzw. Inconel® alloy 601) – siehe Anhang A – hier nur über ca. 200 HV 1 [6].
- In extrem heißen Applikationen wurden am LBV aus 2.4851 an der Ventilkehle Heißgaskorrosion und Korngrenzenoxidation beobachtet, ähnlich dem Hohlventil aus NiCr20TiAl (2.4952 bzw. Nimonic® alloy 80A), siehe auch Anhang B.
- Hoher Einlass-Ventilsitzverschleiß in extremen Anwendungen mit hohen Aufsetzgeschwindigkeiten könnte nach hohen Laufleistungen im ohnehin hoch belasteten Sitzbereich zu einer nennenswerten Wandstärkenreduzierung und damit zu einem Totalausfall des Bauteils führen.

4. Angewandte Schweißtechnologien am Leichtbauventil

Schweißen ist eines der ältesten Fügeverfahren, die bereits unter Leonardo Da Vinci Anwendung fand [7]. Unter Schweißen versteht man eine unlösbare Verbindung zweier Bauteile.

Durch einbringen hoher Energieanteile in den Bereich der Fügezone z.B.: Erwärmen oder Reibung, werden die Bauteile lokal aufgeschmolzen, mit oder ohne Zusatzmaterial oder durch Druck miteinander verbunden.

Die hier erklärten Schweißtechnologien sind sehr moderne Fügeverfahren. Das Laserstrahlschweißen wird bei Bauteilen eingesetzt, die mit hoher Schweißgeschwindigkeit, schmaler und schlanker Schweißnahtform und bei geringen thermischen Verzügen gefügt werden sollen. Beim Reibschweißen ist die Relativbewegung und die Reibung zwischen den beiden Bauteilen für die Erwärmung verantwortlich. Der Wärmeeinfluss bleibt klein und die Bildung von Schmelze wird vermieden [8]. Die Fügezeit pro Teil und Schweißnaht ist als sehr kurz einzustufen.

4.1 Laserstrahlschweißen

In den letzten Jahren entwickelten sich Laser zu wichtigen Werkzeugen der industriellen Fertigung. Beim Laserschweißen am Leichtbauventil handelt es sich um Festkörperlaserstrahlschweißen, das auch als YAG-Laserschweißen (Yttrium – Aluminium – Granat, $\text{Y}_5 \text{Al}_5 \text{O}_{12}$) bezeichnet wird.

Hohe Prozessgeschwindigkeit und gute Schweißqualität, niedrige Wärmebelastung sowie die hohe Flexibilität sind wesentliche Vorteile des YAG-Laserschweißens. Der Einsatz von Robotern zur automatisierten Schweißung ist möglich, da der Laserstrahl aufgrund seiner kürzeren Wellenlänge über ein Lichtkabel geführt werden kann.

Es wird unter Schutzgas geschweißt, damit der Einfluss der Atmosphäre ausgeschlossen werden kann. Als Schutzgas hat man mit Argon und Helium sowie Gemischen mehrere Versuche gefahren, wobei sich mit Helium qualitativ hochwertigere Nähte ergaben. Trotz der vielen Versuche und Variationen der Schweißparameter ist es kaum gelungen, eine Versuchscharge mit 100% Fehlerfreiheit zu fertigen.

Abbildung 4-1 zeigt, dass einige Fehler, die vorhanden sind, laserspezifisch sind. Ein Beispiel hierfür ist die Prozesspore. Diese entsteht bei der Abkühlung der Schweißnaht, wenn sich die Dampfkapillare bei der Abkühlung einzuschnüren beginnt. Auf den

genauen Prozess der Entstehung wird auf die Literatur verwiesen [9]. Es entsteht eine Pore, die in manchen Fällen sehr groß werden kann ($d_{\text{Pore}} > 500\mu\text{m}$)

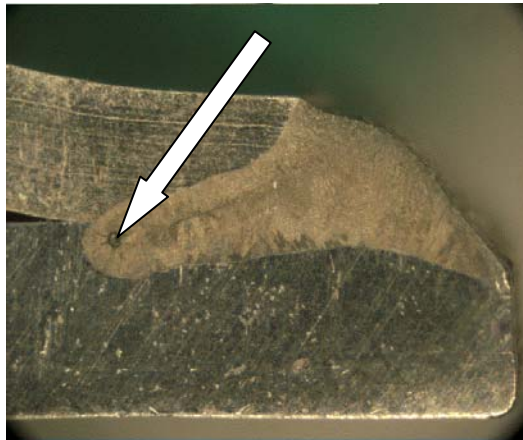


Abbildung 4-1 Prozesspore beim Laserschweißen am LBV (Schliffbild)

Um diese Nahtfehler zu vermeiden, gibt es sehr effiziente Lösungsansätze, wie z.B. Zweistrahl-Laser, wobei die Dampfkapillare aufgeweitet wird und das Gas dadurch ungehindert austreten kann. Eine weitere Möglichkeit ist die Erzeugung einer Doppelfaser mit Hilfe eines Doppelfokus oder eine Doppeloptik. Das bietet die Vorteile einer verbesserten Prozessstabilität, einer sichtbaren Verbesserung der Schweißnahtqualität und einen höheren Wirkungsgrad beim Schweißprozess. [10]

Die weiteren Fehler, die entstehen können, werden im Kapitel 5 näher beschrieben.

4.2 Reibschweißen

Das Reibschweißen gehört zu den Warmpressschweißverfahren. Es werden zwei Werkstücke an den Stoßflächen gegeneinander bewegt. Unter Ausnutzung der hierbei entstehenden Reibungswärme, sowie unter Anwendung von zusätzlicher Fügekraft werden die Bauteile vorzugsweise ohne Schweißzusatz verschweißt. Das bedeutet, dass beim Reibschweißen keine zusätzliche Wärme dem Prozess zugeführt wird. Vielmehr wird die beim Reiben entstehende Wärme dazu verwendet die Schweißprozesse zu beschleunigen, ohne dass die Fügepartner in den flüssigen Zustand übergehen [11].

Das Reibschweißen (RS) des Stopfens (VSE) ist als Standardprozess für konventionelle Bimetallventile abgesichert. Bimetallventile ermöglichen eine unterschiedliche Werkstoffwahl für Schaft und Endstück. Damit lassen sich hochfeste Ni-Basis-Werkstoffe mit härtbaren martensitischen Werkstoffen paaren. Das VSE erfährt hohe

Beanspruchung durch die Ventilbetätigung. Um an dieser Stelle Verschleiß zu vermeiden, werden die Ventilenenden aus einem härtbaren Stahl gefertigt. Beim LBV wurde aufgrund des (neuen) Schaftmaterials (2.4851) und der sehr geringen Schaftwandstärke eine Parameterentwicklung notwendig.

Die geplante Beschaffung einer neuartigen, vertikal arbeitenden Serien-Reibschweißmaschine bei der Fa. HWH, die sich, im Gegensatz zur etablierten Technologie der Fa. Kuka, durch besonders kurze Reibzeiten bei extrem hoher Drehzahl (ca. 23 800 min⁻¹) auszeichnet, war ausschlaggebend, das Fügen des VSE mit dieser Technik durchzuführen. Dieser Reibschweißmaschine wurde eine Natriumbefüllanlage der Fa. Heller vorgeschaltet.

Natrium dient bei Hohlventilen bzw. hohlgebohrten Ventilen für den Wärmetransport. Der niedrige Schmelzpunkt von Natrium (97,5°C) ermöglicht durch die Verflüssigung die Massenbewegung, die man auch als „Shaken“ bezeichnet, die Temperatur des Ventilkopfes um bis zu 150°C zu senken. Natrium ist bei Raumtemperatur zähflüssig, beim Erwärmen des Ventils verflüssigt sich das Natrium und gibt die Wärme, durch die Auf- und Abbewegung, an das Ventilende ab.

Das Reibschweißen hat den entscheidenden Vorteil gegenüber anderen Schweißverfahren, dass unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden werden können. Somit lässt sich Stahl mit Aluminium verschweißen, oder wie beim LBV, austenitisches Schaftmaterial mit einem vergüteten, martensitischen Schaftende verbinden. Die Parameterentwicklung für den Reibschweißprozess stellte sich als relativ schwierig dar, da sowohl die Wandstärken als auch die Materialfestigkeiten zwischen Rohr und VSE erheblich von konventionellen Hohlventilen abweichen. Schlussendlich konnte auf der Labormaschine bei HWH ein Parametersatz entwickelt werden, der eine sehr gleich bleibende, hohe Qualität der Verbindung sicherstellt. Die Rohrwandstärke und die VSE-Geometrie musste dazu angepasst werden [12].

In Abbildung 4-2 ist eine Seite der Reibschweißnaht zwischen Schaft und Ventilschaftende zu sehen. Die Schweißnaht ist optimal gerade ausgebildet, d.h. kein Auftulpen des Rohres. In der Wärmeeinflusszone ist ein eindeutiger Übergang von 2.4851 auf X45CrSi93 wichtig. Das Schliffbild zeigt in diesem Bereich keine unerwünschte Fadenbildung. Dieser ungewünschte Effekt entsteht, wenn der Reibdruck nicht passend auf die Reibschweißparameter abgestimmt ist.

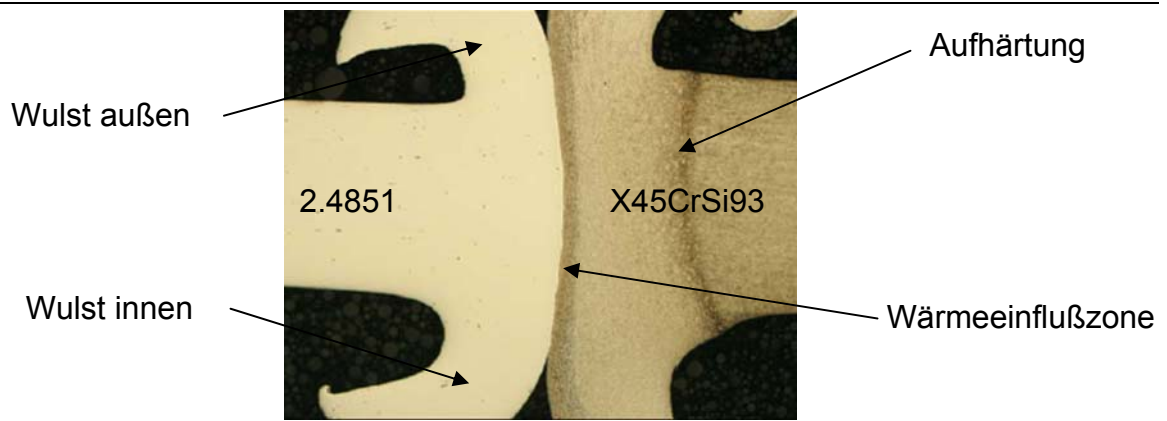


Abbildung 4-2 Schliffbild Reibschweißnaht (eine Seite)

Abbildung 4-3 zeigt ein Röntgenbild einer Reibschweißnaht mit geschliffenem Schaft. Durch den korrekten Fertigungsablauf ist die Wulstbildung des Materials gleichmäßig. Das VSE ist als gebohrte Variante links im Bild zu sehen.

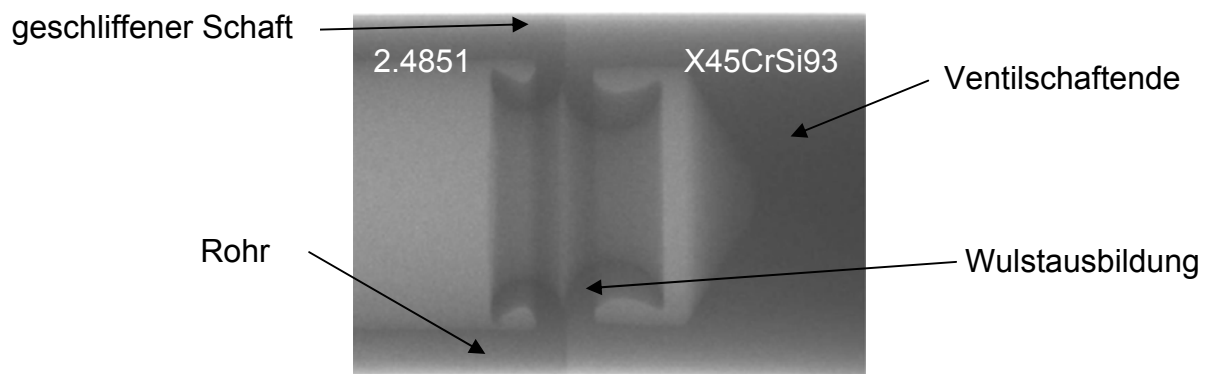


Abbildung 4-3 Röntgenbild Reibschweißnaht VSE

4.3 Schweißnähte am LBV

Das LBV besteht aus vier Teilen, Abbildung 4-4 zeigt die relevanten Schweißstellen am LBV für die Bauteilprüfung.

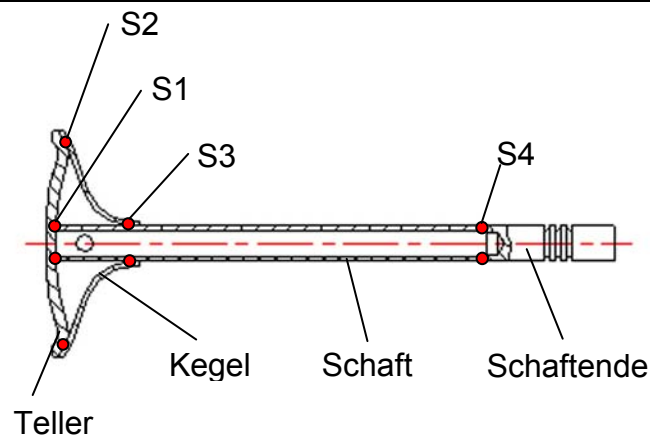


Abbildung 4-4 Verbindungsstellen (Quelle: Mahle Ventilttrieb GmbH)

Die Bezeichnung „S“ steht für Schweißung und die nachfolgende Ziffer für die Reihenfolge der Schweißnähte. Das Verbinden der jeweiligen Teile wird als Zusammenbau (ZB) bezeichnet.

Die Verbindungspunkte lassen sich wie folgt beschreiben:

- | | |
|--|-------|
| S1: Rohr gegen Teller; Kehlnahtschweißung | → ZB1 |
| S2: Kegel gegen Teller; Mix aus Kehl- und Überlappnaht mit Heftung | → ZB2 |
| S3: Kegel gegen Rohr; Kehlnahtschweißung | → ZB2 |
| S4: Schaftende gegen Rohr; Reibschweißnaht | → ZB3 |

Eine Kehlnaht ist eine Nahtform, die in der Schweißtechnik oft Anwendung findet. Die Schweißstelle entsteht, wenn die Werkstücke senkrecht zueinander stehen. Sie bedarf keiner besonderen Vorbereitung und ist daher einfach und wirtschaftlich herzustellen. Besonders bei dynamischen Belastungen ist die Kehlnaht zu bevorzugen [13].

Abbildung 4-5 zeigt den Aufbau einer Kehlnaht im Schnitt.

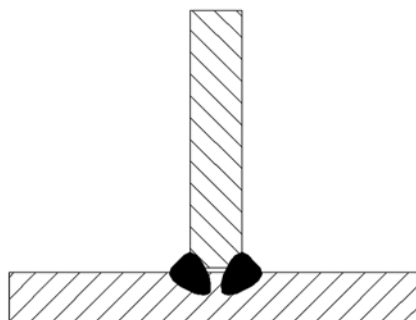


Abbildung 4-5 Kehlnaht

Bei einer Überlappnaht ragt ein Blech über das zweite. Im Übergangsbereich wird geschweißt. Diese Art der Nahtform wird beim LBV zum Heften verwendet.

In Abbildung 4-6 ist der Aufbau einer Überlappnaht zu sehen. Diese Art der Naht ist eine der einfachsten Formen, um zwei Teile miteinander zu verbinden.

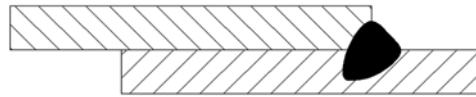


Abbildung 4-6 Überlappnaht (Schnittbild)

In den folgenden Unterkapiteln wird an jeder Schweißnaht näher auf die Ausführung und die zu erwarteten Fehler eingegangen. Dies erlaubt eine qualitative Beurteilung der erzeugten Schweißverbindung und ermöglicht eine bessere Einschätzung des Reifegrads.

4.3.1 Verbindung Teller/Rohr (ZB1)

Folgende Definitionen für die Ausführung (ZB1) wurden festgelegt:

- Mindestanbindung **60%** der Rohrstirnfläche **(A)**
- Tiefe der Anbindung von Rohr außen **$> 0,6 \cdot s_{\text{Rohr}}$** **(B)**
- **Porenanzahl $< 5\%$** in beliebiger Schnittebene der Schweißnaht, nur innerhalb des Bereichs **$< s_{\text{Rohr}}$** zulässig; runde Form – nicht gestreckt **(C)**
- Kehle zum Rohr und zum Teller hin tangential verlaufend **(D)**
- Endkratertiefe **$< 0,2\text{mm}$** (bzgl. Nahtkonturen an 180° gegenüberliegenden Seite)
- Durchbrennen ins Rohr (d.h. Materialeinfall) vermeiden **(E)**

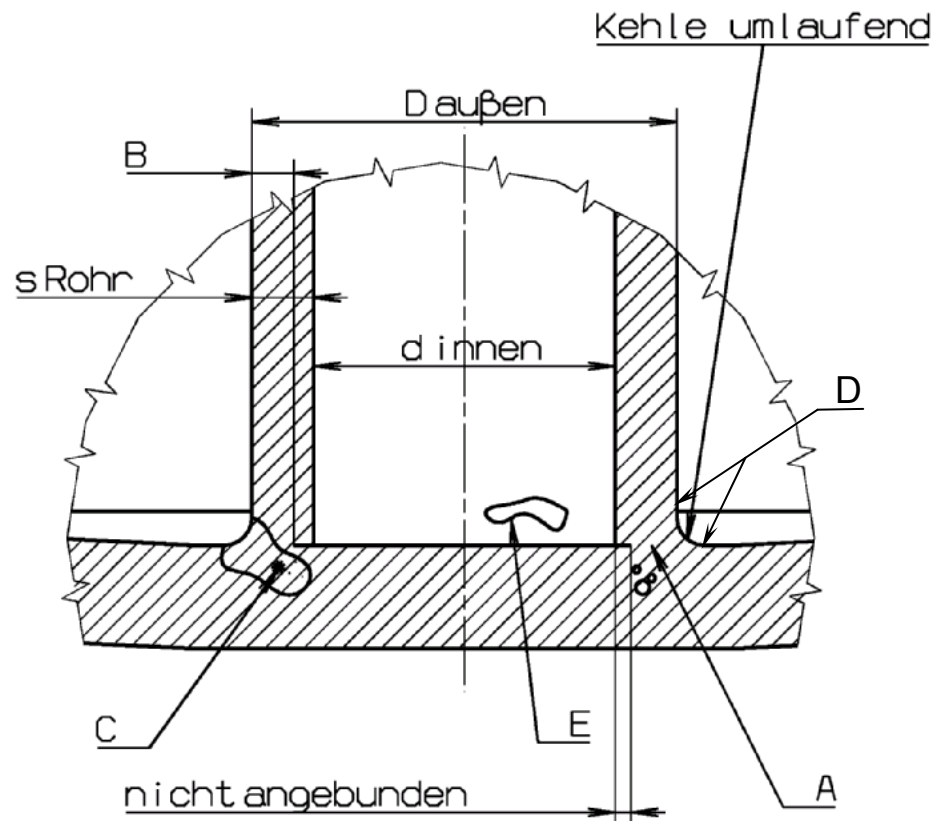


Abbildung 4-7 ZB1; Schweißdefinitionen Teller/Rohr

Die Verbindung ZB1 wird als nicht kritisch eingestuft. In den Versuchen und Dauerläufen kam es wegen dieser Schweißnaht bei Ventilen kleiner 40mm Tellerdurchmesser nie zu Ausfällen. Jedoch ist mit Fehlern zu rechnen, wie Poren in der Schweißnaht und Kerben an der Oberfläche. Die Kerben werden als potentielle Schadensquelle eingestuft. Man ist bemüht, durch Verändern der Schweißparameter bzw. durch eine Oberflächenbehandlung die Kerben zu verhindern. Kerben bedeuten bei der wechselnden Belastung immer Spannungsspitzen, die die Ursache für mögliche Risse darstellen.

Abbildung 4-8 zeigt ein ungeätztes Schliffbild der Teller-Rohr-Verbindung an einer Seite. Das Schweißgefüge ist gleichmäßig ausgebildet, die Schweißnaht entspricht den Kriterien der Freigabe. Die Naht ist an der Außenseite etwas eingefallen, jedoch der Übergang (siehe auch D in Abbildung 4-7) ist tangential ausgeführt.



Abbildung 4-8 Schweißverbindung Teller/Rohr (eine Seite), ungeätzter Längsschliff

4.3.2 Verbindung Teller/Kegel (ZB2)

Folgende Definitionen wurden festgelegt:

- Anbindungsbreite (**V**) **min. 1,5·Blechstärke** des Kegels (**X**)
- **Poren < 2%** in beliebiger Ebene, **max. $D_{\text{Pore}} = 150 \mu\text{m}$** , nur im Bereich der innenliegenden **33%** der Schweißnaht zulässig und nicht scharfkantig (lunkerartig) (**A $\geq 2/3 \cdot V$**)
- Nahtwulst konvex am ganzen Umfang (**B**) und zum Kegel gerundet verlaufend, ohne Aufwurf auf der Kegeloberseite (**C**)
- Endkratertiefe **< 0,3 mm**
- Rissfreiheit der Naht
- Innenliegende Bindefehler an der Trennfläche zwischen Kegel und Teller bis zu 0,3 mm Breite zulässig

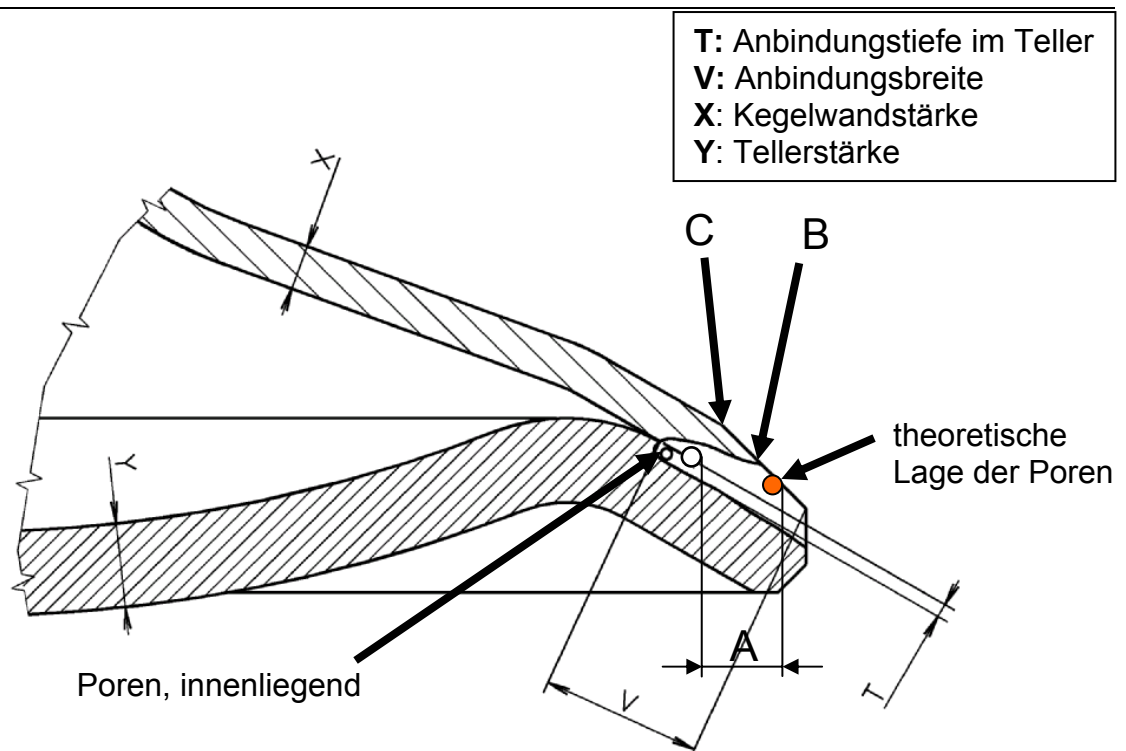


Abbildung 4-9 ZB2; Schweißdefinition Teller/Kegel; bearbeitete Form

Bei der Herstellung der Prototypenteile und im Versuchsbetrieb stellt sich diese Naht als die kritische Naht am LBV dar. Es ist darauf zu achten alle Vorgaben bezüglich Nahtausführung einzuhalten.

Der Ablauf der Schweißung erfolgt in zwei Phasen. Die erste Phase beinhaltet das Heften, dabei kommt ein ringförmiger Niederhalter zum Einsatz, der am äußeren Umfang mit einer definierten Kraft auf den Kegel drückt. Danach erfolgt eine zweite Schweißung mit höherer Leistung des Lasers.

Die Schweißnaht weist über dem Umfang verteilt Poren auf, die in Größe und Anhäufung stark schwanken. Es muss auch mit vertikalen Heißrissen gerechnet werden. Jedoch zeigte sich in mehreren Versuchsreihen, dass eine geringe Einschweißtiefe die vertikalen Risse reduziert.

Eine hohe Ausschussrate zeigten Ventile mit Poren am Ventilsitz bei der Fertigbearbeitung. Die Fehler liegen meist knapp unter der bearbeiteten Sitzfläche und werden durch die Bearbeitung oder Verschleiß freigelegt. Es kommt zu einem Spülen der Pore beim Gaswechselvorgang und somit zu einer undichten Stelle am Ventil.

4.3.3 Verbindung Rohr/Kegel (ZB2)

Die folgenden Definitionen für die Ausführung (ZB2) wurden festgelegt:

- Anbindungsbreite (**A**) in jedem Schnitt größer als 1,1-mal die dünnere (**X**) der beiden Einzelteile – Blechstärken: $A > 1,1 \cdot X$
- Tiefe der Anbindung (**B**) im Rohr: $0,2 \cdot s_{\text{Rohr}} < B - X < 0,5 \cdot s_{\text{Rohr}}$
- Poren $< 2\%$ in jeder Ebene, max. $D_{\text{Pore}} = 100 \mu\text{m}$, nicht tiefer als $0,5 \cdot s_{\text{Rohr}}$ von außen und nicht scharfkantig (lunkerartig) (**C**)
- Naht zum Rohr und zum Kegel tangential verlaufend ohne Wulst (**D**)
- Endkratertiefe $< 0,2 \text{ mm}$ (bzgl. Nahtkontur an 180° gegenüberliegender Seite)
- kein Durchbrand (Aufwurf!) ins Rohr zulässig (**E**)
- Zungentiefe (**Z**) begrenzt: $Z < 0,4 \cdot X$ zur Vermeidung von Poren; innen und außen Verfärbung durch Wärmeeinfluss zulässig.

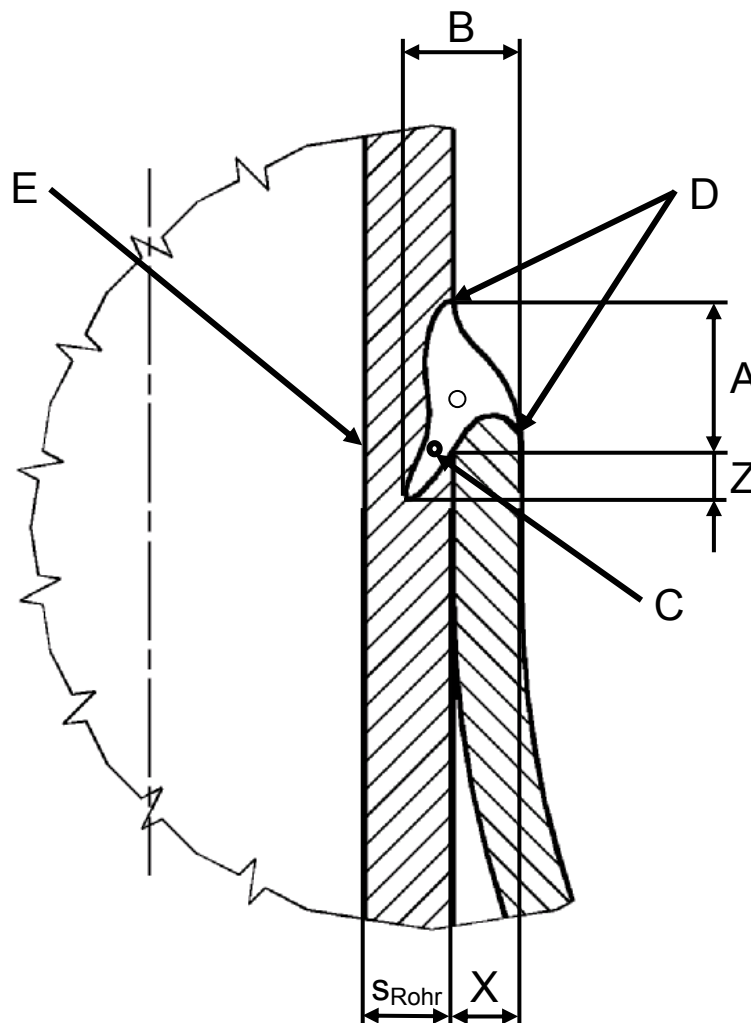


Abbildung 4-10 ZB2; Schweißdefinition Rohr/Kegel

Die Schweißung Rohr/Kegel weist keine kritischen Fehler auf. Mit Porenbildung ist in der Regel nicht zu rechnen. Durch das notwendige Spiel zwischen Rohr und Kegel kann es beim Schweißen durch eine minimale Deachsierung zu unerwünschten großen Spaltmaßen kommen. Dies bewirkt im Bereich der Wurzellage eine erhöhte Kerbwirkung und kann zu Rissen führen. Mit demselben Effekt ist bei zu tiefem Einschweißen zu rechnen. Das Spaltmaß vergrößert sich aufgrund der Kegelgeometrie und es kommt zur Kerbenbildung.

Um eine definierte Mindestwandstärke zu erreichen, muss die Schweißnaht konvex ausgebildet sein. Es ist wichtig, dass die Schweißnaht tangential in Rohr und Kegel einlaufen, da sonst die Gefahr einer Kerbenbildung besteht. Das leichte Einfallen der Naht stellt kein Problem dar.

Abbildung 4-11 zeigt eine fehlerfreie Schweißanbindung. Kegel und Rohr zeigen keine sichtbaren Veränderungen in Form und Gefüge. Der tangentielle Übergang der Schweißnaht in das Rohr ist ohne Einkerbung.

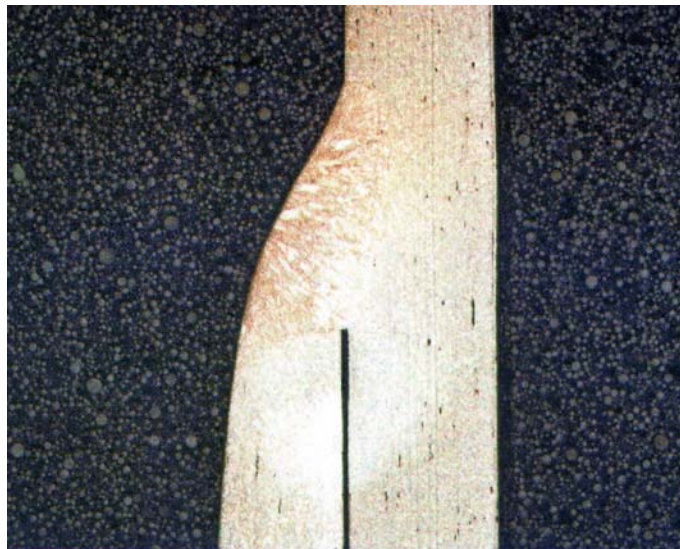


Abbildung 4-11 Schweißverbindung Kegel/Rohr (eine Seite), geätzter Längsschliff

4.3.4 Verbindung Rohr/Ventilschaftende (ZB3)

Definition zur Reibschweißqualität:

- Schweißnaht mit gerader Ausbildung (A)
- kein Auftulpen des Rohres (B)
- keine Fahnenbildung (C) zulässig

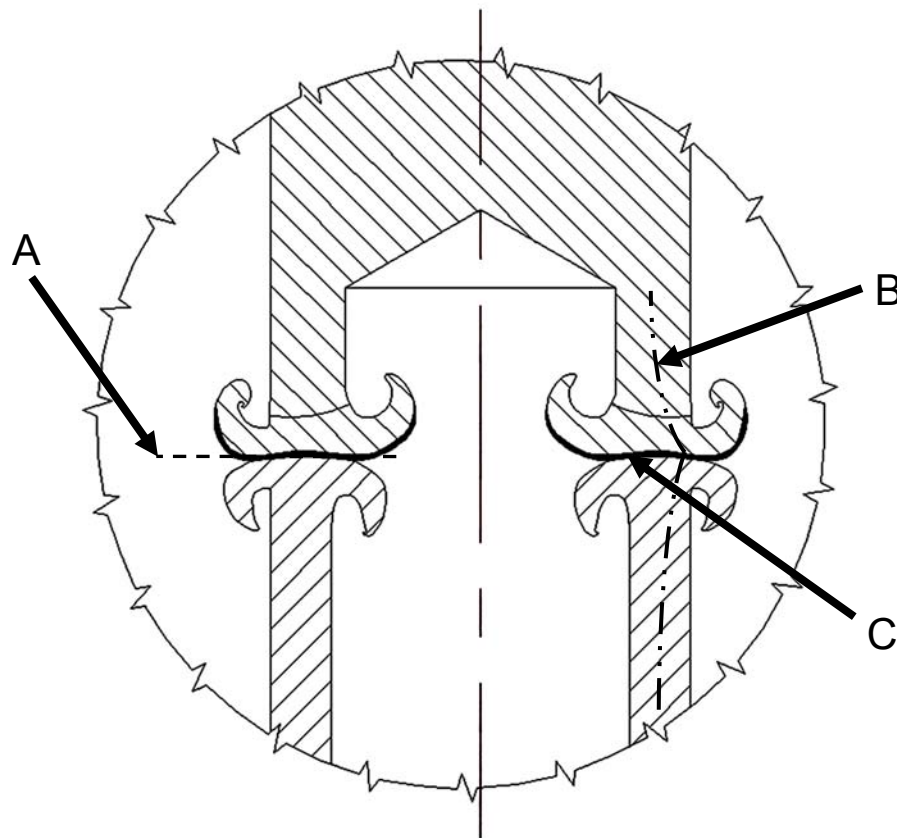


Abbildung 4-12 ZB3; Schweißdefinitionen Reibschweißnaht

Eine Erklärung des Reibschweißverfahrens befindet sich am Anfang des Kapitels. Das Reibschweißen wird als nicht kritisch eingestuft und ist durch Erfahrungen im konventionellen Reibschweißen abgesichert. Trotz der hohen Sicherheit bei diesem Verfahren kann es zu Fehlern kommen. Die am meist beobachteten Fehler sind Auftulpen des Rohres und schlechte Anbindung. Beide Probleme hat man durch Parameterstudien in den Griff bekommen.

In Abbildung 4-13 sieht man den Bereich der Reibschweißnaht mit gebohrten Stopfen. Das Rohr, wie auch der Stopfen sind leicht aufgetulpt, siehe Strich-Punktierte Linie. Die Schweißnaht ist symmetrisch und zeigt eine gute Anbindung. Im rechten Bild sieht man den Bereich der Wärmeeinflusszone vergrößert dargestellt. Der Übergang zwischen Rohr und Stopfen ist geradlinig ausgebildet und weist keine Verunreinigungen auf.

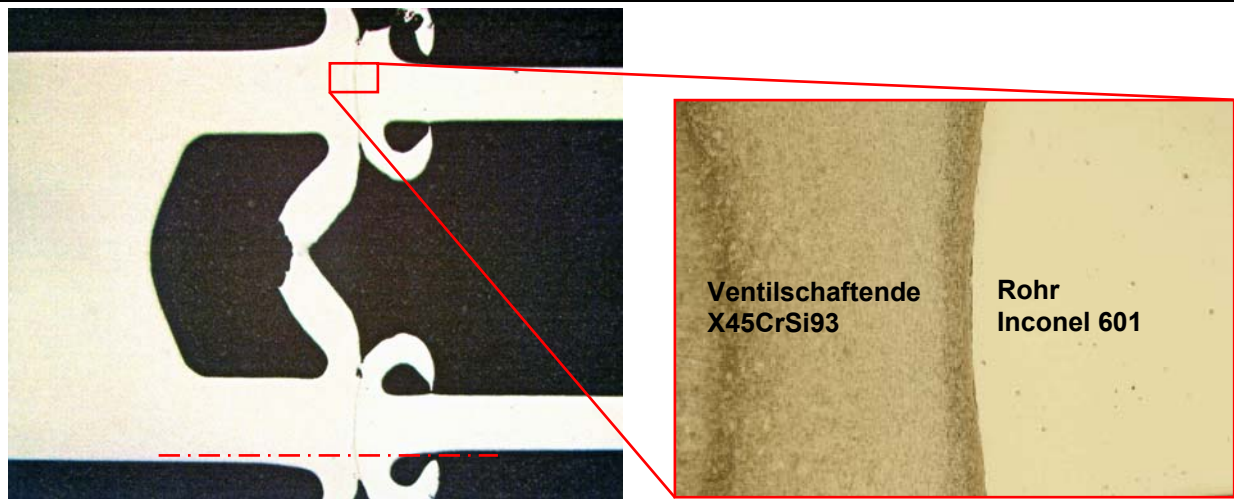


Abbildung 4-13 Übersicht Reibschweißnaht (links) mit leicht getulpten Ventilschaftende, Detail Reibschweißnaht (rechts), Längsschliff geätzt

5. Schweißfehler am LBV

Für die Erkennung von Fehlstellen beim Prüfen der einzelnen Ventile ist es notwendig, alle Fehler, die beim Schweißen entstehen können, zu definieren und einzuteilen. Eine Vermeidung von Fehlern wird hier nicht beschrieben. Dieses Thema wird parallel in einer weiteren Diplomarbeit behandelt. Die zu untersuchenden Fehler werden in den jeweiligen Schweißnähten betrachtet.

Die meisten Schweißfehler sind laut Literatur auf eine unsachgemäße Fertigung zurück zu führen [14]. Diese Problematik trifft nicht auf das LBV zu, da hier Materialien miteinander verschweißt werden, die als schwer schweißbar gelten.

Im vorigen Kapitel sind bereits die verschiedenen Schweißfehler am Ventil erklärt worden. Um detailliert Informationen zum Thema Schweißfehler zu bekommen, wird auf die einzelnen Fehler näher eingegangen.

In der Entwicklung des Leichtbauventils sind folgende Fehler von besonderem Interesse:

- Anbindungsfehler
- Poren
- Heißrisse/Kaltrisse
- Lunker
- Löcher
- Durchbrand

- Anrisse (besonders Kegel/Rohr)
- Kerben

Einige dieser Fehler sind beherrschbar und eliminiert, jedoch sind einige Probleme noch nicht gelöst. Die kritischen Fehler sind Poren, Kerben und Risse.

Um einen Überblick über auftretende Fehler nach ihrer Entstehungsursache zu bekommen, sind in Abbildung 5-1 Fehler strukturiert aufgelistet.

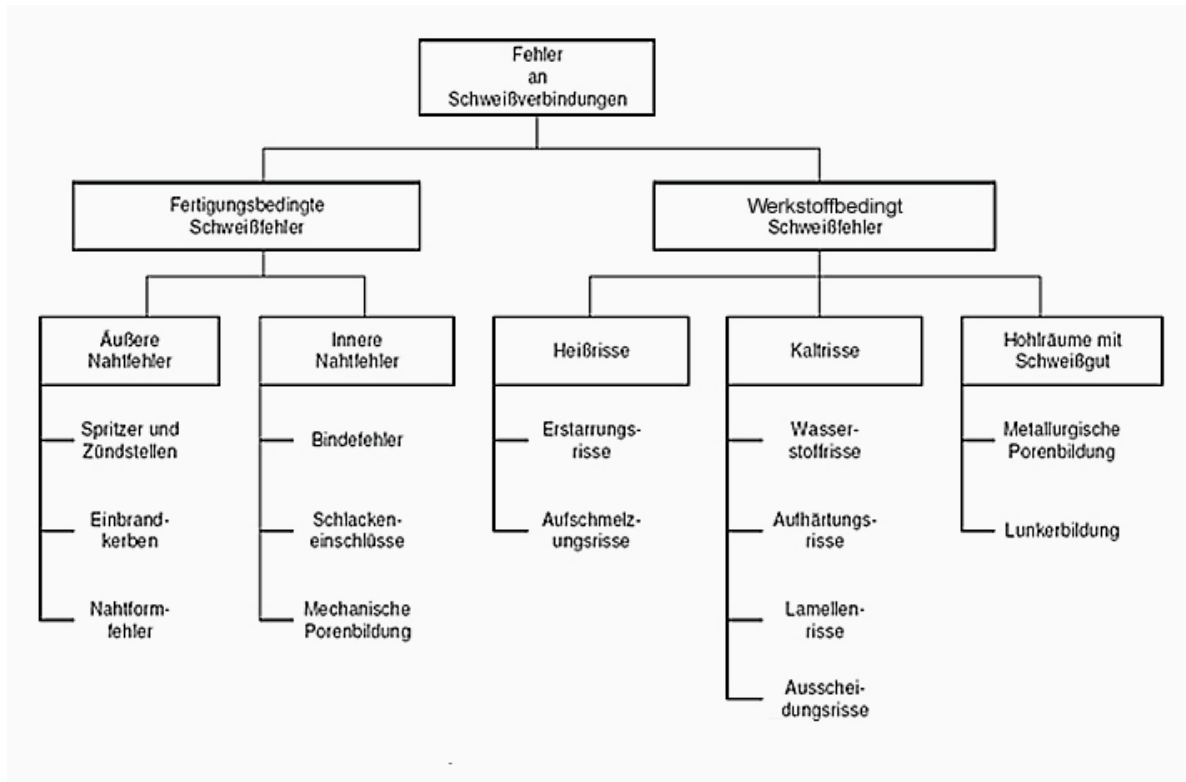


Abbildung 5-1 Fehler an Schweißverbindungen (Quelle: ISF Aachen,2002)

5.1 Poren

Poren sind im Gegensatz zu Bindefehlern aufgrund der kugelähnlichen Form wenig kritisch. Vorausgesetzt wird, dass eine bestimmte Größe nicht überschritten wird und dass sie vereinzelt auftreten. Eine Kettenreihung von Poren stellt einen kritischen Zustand dar, dabei kann die Verbindung so geschwächt sein, dass hier eine Art „Sollbruchstelle“ entsteht.

In Abbildung 5-2 sieht man zwei Röntgenbilder einer Sitznaht. Das linke Bild zeigt ein Ventil mit vereinzelt Poren und die rechte Abbildung einen Sitzbereich mit Kettenporen. Versuche zeigten, dass das linke Ventil den Belastungen standhält.

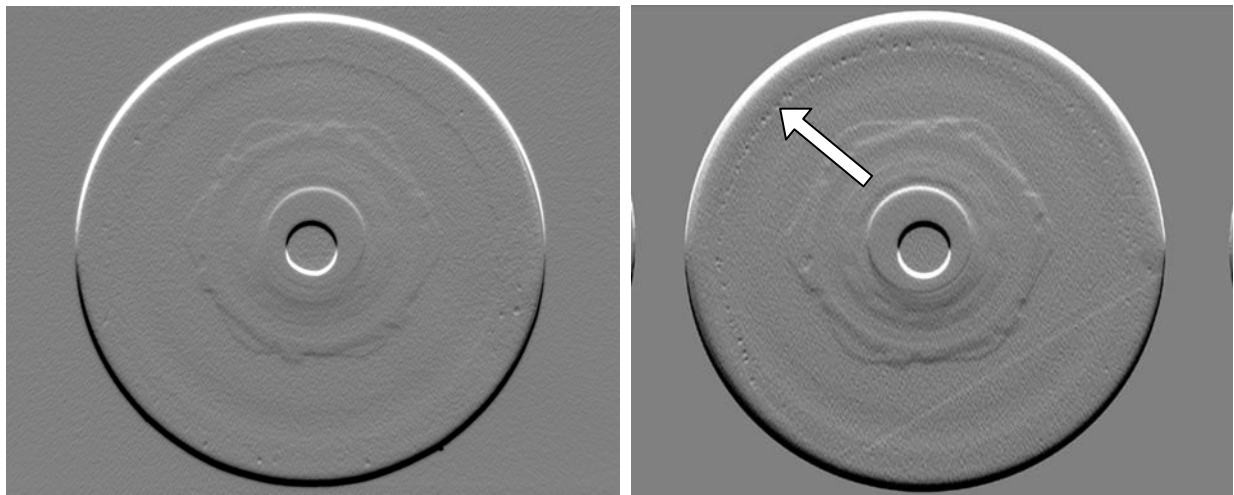


Abbildung 5-2 Röntgenbilder (gefiltert); links vereinzelte Poren, rechts Kettenporen

Die Bildung von Hohlräumen beim Schweißen kann zwei wichtigen Möglichkeiten unterliegen, der mechanischen und der metallurgischen Porenbildung[15].

Ein typischer Fall für *mechanische Porenbildung* stellt das Überschweißen eines Hohlraumes dar. Durch das Einbringen der Schweißwärme beim Überschweißen erfolgt eine starke Ausdehnung des Gases in der Pore, es bildet sich eine Gasblase im flüssigen Schweißgut. Die Erstarrung erfolgt so schnell, dass die Blase nicht an die Oberfläche entweichen kann, so verbleibt ein Hohlraum im Schweißgut.

Bei *metallurgischer Porenbildung* kommt es als Folge der erhöhten Löslichkeit im flüssigen Zustand zum starken Lösen von Wasserstoff am Phasenübergang Stahlschmelze-Kristall. Die Löslichkeit erhöht sich dort sprunghaft, d.h. die Schmelze kann bei gleich bleibender Temperatur ein vielfaches an Wasserstoff als der sich bildende Kristall aufnehmen [16]. Ein weiterer Faktor für die Bildung von Poren ist Sauerstoff. Diese Produkte entstehen durch Verunreinigungen an der Schweißstelle oder durch eine unzureichende Schutzgasmenge.

5.2 Kerben

Die Definition einer Kerbe ist nicht eindeutig festgelegt, denn offenliegende Poren, die z.B. durch spanabhebende Bearbeitung entstehen, werden im eigentlichen Sinne nicht mehr als Pore bezeichnet, sondern als Kerbe. Durch die Bearbeitung entstehen, am Umfang der Fehlerstellen, Kanten, an denen Spannungsspitzen zu erwarten sind.

Am LBV ist an den Schweißnähten Teller/Rohr, Teller/Kegel und Kegel/Rohr mit Kerben zu rechnen. Es entstehen grundsätzlich drei Kerben an der Naht Teller/Rohr, zwei Kerben sind schweißbedingt und die Dritte konstruktionsbedingt.

In Abbildung 5-3 sieht man ein Schliffbild eines Ventils mit Riss. Die erste Kerbe entsteht direkt am Gefügewechsel zwischen Schweißgut und Tellermaterial (siehe Riss). Sie entsteht durch die Bildung einer Wärmeeinflusszone mit sich ändernden Materialeigenschaften, lokalen Ansammlungen leichter schmelzender Phasen und einer höheren Abkühlgeschwindigkeit als in der Raupe. Die zweite Kerbe ist in der Kehle der Schweißnaht (Radienmitte). Die Entstehung dieser Kerbe ist noch nicht eindeutig klar, eine plausible Erklärung ist, dass die Leistungsverminderung am Ende der Schweißung ein „Offenlassen“ der Dampfkapillare (Keyhole) bewirkt. Die dritte Kerbe ist eine konstruktiv bedingte Kerbe, sie entsteht an der Innenseite des Rohres. Da vermieden werden soll, dass Kerben im Grundmaterial des Tellers entstehen, wird dort nicht ganz durchgeschweißt. Sie stellt eine Trennfläche zwischen Rohr und Kegel dar.

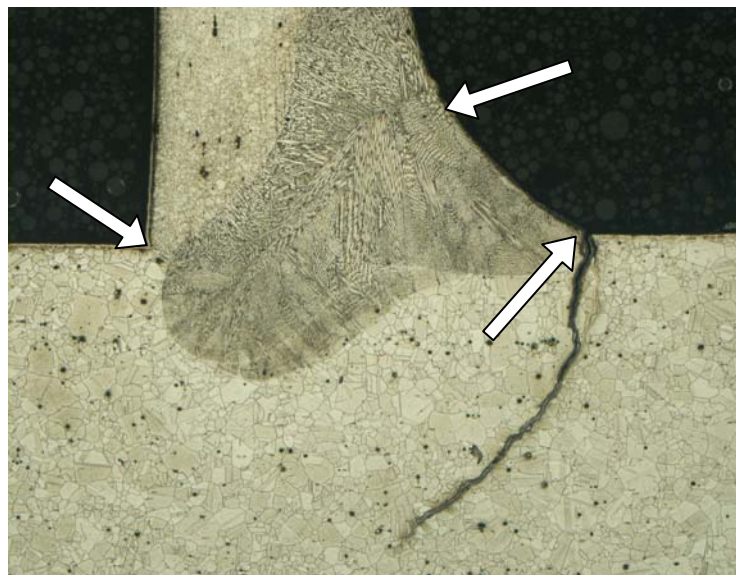


Abbildung 5-3 Kerbenbildung Teller/Rohr mit Riss durch Überlastung

Die Kerben an Teller/Kegel und Teller Rohr sind geometrisch bedingt.

In Abbildung 5-4 sieht man diese beiden Stellen, links die Verbindung Teller/Kegel und rechts Kegel/Rohr.

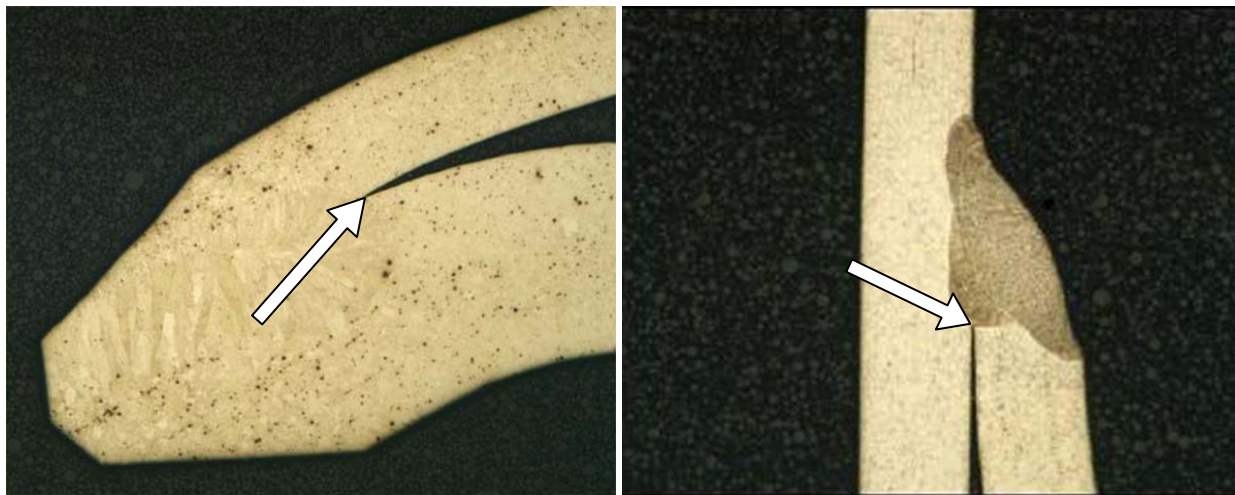


Abbildung 5-4 geometrische Kerbenbildung an Teller/Kegel (link) und Kegel/Rohr (rechts)

Kerben sind Ausgangspunkte potenzieller Risse. Nach Erkenntnissen des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit „IBF“ in Darmstadt ist die Kerbe an sich für Versagen unter zyklischen Lasten verantwortlich. Die drei hier vorhandenen Kerben an den Schweißnähten Teller / Rohr, Teller / Kegel und Kegel / Rohr lassen sich mit dieser Methode betrachten. Problematisch ist dabei vor allem, dass es fast keine Materialwerte für die Bruchmechanik gibt. Einige Vergleiche verschiedener Geometrien konnten damit angestellt werden, aber eine a-priori-Auslegung ist nicht möglich.

5.3 Risse

Die Einteilung der Risse erfolgt gemäß der Norm DIN 8524, Teil 3. In diesem Teil der Norm, im Gegensatz zu den ersten beiden Teilen, werden die Risse nicht nur nach dem Erscheinungsbild, sondern auch nach ihrer Entstehung unterschieden. Am LBV ist im Bereich der Sitznaht mit Heißrissen zu rechnen.

In Abbildung 5-5 sieht man die Zuordnung der möglichen Rissformen während des Schweißwärmezyklus.

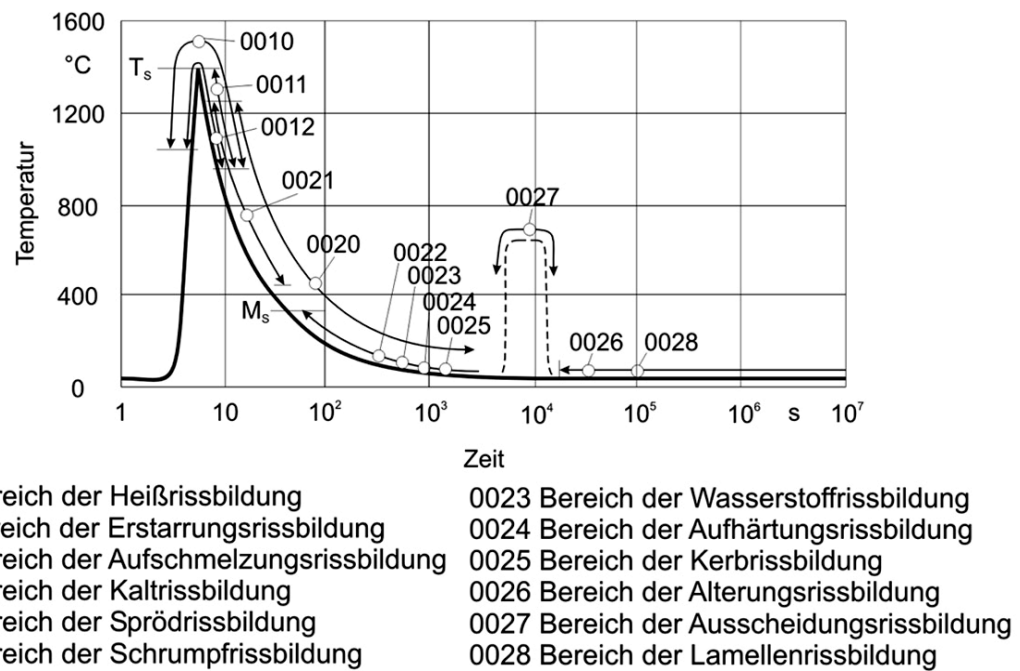


Abbildung 5-5 Rissbildung beim Schweißen von Stahl (Quelle: ISF Aachen, 2005)

Die Bildung von Heißrissen hat unterschiedliche Einflussfaktoren:

- Schwefel und Phosphor
- Raupenform
- Seigerung

Heißrisse bei Stahl werden besonders durch Schwefel und Phosphor gefördert, diese bilden mit Eisen niedrigschmelzende Phasen (Eutektikum Fe-S bei 98°C). Diese Elemente seigern sehr stark, am Ende des Kapitels wird die Thematik des Seignerns näher erklärt.

Die Schweißnahtgeometrie hat einen besonderen Einfluss auf die Heißrissneigung. Bei schmalen, tiefen Nähten erfolgt die Kristallisation von allen Seiten der Raupe, dabei wird Restschmelze in der Nahtmitte eingeschlossen. Bei der Abkühlung zieht sich das Material zusammen und die entstehende Schrumpfspannung kann Heißrisse verursachen. Bei flachen Raupen erstarrt die Restschmelze an der Oberfläche der Raupe, die Rissbildung ist gering.

In Abbildung 5-6 sieht man einen Heißriss im Bereich der Sitznaht. Diese kritischen horizontalen Risse haben in der Vergangenheit bei Versuchen zu schweren Schäden geführt. Durch geeignete Niederhalter und eine geänderte Schweißfolge konnte dieses Problem eliminiert werden.

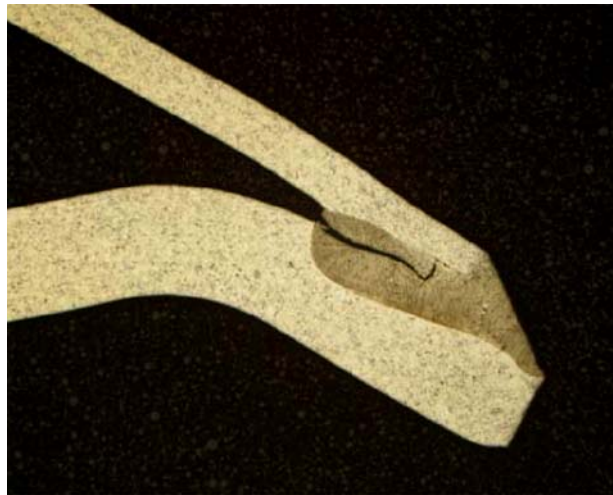


Abbildung 5-6 Heißriss im Bereich Sitznaht

Die Thematik der *Seigerung* ist ein großes Gebiet in der Werkstoffkunde. Es soll hier nur in stark vereinfachter Weise erklärt werden, um den Mechanismus der Heißrissbildung zu verstehen.

Die Seigerung ist eine Entmischungserscheinung. Sie entsteht beim Übergang der Schmelze in den festen Zustand. Die Legierungselemente, die ehemals gleichmäßig verteilt vorlagen, werden konzentriert und es bilden sich am Ende der Erstarrung stark angereicherte Kristalle. Der Schmelzpunkt liegt wesentlich niedriger gegenüber den zuerst erstarrten Kristallen. Diesen Konzentrationsunterschied zwischen den zuerst und den zuletzt erstarrten Kristallen nennt man Seigerung.

6. Prüfverfahren

Die Prüftechnologie ist für die Ingenieurwissenschaft ein grundlegendes Werkzeug zur Optimierung der Entwicklungen.

Wenn man den Begriff Prüfen hört denkt man automatisch an das Messen von Größen. Dieser Gedankenschritt ist im Grunde genommen auch korrekt, jedoch ist das Prüfen tief greifender als das Messen. Die Definition soll dies verdeutlichen.

Definition Messen/Prüfen:

„*Messen* ist das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich einer physikalischen oder technischen Größe (Messgröße) mit einer Einheit; der Messwert wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit der Messgröße angegeben.

Der übergeordnete Begriff *Prüfen* umfasst auch die Beurteilung, ob Merkmale von Untersuchungsobjekten, vorgegebenen Anforderungen entsprechen [5].“

Der Begriff Prüfen wird in der Technik in verschiedene Methoden unterteilt.

Abbildung 6-1 zeigt die Unterteilung der Prüfverfahren, die in zwei Hauptgruppen erfolgt. In die zerstörenden Prüfverfahren und in zerstörungsfreien Prüfverfahren. Weiters wird das zerstörungsfreie Prüfen in volumetrische Verfahren und Oberflächenprüfverfahren aufgeteilt.

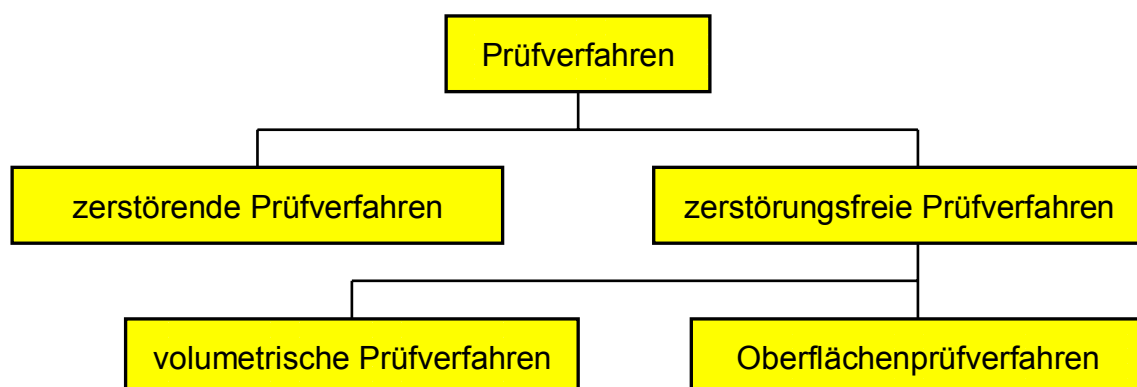


Abbildung 6-1 Unterteilung der Prüfverfahren

6.1 Allgemeine Prüfverfahren

Die Prüfverfahren unterteilt man grundsätzlich in zwei Hauptgruppen, in die zerstörenden und in die zerstörungsfreien Messmethoden.

Es wird bei den *zerstörenden Prüfverfahren* (ZP) zwischen mechanischen, technologischen und chemischen Prüfverfahren unterschieden. Ein sehr weit verbreitetes ZP ist der Zugversuch, die Probe wird auf Zug belastet bis die Streckgrenze erreicht wird. Danach schnürt sich die Probe ein und reißt ab, die gemessene Kraft ist ein Indiz für die Materialeigenschaften des Werkstoffs [17].

Die *zerstörungsfreien Prüfverfahren* (ZfP) werden vornehmlich im Bereich der Qualitätssicherung in der Produktion als Fertigungs-, Eingangs- und Abnahmeprüfung angewendet. Je nach Sicherheitsanforderungen erfolgt eine Stichprobenüberprüfung oder eine 100%-Prüfung.

Konventionelle Ventile werden in der Produktion zu 100% geprüft, auch die Leichtbauventile sollen nach demselben Prinzip überprüft werden.

6.1.1 Volumetrische Prüfverfahren

Der Begriff volumetrische Prüfverfahren gilt für alle ZfP die sich mit der Struktur des Gefüges und den auftretenden Fehlern im Material beziehen, z.B. Poren. Die namhaften Vertreter sind Radiographie, Ultraschall und Wirbelstrom.

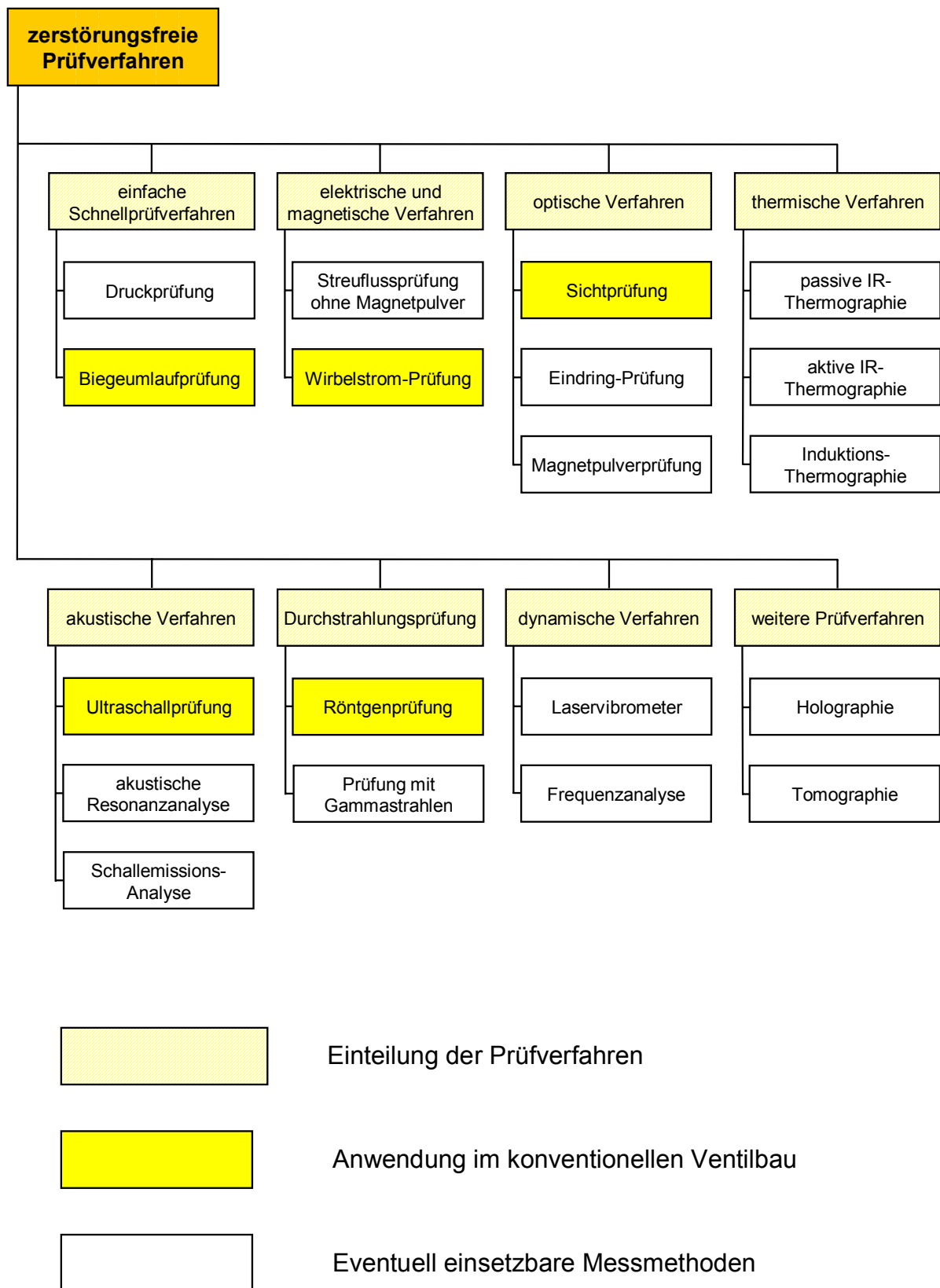
6.1.2 Oberflächenprüfverfahren

Die Oberflächenprüfverfahren eignen sich für das visuelle Erkennen von Fehlern. Bei der automatischen Prüfung sind die optischen Verfahren zu betrachten z.B. Farbeindringprüfung.

6.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – die Auswahl

Es werden eine Reihe von ZfP vorgestellt und näher beschrieben, die für das LBV eine mögliche Serienprüfung darstellen könnte.

In Abbildung 6-2 sieht man die Einteilung der Prüfverfahren nach den physikalischen Prinzipien. Die farblich unterlegten Verfahren finden bei der Firma Mahle bereits Anwendung in der Produktion der konventionellen Ventile.

**Abbildung 6-2**

Einteilung der zerstörungsfreien Prüfverfahren

6.2.1 Einfache Schnellprüfverfahren

Bei den Schnellprüfverfahren werden adoptierte Lösungen, die in der ZfP des Ventilbaus keine Anwendung finden, behandelt. Die zwei Verfahren sind einfache Möglichkeiten um eine schnelle Aussage mit geringem Aufwand zu machen.

6.2.1.1 *Druckprüfung*

Die Druckprüfung wird z.B. für die Untersuchung von Gasflaschen eingesetzt. Meist in Verbindung mit einer Schallemissionsuntersuchung werden die Behälter auf tiefe Risse und Fehler sowie ungenügende Zähigkeit untersucht [18].

Es soll mit einem inkompressiblen Medium der Hohlraum des LBV gefüllt und unter Druck gesetzt werden. Das unter Druck befindliche Ventil wird sich ähnlich verhalten wie eine unter Druck stehende Gasflasche. Durch dieses Verfahren werden folgende Vorteile erwartet:

- Verminderung der Ausfallswahrscheinlichkeit
Durch den hohen Druck werden Anbindungsfehler entdeckt. Wenn sich ein Riss im Bereich der Scheißnähte befindet, tritt aus diesem Flüssigkeit aus und ein Druckabfall macht sich bemerkbar. Dieser grobe, unvorhersehbare Mangel hätte fatale Folgen bei den mit Natrium gefüllten Ventilen. Das Natrium würde sich nach einiger Zeit verflüchtigen und es käme zu einem Überhitzen des Auslassventiles. Der Werkstoffe könnte den thermischen Belastungen nicht mehr standhalten. Ein Motorschaden wäre die Folge.
- Abbau von Eigenspannungen
Durch die Fertigung, vor allem durch das Kaltumformen und Schweißen, können im Ventil Eigenspannungen bis zur Höhe der Streckgrenze vorhanden sein. „Durch die Überlagerung der Spannungen zufolge der ersten Druckprobe kommt es zu plastischen Verformungen, die einen Abbau von Eigenspannungen verursachen. Im Falle von lokalen Kerben können durch die Druckprobe günstige Druckeigenspannungen aufgebaut werden.“ [18]

Ein Nachteil der Druckprüfung ist das vollständige Entleeren des Druckprobenmediums, da Natrium mit einigen Flüssigkeiten (z.B. Wasser) chemisch reagiert.

Die Druckprüfung wird auch als integrale Prüfmethode bezeichnet. Das heißt, dass einerseits die gesamte Struktur geprüft wird, und dass andererseits auch Fehler ge-

funden werden können. Sie ist einfach anwendbar und leicht wiederholbar. Es lässt sich zwar nicht die Position der Fehler bestimmen, aber eine Aussage, fehlerhaft oder nicht, kann getroffen werden.

6.2.1.2 *Biegeumlaufprüfung*

Dieses Prüfverfahren findet bei der Prüfung von konventionellen Bimetallventilen Anwendung.

Bei Bimetallventilen bestehen der Schaft und das VSE aus zwei unterschiedlichen Materialien. Diese werden durch das Reibschweißverfahren mit einander verbunden. Bei der Biegeumlaufprüfung wird das Schaftende des Ventils eingespannt und in Drehung versetzt. In einem definierten Abstand drückt eine Rolle mit einer Prüfkraft gegen das Ventil und biegt es. Die Freigabe erfolgt nach einer vorgegebenen Auslenkung, die ohne Schädigung erreicht werden muss.

Die Biegeumlaufprüfung kann auch beim LBV zum Einsatz kommen. Durch eine leicht modifizierte Spannvorrichtung und anderen Auslenkwerten lässt sich dieses Verfahren sehr einfach übernehmen. Die Prüfdrehzahlen von 400 - 600U/min können übernommen werden und die Prüfzeiten von 2.-3 Sekunden sind äußerst kurz.

6.2.2 Elektrische und magnetische Verfahren

6.2.2.1 *Streuflussprüfung ohne Magnetpulver*

Das Magnetpulververfahren zählt zu den etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren und ermöglicht einen Nachweis rissartiger Defekte in ferromagnetischen Werkstoffen. Eine automatisierte Durchführung der Magnetpulverprüfung ist in vielen Fällen möglich. Jedoch sind der Automatisierbarkeit Grenzen gesetzt, da sich in lokalen Vertiefungen der Probe (z.B. Verzahnungen) eine verschlechterte Unterscheidbarkeit der Fehleranzeigen vom Störhintergrund ergibt. Darüber hinaus setzt die Magnetpulverprüfung eine Benetzung der Proben mit dem Prüfmittel voraus, welches dann später durch geeignete Reinigungsschritte wieder entfernt werden muss.

Die magnetische Streuflussprüfung mittels hochempfindlicher Magnetfeldsonden stellt eine zerstörungsfreie, saubere und schnell arbeitende Alternative zur Magnetpulverprüfung dar. Sie bietet ein hohes Maß an Automatisierbarkeit auch in solchen Fällen, wo die Magnetpulverprüfung nur mit hohem Kostenaufwand automatisierbar wäre. Unter Einsatz dicht belegter Sensorarrays in Form von Zeilen oder Flächen

aus vielen Einzelsensoren ist eine hohe Prüfgeschwindigkeit auch an komplizierten Geometrien zu erzielen [19].

Ein Magnetfeldsensor wird computergesteuert über die zu prüfende Oberfläche hinweg bewegt. Die Probe muss zuvor einem hohen Magnetfeld ausgesetzt werden, welches eine bleibende Magnetisierung während der Messzeit gewährleistet. Das an rissartigen Fehlern auftretende erhöhte Magnetfeld lässt sich in den vom Computer aufgezeichneten Signalen des Magnetfeldsensors nachweisen.

Das Prinzip ist denkbar einfach. In einem magnetisch gesättigten Rohr werden die magnetischen Feldlinien durch Fehler in ihrer Ausbreitung gestört, so dass ein so genannter Streufluss entsteht. Dieser an der Oberfläche austretende Streufluss wird zum Nachweis der Fehler genutzt.

Anwendung findet dieses Verfahren bei der Rohrprüfung. Es werden vorzugsweise Sondenabtastverfahren mit Joch- oder Spulenmagnetisierung angewendet. Magnetisierungs- und Abtastrichtung entsprechen dem gewünschten Fehlernachweis.

Abbildung 6-3: Zum Nachweis von Längsfehlern wird üblicherweise ein rotierendes Magnetisierungsjoch mit magnetfeldempfindlichen Abtastsonden und schraubenlinienförmiger Abtastung der Rohroberfläche eingesetzt.

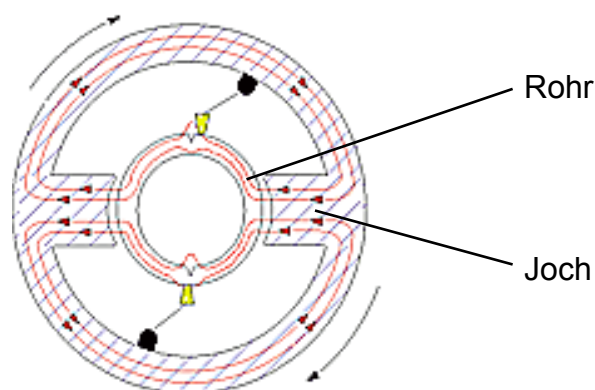


Abbildung 6-3 Prinzip der Streufluss-Längsfehlerprüfung von Rohren

Abbildung 6-4: Für die Querfehlerprüfung verwendet man i.a. Spulenmagnetisierung in Längsrichtung und um den Rohrumfang segmentiert angeordnete Sondenschuhe.

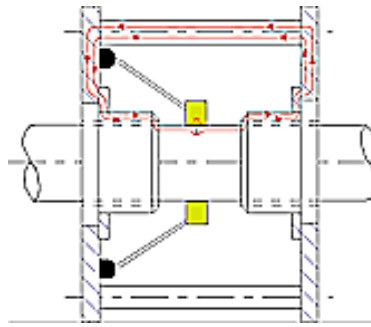


Abbildung 6-4 Prinzip der Streufluss-Querfehlerprüfung von Rohren

Dieses Verfahren lässt sich auf das LBV gut anwenden. Es handelt sich wie bei den Rohren um einen drehsymmetrischen Körper der ohne Probleme abgetastet werden kann. Selbst die geformten Flächen des Ventilkegels sollten durch form-angepasste Sonden keine Schwierigkeit darstellen. Ein Prüfen aller Schweißnähte wäre denkbar.

6.2.2.2 *Wirbelstromprüfung*

Eine Wechselstrom führende Spule induziert Wirbelströme in einem leitfähigen Material. Die zur Erzeugung der Wirbelströme benötigte Energie wird dabei von der Spule und somit von der Prüfeinrichtung geliefert. Der von der Spule auf das Werkstück übertragene Energiefluss ist ein Maß für die Leitfähigkeit des vorliegenden Materials. Ändert sich die Leitfähigkeit - durch Änderung des Werkstoffes oder durch Fehler in einem Werkstück - so ändert sich auch der Energiefluss durch die Spule. Diese Energieflussänderung lässt sich mittels elektronischer Geräte nachweisen. Neben dem Nachweis von Oberflächenfehlern lassen sich durch entsprechende Spulengestaltung und Auswahl der Wechselstromfrequenz auch Fehler bis zu bestimmten Tiefen unter der Oberfläche erkennen. Die Eindringtiefe der Wirbelströme unter die Oberfläche des Prüfkörpers hängt von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Prüfgegenstandes sowie von der Prüffrequenz ab und ist aufgrund des so genannten Skineffekts im allgemeinen gering. Das Verfahren eignet sich auch zur Prüfung von Werkstoffverwechslung und zum Erkennen von Gefügeunterschieden (z. B. Schweißgut) [20].

Das Wirbelstromverfahren erlaubt hohe Prüfungsgeschwindigkeiten und damit verbunden hohe Durchsatzleistungen. Hiermit eignet es sich insbesondere für den Einsatz in der produktionsbegleitenden 100%-Prüfung. Darüber hinaus entsteht aufgrund der berührungslosen Arbeitsweise keinerlei Verschleiß an Prüfteil oder Sensor und zudem sind keine Verbrauchsmaterialien oder Koppelmedien erforderlich [21].

Dieses gut automatisierte Verfahren findet bei den konventionellen Ventilen seit langer Zeit Anwendung. Die lange Erfahrung und Einsatzdauer zeigt die Zuverlässigkeit dieses Prüfverfahrens. Mit unterschiedlichen geformten Sondenköpfen lassen sich alle kritischen Stellen des Leichtbauventils prüfen.

6.2.3 Optische Verfahren

Alle optischen Verfahren beziehen sich auf das visuelle Wahrnehmen des menschlichen Auges.

6.2.3.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung ist ein sehr einfaches Prüfverfahren. Es ist als zerstörungsfreies Prüfverfahren genormt und es werden zwei grundlegende Techniken der Sichtprüfung unterschieden [22]:

- direkte Sichtprüfung
- indirekte Sichtprüfung

Diese Begriffe werden in den Normen hinsichtlich des Strahlenganges zwischen dem Auge des Betrachters und der Prüffläche definiert.

Abbildung 6-5: Die folgende Übersicht soll zum besseren Verständnis beitragen.

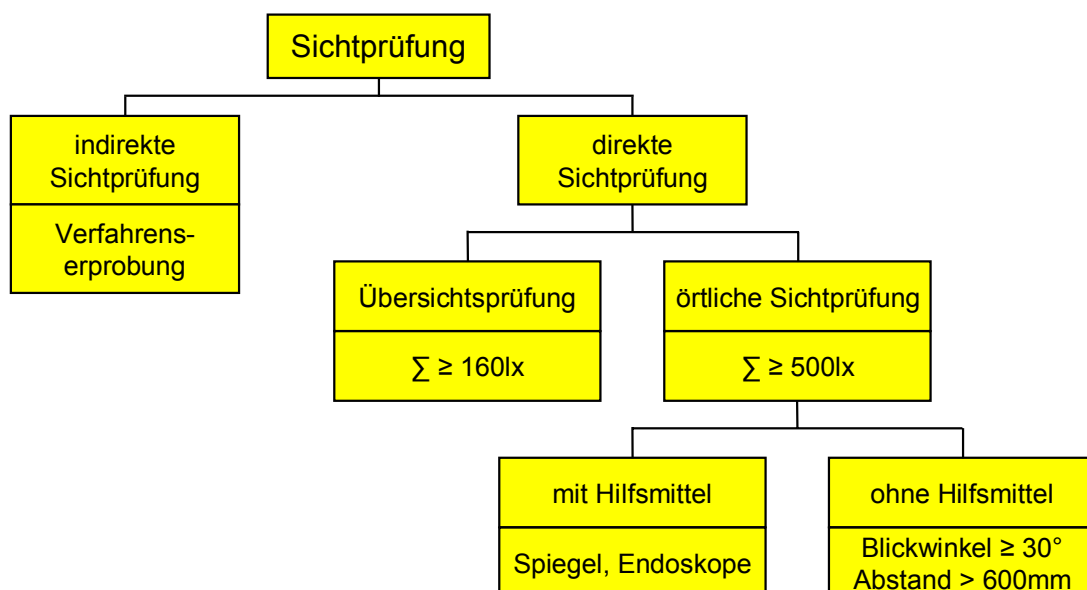


Abbildung 6-5 Übersicht Sichtprüfung (Quelle: DIN EN 13018)

Direkte Sichtprüfung

Bei der direkten Sichtprüfung wird die Prüffläche direkt mit dem Auge betrachtet. Allgemeine Betrachtung, detaillierte Inspektion und Beurteilung der gefundenen Auffälligkeiten sind ein Arbeitsgang, der in der Regel von einer Person durchgeführt wird. Bei schwierigen Prüfaufgaben verlangt dies gute Ausbildung und Erfahrung des Prüfers. Direkte Sichtprüfung kann mit oder ohne Hilfsmittel erfolgen. Hilfsmittel werden benötigt, wenn die Prüffläche nicht zugänglich ist oder wenn der Sichtwinkel für eine detaillierte Betrachtung zu flach wird z. B. Spiegel oder Endoskope. Endoskope, die mit Linsen oder Glasfasern ausgerüstet sind, erlauben eine direkte Betrachtung von nicht einsehbaren oder nicht zugänglichen Prüfflächen, auch wenn diese außerhalb des Nahsehbereichs liegen.

Abbildung 6-6 zeigt den Aufbau einer Sichtprüfung. Das menschliche Auge ist durchaus ein präzises Messinstrument, jedoch hängen die Ergebnisse stark vom täglichen Empfinden ab.

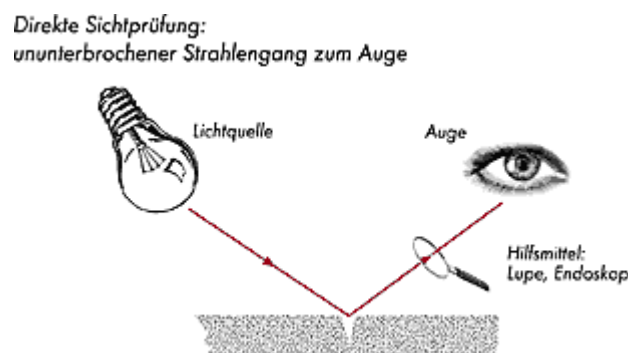


Abbildung 6-6 direkte Sichtprüfung, schematisch (Quelle: Sector-Cert)

Indirekte Sichtprüfung

Bei der indirekten Sichtprüfung besteht die Möglichkeit der Trennung zwischen dem eigentlichen Prüfer, der z.B. die Videoaufnahmen macht, und dem Bewerter, der die Beurteilung der Auffälligkeiten und Befunde vornimmt. Außerdem kann zwischen dem Herstellen der Aufnahmen und der Bewertung noch ein weiterer Arbeitsschritt liegen, der Vergrößerungen, bildverstärkende Maßnahmen, Vermessungen etc. beinhaltet und die Bewertung unterstützen soll. Damit besteht auf der einen Seite die Gefahr, dass durch eine schlechte Aufnahmequalität Anzeigen übersehen werden, und andererseits die Möglichkeit, Befunde zu manipulieren oder überzuinterpretieren. Die indirekte Sichtprüfung umfasst die Anwendung von Foto- und Videotechnik, von automatisierten Anlagen und Robotern.

Um Details wie Risse oder Poren erkennen und beurteilen zu können ist ein guter Kontrast notwendig. Dieser ist vom Hintergrund und von einer guten Beleuchtung abhängig. Je höher die Beleuchtungsstärke, umso besser der Kontrast. Es ist aber darauf zu achten, dass keine Blendungen auftreten. Blendung kann dazu führen, dass Fehler übersehen werden.

6.2.3.2 *Eindringprüfung*

Das Farbeindringverfahren als Oberflächenprüfverfahren ist bei allen festen Körpern anwendbar, ohne dass deren übrige physikalischen Eigenschaften eine Rolle spielen. Es begründet sich darauf, dass (gefärbte) Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung und damit niedriger Viskosität in auch sehr feine Trennungen an Oberflächen eindringen, wenn man sie lange genug einwirken lässt und diese Trennungen nicht durch Verunreinigungen verschlossen sind. Bringt man auf solche Stellen eine saugfähige Schicht auf, die auch noch einen guten Kontrast zum Eindringmittel liefert, so saugt diese Schicht das Eindringmittel an und macht somit Trennungen sichtbar. Zur Erläuterung des genauen Ablaufs dieser Prüfung wird auf die Literatur verwiesen [23,24].

6.2.3.3 *Magnetpulverprüfung*

Als Oberflächenprüfverfahren für magnetisierbare Werkstoffe ist das Magnetpulververfahren geeignet. Die theoretische Voraussetzung für dieses Verfahren liegt im großen Permeabilitätsunterschied zwischen Luft, die in den meisten Fällen als Füllmedium in Oberflächenfehlern vorliegen dürfte, und Eisen bzw. Stahl. Aufgrund dieses Unterschiedes werden in der Nähe von Oberflächen- bzw. oberflächennahen Fehlern magnetisierter Proben magnetische Streufelder gebildet.

In die Nähe solcher Streufelder gebrachte fein verteilte (pulverförmig oder flüssig) magnetisierbare Partikel werden dort festgehalten. Sorgt man dafür, dass solche Partikelansammlungen einen guten Kontrast (u. U. durch Benützung einer Kontrastfarbe, evtl. fluoreszierend) zur Werkstückoberfläche ergeben, sind damit Oberflächenfehler sichtbar zu machen. Voraussetzung dabei ist aber stets, dass das anzuwendende Magnetfeld eine zu den zu erwartenden Fehlern senkrechte Komponente aufweist. Dies ist jedoch stets leicht zu erreichen, indem man angepasste Magnetisierungsverfahren anwendet.

6.2.4 Thermische Verfahren

Die thermischen Verfahren, hier auch Thermographie genannt, gewinnen für die Qualitätssicherung zunehmend an Bedeutung. Durch die Analyse des Wärmeflusses bzw. der Wärmeleitfähigkeit der Prüflinge können unterhalb der Oberfläche liegende und daher äußerlich nicht sichtbare Fehlstellen erkannt werden. Grundsätzliche Vorteile des thermographischen Wärmefluss-Prüfverfahrens sind das bildgebende Funktionsprinzip, die hohe Prüfgeschwindigkeit und die relativ einfache Automatisierbarkeit.

6.2.4.1 *Infrarot-Strahlungsthermometer*

Die Infrarot-Thermographie nutzt die Tatsache aus, dass alle Objekte, die sich auf einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes befinden, Strahlung im infraroten Bereich abgeben, die für die jeweilige Temperatur charakteristisch ist. Für Temperaturen zwischen 0°C und 1000°C wird dabei die maximale Intensität bei Wellenlängen zwischen 3µm und 10µm abgestrahlt. Diese Strahlung wird durch spezielle Kameras erfasst, so dass sich ein Bild der Oberflächentemperatur der Messobjekte ergibt. Besondere Bedeutung für die zerstörungsfreie Prüfung hat die aktive Thermographie, bei der das Untersuchungsobjekt einem Wärmeimpuls ausgesetzt wird. Dieser verursacht eine Wärmefront, die in das Objekt eindringt, während sich die Oberfläche wieder abkühlt. Wird die Ableitung der Wärme ins Objektinnere durch Fehlstellen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit behindert, bleibt die Oberfläche über der Fehlstelle länger warm. Dies kann im Thermographiebild erkannt und zur Erkennung der Fehlstellen ausgenutzt werden [25].

6.2.4.2 *Passive Infrarot-Thermographie*

Mit einer Thermographiekamera, deren Sensoren Infrarotstrahlung in ein sichtbares Bild umwandeln, kann die Wärmeverteilung auf der Objektoberfläche geprüft und gemessen werden. Wird die Temperaturabnahme eines Objekts gemessen, das bereits warm ist bzw. erwärmt aus einem Herstellungsprozess kommt, so spricht man von passiver oder Abkühlungsthermographie.

Abbildung 6-7: Kommt das Material erwärmt aus der Fertigung, können Fehler im Material durch die gestörte Wärmeleitung als sog. "Hot- oder Cold-Spots" erkannt werden. Thermographische Messungen werden bereits zu Testzwecken in der Automobil- und deren Zulieferindustrie eingesetzt, um beispielsweise größere Lufteinschlüsse oder Lunker in Gussteilen oder Schweißkonstruktionen zu erkennen [25].

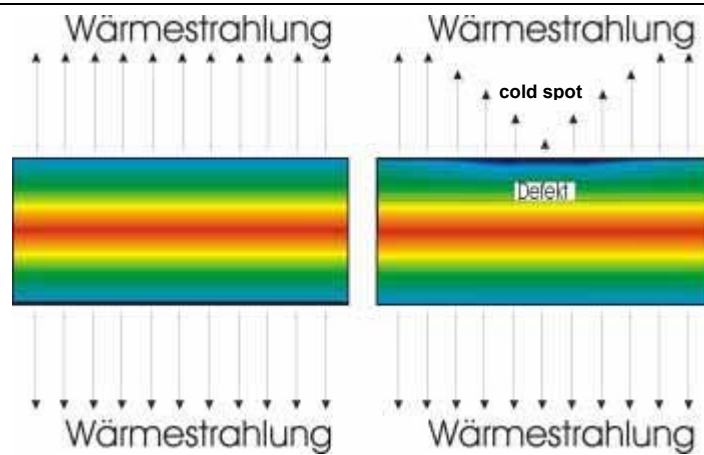


Abbildung 6-7 Schema der Funktionsweise von passiver Thermographie am Beispiel eines Plattenmaterials. Rechts: Defektes Material (Quelle: Fraunhofer WKI)

6.2.4.3 Aktive Infrarot-Thermographie

Bei der so genannten aktiven Wärmefluss-Thermographie wird die Oberfläche der Messobjekte durch einen kurzen Wärmeimpuls erwärmt. Danach „wandert“ die Wärme von der Oberfläche ins Körperinnere. Befinden sich Fehler mit geringerer Wärmeleitfähigkeit unter der Oberfläche, wird der Wärmetransport behindert. Die Oberfläche bleibt über diesen Bereichen länger warm, und durch Thermographie-Kameras können Temperaturunterschiede sichtbar gemacht werden, die Hinweise auf Fehler wie Lunker, Hohlräume und Delaminationen geben können.

Abbildung 6-8 zeigt die schematische Funktionsweise der aktiven Thermographie.

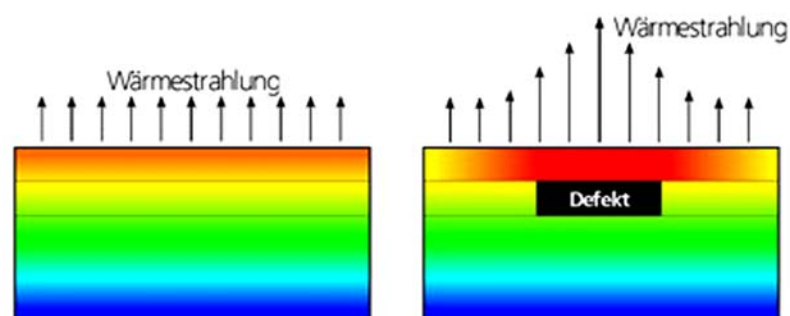


Abbildung 6-8 Prinzip der aktiven Thermographie links ohne, rechts mit internem Defekt (Quelle: Fraunhofer WKI)

Ebenso gehört auch die Erkennung feinsten Materialunterschiede durch unterschiedliche optische Eigenschaften im Infraroten zu den wesentlichen Aufgabenstellungen bei der Thermographie-Prüfung [25].

6.2.4.4 Induktions-Thermographie

Eine innovative, noch in der Entwicklung befindliche Variante der aktiven Thermographie zur Prüfung von Metallen ist die Induktions-Thermographie. Sie unterscheidet sich von den anderen genannten Thermographieverfahren dadurch, dass hier die Temperaturunterschiede nicht durch die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften guter und schlechter Bereiche hervorgerufen werden, sondern durch Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit.

Abbildung 6-9 Zur Durchführung wird ein kupferner Induktor in die Nähe der zu prüfenden Stelle gebracht. Durch den Induktor werden Wirbelströme im Werkstück induziert, die aufgrund des Skin-Effektes eine begrenzte Eindringtiefe haben. Daher hemmen oberflächennahe Risse den Stromfluss, der die Rissgebiete also umgehen muss. Dies führt zu einer Stromdichteüberhöhung an den Rissspitzen, die eine entsprechende Temperaturerhöhung nach sich ziehen.

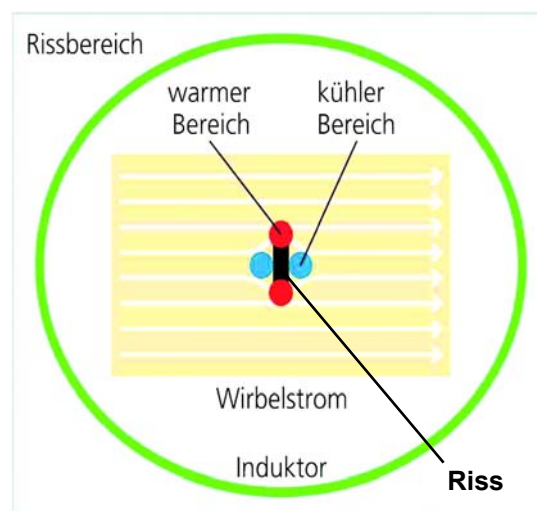


Abbildung 6-9 Prinzip der Induktions-Thermographie

Die aktive Thermographie erweitert das Anwendungsspektrum für die Materialprüfung erheblich. Die praktische Bedeutung dieser Technik steigt mit der Verfügbarkeit von genauen, schnellen und robusten Sensoren. Allerdings ist die Vorhersage, ob ein bestimmtes Produkt für die Prüfung geeignet ist, außerordentlich schwer, da sie von einer Vielzahl von oft schwer bestimmbareren Parametern abhängt. Deshalb müssen in jedem Einzelfall detaillierte Voruntersuchungen stattfinden.

Mittels Thermographie können auch sehr große und schnell bewegte Objekte untersucht werden. Hierdurch ist das Verfahren oft auch für eine 100%-Online-Kontrolle

im industriellen Einsatz geeignet. Die bisherigen Erfahrungen im Umgang mit der Thermographie lassen vermuten, dass bisher nur ein Bruchteil der sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten bekannt ist, da die Wärmefluss-Thermographie als „industrielles“ zerstörungsfreies Prüfverfahren noch relativ jung ist [25].

6.2.5 Akustische Verfahren

6.2.5.1 *Ultraschallprüfung*

Das Ultraschallprüfverfahren ist eines der wichtigsten zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Schweißtechnik [26,27]

Mit Ultraschall bezeichnet man mechanische Schwingungen oberhalb des Hörbereiches ($>20\text{kHz}$), die in der prüftechnischen Anwendung liegenden Frequenzen bewegen sich zwischen 1 und 15MHz.

Ultraschallwellen breiten sich im unendlichen Medium mit der für jedes Material typischen Schallgeschwindigkeit geradlinig aus und erfahren je nach Medium unterschiedliche Schwächung. Treffen Schallwellen auf Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Medien (z.B. Stahl/Luft), tritt Reflektion auf und zwar in Abhängigkeit von den Schallwiderständen der beiden Medien.

Die Erzeugung mechanischer Schwingungen der o. a. Frequenzen erfolgt mit geeigneten Schwingern (Quarz, Sinterstoffe), welche aufgrund des piezoelektrischen Effekts bei angelegter Wechselspannung ihre Form verändern, so dass bei hoher Frequenz der angelegten Spannung entsprechend hohe mechanische Schwingfrequenzen erzeugt werden. Der piezoelektrische Effekt ist reversibel, so dass ankommende mechanische Schwingungen in elektrische Wechselspannungen umgesetzt werden. Beim Ultraschall wird für die Übertragung der Schwingungen ein Medium (meist Wasser) benötigt, damit der Schall ungehindert vom Prüfkopf in das Ventil übertragen werden kann.

In der Ultraschalltechnik haben sich zwei Messprinzipien, das Intensitätsverfahren und das Impuls-Echo-Verfahren, durchgesetzt. Die Funktionsweise der beiden Verfahren ist aus der Literatur zu entnehmen [26].

Die Beurteilung von Ultraschallanzeigen erfolgt üblicherweise derart, dass für eine Prüfung ein bestimmter Testfehler (Nut, Querbohrung) zugrunde gelegt wird, dessen Echohöhe dann von keinem registrierten Fehlersignal überschritten werden darf. Es lassen sich bei genügender Erfahrung aus der Signalform und der Echohüllkurve

auch Angaben zur Fehlerart machen. Bei entsprechender Prüfanordnung lassen sich mittels Ultraschall teilweise auch Oberflächenfehler nachweisen. Das Messen mit Ultraschall setzt sehr viel Erfahrung voraus um eindeutig die zu suchenden Fehler zu finden.

Die Fehlergrößenerkennung ist ein wichtiges Kapitel bei der Überprüfung von Schweißnähten. Da man bereits Erfahrungswerte gesammelt hat, wird kurz darauf eingegangen. Das Erkennen eines Fehlers hängt von der Wellenlänge λ ab. Über die Verknüpfung $f = c/\lambda$ kann eine Beziehung über die Schallgeschwindigkeit c zur Prüffrequenz f hergestellt werden. Die minimale nachweisbare Fehlergröße d wird in der Literatur mit einem Fünftel der Wellenlänge angegeben [28]. In der Praxis zeigte sich aber, dass eine Fehlergröße im Bereich von λ bis $\lambda/2$ realistisch ist, dies würde für Stahl bei einer Prüffrequenz von 15MHz eine Fehlergröße von 0,2mm ergeben. Die Erhöhung der Prüffrequenz ist nicht unbegrenzt möglich um so immer kleiner Fehler zu finden, die frequenzabhängige Schallschwächung setzt hier natürliche Grenzen.

6.2.5.2 Akustische Resonanzanalyse

Die akustische Resonanzanalyse ist ein neueres, zerstörungsfreies Prüfverfahren, das die schnelle und aufwandsarme 100% Prüfung einer breiten Palette von Prüfböjekten ermöglicht. Ausgenutzt wird der bekannte physikalische Effekt, dass ein Körper nach geeigneter Anregung (z. B. Anschlagen) in seinen natürlichen Resonanzen schwingt.

Die Schwingungen des Prüfobjektes sind ein Indikator für werkstückspezifische akustische Kennwerte, die den Zustand des Bauteils charakterisieren. Diese können mit Sensoren erfasst und digital analysiert werden.

Gegenstand der Akustik sind Schallfelder, d. h. die Beschreibung und Erklärung der Phänomene der Schallentstehung, der Schallabstrahlung, der Schallausbreitung und der Schallaufnahme. Unter Schall (Luftschall: Ton, Klang, Geräusch) im engeren Sinne versteht man elastodynamische Schwingungen und Wellen im Medium Luft im für den Menschen hörbaren Frequenzbereich von ca. 20Hz bis 16kHz. Mechanische Schwingungen in der Struktur (Körperschall) und abgestrahlte Schwingungen in die umgebende Luft (hörbarer Luftschall) tragen Information. Die Resonanzen hängen eindeutig von der Geometrie, dem Zustand und dem Material ab.

Die akustische Messtechnik ist sehr sensitiv, geringe Änderungen des Schwingungsverhaltens mechanischer Strukturen können detektiert werden. Die Resonanz-

analyse ist ein qualitatives Verfahren, das den IST-Schwingungszustand mit dem SOLL-Schwingungszustand der Lernbasis vergleicht. Anhand von definierten Musterteilen ist diese Lernbasis festzulegen.

Die akustische Resonanzanalyse (AR) beurteilt das gesamte Prüfobjekt unabhängig von seiner Größe. Es werden keine lokalen Bereiche abgetastet und auf Fehler untersucht. Es lässt sich leicht und preiswert automatisieren. Eine Aussage über Fehlergrößen ist nur mit Referenzobjekten möglich, so muss für jede Fehlerart ein Vergleich vorhanden sein. Erfolgreiche Realisierungen in der Serienprüfung von Gussteilen liegen vor. Das Finden von Rissen und Lunkern hat sich mit diesem Verfahren bewährt [29].

6.2.5.3 Schallemissions-Analyse

Die Schallemissionsprüfung ist eine leistungsstarke und vielseitige Methode, die es ermöglicht, Fehler und Undichtheiten von Druckbehältern zu orten. Die Schallemissionsprüfung liefert dabei eine Gesamtinformation über die physikalische Beschaffenheit und die Dichtheit der geprüften Struktur. Auch für mechanisch stark beanspruchte Komponenten kann die Schallemissionsprüfung zum Einsatz kommen. Zur Auffindung und Ortung etwaiger vorliegender Fehler bedient sich die Schallemissionsprüfung eines klassischen physikalischen Prinzips.

Da Metalle bei Belastung Schallwellen aussenden, kann man durch dieses einfache Verfahren einer Überbelastung des Materials vorbeugen. Der Ursprung der Schallsignale sind Fehler im Material des untersuchenden Bauteils. Wenn Energie nun eingebracht wird, entlädt sich der Spannungszustand spontan als Schallimpuls. Die dabei ausgesandte Energie wird von modernen, an der Oberfläche des Prüflings applizierten Sensoren aufgenommen.

Durch die zeitliche Messung des Eintreffens des Impulses bei mehreren Sensoren kann über einen Algorithmus auch die Schallquelle lokalisiert werden [30].

6.2.6 Durchstrahlungsprüfung

6.2.6.1 Röntgenprüfung

Das klassische Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) von Schweißnähten [31].

In Röntgenröhren werden durch Anlegen einer Hochspannung beschleunigte Elektronen beim Auftreffen auf die Anode im Anodenmaterial abgebremst und geben dabei ihre kinetische Energie in Form elektromagnetischer Strahlung, der Röntgenstrahlung, ab. Die maximale Quantenenergie der Röntgenquanten ist gleich der den Elektronen in der Beschleunigungsstrecke vermittelten kinetischen Energie. Form und Maximalenergie eines Röntgenspektrums sind also über die an der Röntgenröhre angelegte Spannung in weiten Grenzen variabel. Zur ZfP mit Röntgenstrahlen dienen industrielle Röntgenanlagen.

In Abbildung 6-10 sind die wichtigsten Elemente einer Röntgenanlage dargestellt, sie bestehen aus dem Schalt- und Steuerteil, dem Hochspannungsteil und der Röntgenröhre - mit Kühlung - als Strahlenquelle. Die Röhre R ist von einem Schutzgehäuse S umgeben und besitzt eine Kühleinheit K. Die elektrische Versorgungseinheit E liefert die benötigte Röhren- und Heizspannung und wird von einem Bedienungspult B aus reguliert [32].

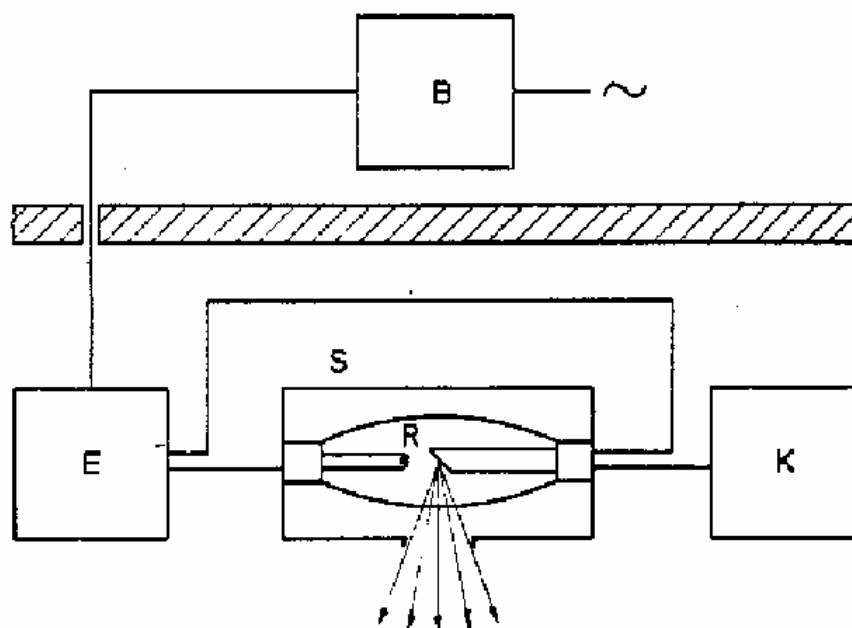


Abbildung 6-10 Blockschaltbild einer Röntgenanlage (Quelle: MPA Stuttgart, 2006)

Eine wichtige geometrische Einflussgröße auf das Röntgenbild ist der Brennfleck. Dieser Parameter beeinflusst die Bildschärfe des Abbildes, das am Film oder am Bildschirm abgebildet wird. Je größer der Brennfleck, desto größer ist der Schatten, der erzeugt wird, und somit die Unschärfe begünstigt. Neben dem Brennfleck hat auch noch das „Zoomen“, zum Vergrößern von Bildbereichen, einen direkten Einfluss auf die Bildschärfe.

Um diesen Nachteil bei den Röntgenanlagen zu minimieren und den Brennfleck so klein wie möglich zu halten, wurde die Mikrofokus-Röntgentechnik entwickelt [33,34]. In Kombination mit der modernen Computertechnik ergeben sich leistungsstarke Mikrofokus-Anlagen, die in einer Echtzeit-Prüfung Bauteile durchstrahlen. In einem späteren Kapitel wird ausführlich auf diese Technik eingegangen.

6.2.6.2 Prüfung mit Gammastrahlen

Da Gammastrahlung und Röntgenstrahlung elektromagnetische Wellen sind, unterscheidet man sie hauptsächlich wegen ihrer Entstehungsweise.

Bei den Gammastrahlen entstehen im Kernreaktor beim radioaktiven Zerfall natürliche und künstliche erzeugte Isotope.

Während die Röntgenstrahlung mit entsprechenden Anlagen ständig erzeugbar ist, klingen die Aktivität und damit die Intensität einer Gamma-Strahlenquelle nach den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls mit der für jedes Radionuklid typischen, von der Natur vorgegebenen Halbwertszeit ab. Zudem sendet die Röntgenröhre ein variables –kontinuierliches– Strahlungsspektrum, ein Gammastrahler ein –wiederum typisches– Linienspektrum von Quanten bestimmter Energie aus [33].

Bei hochenergetischer Gammastrahlung wird dieses Verfahren auch als „Tomographie“ bezeichnet die in der Medizin eingesetzt wird.

6.2.7 Dynamische Prüfverfahren

6.2.7.1 Laservibrometer

Mit einem Laservibrometer kann das Schwingungsverhalten von Körpern punktweise berührungslos gemessen werden.

Das Messprinzip beruht darauf, dass der kohärente Lichtstrahl eines Lasers auf das zu untersuchende Teil gerichtet wird und der reflektierte Strahl mit einem Referenz-

strahl zur Interferenz gebracht wird. Aus der Analyse der Interferenzen erhält man dann eine Aussage über das Geschwindigkeits-, Frequenz- und Amplitudenverhalten des untersuchten Messpunktes. Damit ist eine Bewegungsauflösung von wenigen Nanometern erreichbar und die Aufnahme von Schwingungen in einem großen Bereich von wenigen Hertz bis in den MHz-Bereich möglich (Schwinggeschwindigkeiten 10^{-9} m/s bis 1 m/s). Der Messabstand umfasst einen großen Bereich von wenigen Zentimetern bis zu 100 Metern. Große Messabstände sind allerdings nur bei gut reflektierenden Oberflächen möglich.

Typische Anwendungsbeispiele der Laservibrometrie sind die Untersuchung des Schwingverhaltens von Fahrzeugkarosserien und die zerstörungsfreie Prüfung von rotierenden Maschinenteilen.

Die Laservibrometrie ist in der letzten Zeit zum bildgebenden Verfahren erweitert worden, es lässt sich mit interaktiver Rechnersteuerung ein Oberflächenbereich auswählen, der punktweise abgerastert wird. Damit können die zweidimensionalen Schwingungsformen für eine vorgewählte Frequenz dargestellt werden [35].

6.2.7.2 Frequenzanalyse

Durch Frequenzanalysen wird untersucht, wie häufig bestimmte Ereignisse in einer gewissen Zeiteinheit auftreten bzw. welche Frequenzanteile wie stark in einem Signal vertreten sind. Daraus lassen sich durch Vergleichsmessungen fehlerhafte Teile feststellen.

In Abbildung 6-11 sieht man eine Auswertung einer Frequenzanalyse. Jeder Frequenzanteil in der Messkurve steht für ein Bauteil. Die deutlich sichtbaren Spitzen stellen fehlerhafte Teile dar.

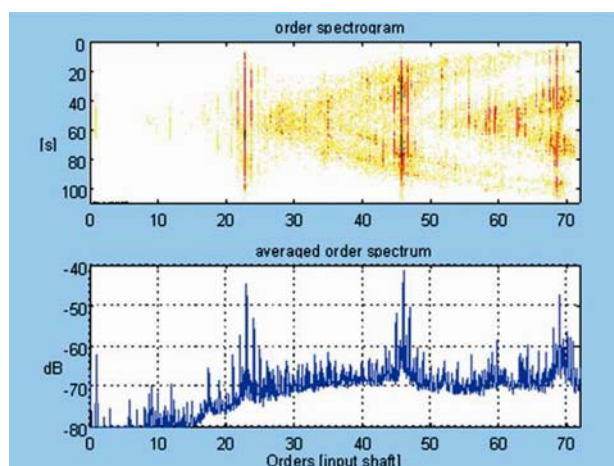


Abbildung 6-11 Frequenzanalyse eines Bauteils (Quelle: Medav GmbH, 2005)

Mit der Schwingungsanalyse gelingt es, in wenigen Sekunden Messzeit eine Bewertung zu Montagefehlern, Beschädigungen und sonstigen Auffälligkeiten abzuleiten.

Allgemeines Kriterium für die Erkennbarkeit von Fehlern ist, dass sich die zu erkennenden Fehler und Auffälligkeiten im gemessenen Schwingungssignal abzeichnen. Einflüsse auf den Informationsgehalt im Signal sind vielfältig, u.a. werden sie durch den ausgewählten Sensor oder die Messstelle bestimmt. Da Prozesssicherheit angestrebt wird, ist es erforderlich, dass sich der Fehler signifikant gegenüber den fehlerfreien Bauteilen darstellt. Hierzu helfen geeignete Analyseverfahren [36].

Das Herausfiltern fehlerbehafteten Teilen geht ausschließlich bei betriebsfähigen Motoren, die in Probelauf überwacht werden. Eine alleinige Überprüfung der Ventile ist nur in dafür vorgesehenen Prüfständen möglich.

6.2.8 Weitere Prüfverfahren

6.2.8.1 *Holographie*

Die Holographie ist ein hochempfindliches berührungsloses, kohärent-optisches Mess- und Prüfverfahren und wird bereits in vielen Forschungsbereichen unter Laborbedingungen eingesetzt. Ihr Einsatz als Messwerkzeug blieb jedoch in der Industrie infolge ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsstörungen, dem komplexen Aufbau und dem hohen Aufwand begrenzt [37].

Der Strahl einer Lichtquelle wird zunächst durch einen Strahlteiler aufgespaltet. Das zu untersuchende Objekt wird vom ersten Teil des Strahls durch eine Optik beleuchtet. Der zweite Teil wird über eine weitere Optik direkt auf den Film geleitet. Beim Zusammenführen der beiden Strahlenteile entsteht durch Interferenzen das Hologramm.

Bereits Bewegungen einer halben Wellenlänge können zu schwarzen Streifen auf dem Bild führen oder überhaupt nichts mehr erkennen lassen. Genau diese Wirkung wird in einem der wichtigsten Bereiche der Holographie ausgenutzt und zwar in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, der Interferometrie. Es lassen sich Verformungen an Metallblechen im Bereich von $1/10000\text{mm}$ optisch nachweisen. Diese einfache Methode erlaubt es durch einfaches Abzählen der Streifen, um wie viel Wellenlängen sich ein Werkstück verformt hat [38].

Der Abstand der Schichten voneinander beträgt genau $\frac{1}{2}$ der Wellenlänge λ des verwendeten Lichtes (z.B.: rotes Laserlicht, $\lambda = 650\text{nm}$ $\rightarrow$ Abstand: $\frac{1}{2} \cdot \lambda = 325\text{nm}$) [39].

Die im letzten Jahrzehnt neu entwickelte Shearografie, auch Speckle Pattern Shearing Interferometrie (SPSI) genannt, ist ein kohärent-optisches Mess- und Prüfverfahren ähnlich der Holografie. Es dient zur Bestimmung von Oberflächendeformationen. Durch den einfachen Aufbau und seine relative Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen besitzt das Verfahren jedoch gravierende Vorteile für den Einsatz in der industriellen Praxis. Die Shearografie misst im Gegensatz zur Holografie nicht die Verformung, sondern den Gradienten der Verformung. Somit misst die Shearografie die Dehnungsinformationen direkt.

Wenn das zu prüfende Objekt mit einer der Betriebsbeanspruchung ähnlichen, jedoch wesentlich geringeren Belastung shearografisch untersucht wird, werden Dehnungskonzentrationen hervorgerufen, die die Festigkeit von Strukturen mindern. Diese Minderung sind die vorhandenen Defekte. Derartige Defekte können mit dem Verfahren der Shearografie einfach lokalisiert werden. Im Vergleich zur Holografie, die die Information der Ganzfeld-Verformung misst, ist die Shearografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung einfacher und direkter. Eine weitere Entwicklung ist die digitale Shearografie, die mit der digitalen Technik den Aufwand vereinfacht [40].

Abbildung 6-12 soll die oben beschriebene Theorie der Shearografie verdeutlichen.

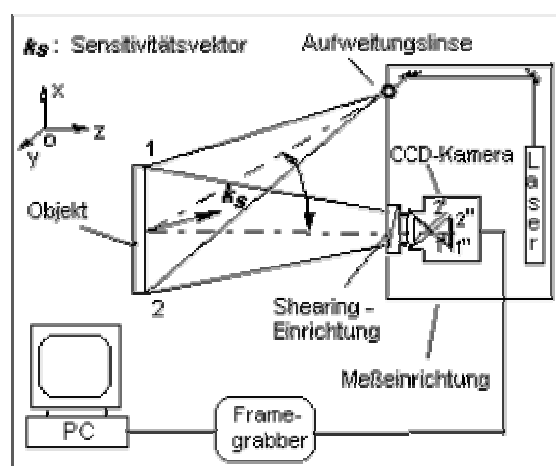


Abbildung 6-12 Prinzip der Shearografie

6.2.8.2 Tomographie

Die Computertomographie (CT) könnte hier in der Zukunft, verglichen mit dem herkömmlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren (z.B. Röntgen-Durchstrahlungsprüfung), eine enorme Verbesserung hinsichtlich der Auflösung von Fehlerart, -größe und -lage bieten. Durch die Möglichkeit zur 3D-Darstellung kann der Fehler hinsichtlich Geometrie und Lage in komplizierten Teilen eindeutig beschrieben werden. Weiterhin kann das Bauteil auch an schlecht zugänglichen Stellen geprüft werden, was beispielsweise durch Ultraschall nicht möglich ist.

Das in der Industrie im Allgemeinen eingesetzte Prüfverfahren ist die Röntgenprüfung mit Bildverstärker. Fehler, die zu einem Bauteilversagen führen, wie inhomogene Einschlüsse oder Mikroporen, können in der Regel nicht nachgewiesen werden. Eine Unterscheidung innerer Fehler nach den Ursachen wie Luft- und Gaseinschlüssen, Lunker, Risse ist kaum möglich. Vor allem in der Entwicklungsphase (Prototypenherstellung) neuer Bauteile ermöglicht das CT-Verfahren, Probleme frühzeitig zu erkennen.

Die maximale Auflösung herkömmlicher Röntgenanlagen beträgt ca. 0,5mm Brennfleck [31]. Ein großer Nachteil liegt in der zweidimensionalen Darstellung. Somit kann die genaue Größe und vor allem die Ausbildung der Fehler nicht nachgewiesen werden. Der Einsatz eines Computertomographen mit hoher Auflösung soll die dreidimensionale Darstellung innerer Fehler mit hoher Fehlererkennbarkeit ermöglichen. Die Prüfung kann an allen Stellen des Bauteils durchgeführt werden, da der CT berührungslos arbeitet. Dadurch können Eigenschaften der Bauteile garantiert werden, die bisher wegen der mangelnden Prüfmethoden nicht gewährleistet werden konnten [41].

In Abbildung 6-13 ist das Prinzip der Computertomographie zu sehen. Das Messobjekt wird einmal um 360° gedreht und in vielen hundert Winkelpositionen werden zweidimensionale Projektionen aufgezeichnet. Aus den zweidimensionalen Projektionen wird mit Hilfe mathematischer Algorithmen das dreidimensionale Bild berechnet.

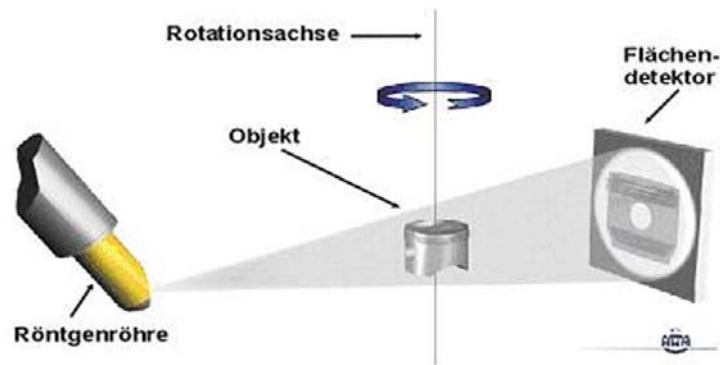


Abbildung 6-13 Funktionsprinzip der 3D Computertomographie (Quelle: Hans Wälischmiller GmbH)

7. Bewertung und Auswahl der Prüfkonzpte

Um die geeigneten Prüfverfahren für die Serienprüfung fest zu legen, wird mit Hilfe eines Paarvergleichs und einer Bewertung jedes Prüfkonzpt untersucht. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit dem konventionellen Ventil.

7.1 Paarvergleich der Bewertungskriterien

Um die wichtigsten Eigenschaften für die Prüftechnologien zu ermitteln wird eine Bewertung durch Paarvergleich erstellt.

In einem Paarvergleich werden in einer Matrix die einzelnen Bewertungskriterien gegenseitig verglichen, um letztendlich eine Gewichtung jedes einzelnen Bewertungskriteriums zu erhalten [42].

wichtiger:	2
gleich wichtig:	1
unwichtig:	0

Tabelle 6.1 Paarvergleich der Bewertungskriterien**Paarvergleich**

	Lage Schweißnaht	Einfachheit	Anwendbarkeit	Zeitaufwand	Automatisierbarkeit	Sauberkeit	Zuverlässigkeit	Auswertung	Investitionskosten	Bearbeitung	Σ	%	Rang
Lage Schweißnaht		0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1%	10
Einfachheit	2		1	0	1	1	1	1	0	1	8	9%	7
Anwendbarkeit	2	1		1	2	1	1	2	1	1	12	13%	2
Zeitaufwand	2	2	1		1	2	0	2	2	1	13	14%	1
Automatisierbarkeit	1	1	0	1		1	0	1	1	1	7	8%	8
Sauberkeit	2	1	1	0	1		1	0	0	1	7	8%	8
Zuverlässigkeit	2	1	1	2	2	1		1	1	1	12	13%	2
Auswertung	2	1	0	0	1	2	1		1	1	9	10%	6
Investitionskosten	2	2	1	0	1	2	1	1		1	11	12%	4
Bearbeitung	2	1	1	1	1	1	1	1	1		10	11%	5
											90	100%	

7.2 Definition der Bewertungskriterien

Damit eine Bewertung der Konzepte und Konzeptvarianten in einer Bewertungsmatrix (vgl. Anhang A) qualitativ und reproduzierbar durchgeführt werden kann, ist es notwendig, eine Klassifizierung festzulegen, anhand derer die einzelnen Konzepte und Konzeptvarianten mit Punkten bewertet werden. Die Punkteskala geht von -2 (sehr schlecht) bis 2 (sehr gut).

Im Folgenden werden alle Bewertungskriterien unter der Angabe der Punkteverteilung aufgelistet [43].

7.2.1 Lage Schweißnaht

(Rang 10)

Die Punktevergabe der *Lage der Schweißnaht* erfolgt anhand der Position, die erforderlich ist, um die Schweißnahtprüfung ohne größeren Aufwand durchführen zu können.

Je mehr Prozessschritte erforderlich sind um ein Prüfverfahren anzuwenden, umso schlechter wird die Benotung. z.B.: Spannen, Drehbewegung und Zusatzmaterial sind erforderlich, wird mit einer „-2“ bewertet.

Tabelle 6.2 Bewertungskriterien – Lage Schweißnaht

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Lage Egal, kein Spannen	↔	Fixe Lage bzw. Spannen	↔	Vordef- inierte, fixe Lage

7.2.2 Einfachheit

(Rang 7)

Die *Einfachheit* bezieht sich auf den technischen Aufwand, der erforderlich ist.

Tabelle 6.3 Bewertungskriterien – Einfachheit

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Alle tech- nischen Hilfsmittel vorhanden	Umrüsten mit vor- handenen Equipment	Umbau von techn. Geräten notwendig	Umrüsten mit neuem Equipment	Aufbau einer neu- en Anlage

7.2.3 Anwendbarkeit

(Rang 2)

Das Kriterium *Anwendbarkeit* prüft, ob das Prüfverfahren sich in der Serienproduktion eignet. Hier wird auch die Sicherheit der Mitarbeiter berücksichtigt z.B.: Strahlungsgefahr

Tabelle 6.4 Bewertungskriterien – Anwendbarkeit

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Wird in Serie ein- gesetzt, ungefähr- lich	Serien- tauglich mit Sicher- heitshin- weisen	In Serie anwendbar mit Schutz- maßnahmen	Erhöhte Schutz- maßnah- men erfor- derlich	Extreme Gefahr

7.2.4 Zeitaufwand

(Rang 1)

Betrachtet wird der reine *Zeitaufwand* für die Prüfung. Eine Prüfzeit von 4 Sekunden wird als Standard herangezogen.

Tabelle 6.5 Bewertungskriterien – Zeitaufwand

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	< 4s	4s	Knapp über 4s	> 4s	>> 4s

7.2.5 Automatisierbarkeit

(Rang 8)

Die Bewertung bezieht sich darauf, wie viel der notwendigen Arbeit von Menschenhand durchgeführt werden muss. Ein Prüfverfahren von 100% Automatisierungsgrad wird mit „2“ bewertet.

Tabelle 6.6 Bewertungskriterien – Automatisierbarkeit

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Voll automatisch, ohne Aufsicht	Voll automatisch, mit Aufsicht	Vereinzelte Kontrolle erforderlich	Einzel- schnitte händisch auszuführen	Ein speziell geschulter Mitarbeiter ist notwendig

7.2.6 Sauberkeit

(Rang 8)

Bei der *Sauberkeit* geht es darum, ob ein Zusatzmaterial für die Prüfung (z.B.: Metallspäne) erforderlich ist, das den Prüfling verunreinigen kann.

Tabelle 6.7 Bewertungskriterien – Sauberkeit

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Keine Ver- unreinig- ung	↔	Eine Rei- nigung ist notwendig	↔	Eine Bear- beitung ist notwendig

7.2.7 Zuverlässigkeit

(Rang 2)

Die *Zuverlässigkeit* soll eine Aussage über die Genauigkeit des Prüfverfahrens machen und weiters soll die Erfahrung in die Bewertung mit einfließen, d.h. welche der Prüftechnologien sind bereits bei der Firma Mahle Ventiltrieb vorhanden.

Tabelle 6.8 Bewertungskriterien – Zuverlässigkeit

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Hohe Ge- nauigkeit und Erfah- rung	↔	Genau, wenig Er- fahrung	↔	Ungenau und un- glaubwür- dig

7.2.8 Auswertung

(Rang 6)

Die Bewertung soll zeigen, ob für die Erkennung von Fehlern ein Mensch erforderlich ist oder ob ein Computerprogramm diese Aufgabe erledigen kann.

Tabelle 6.9 Bewertungskriterien – Auswertung

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Ein Pro- gramm wertet vollständig aus	Programm wertet aus, Interpreta- tion ist er- forderlich	Programm wertet aus, Entschei- dung ist notwendig	Einfache technische Hilfsmittel helfen bei der Aus- wertung	Auswer- tung erfolgt manuell

7.2.9 Investitionskosten

(Rang 4)

Unter den *Investitionskosten* werden alle Kosten betrachtet die für eine Prüfanlage anfallen (z.B.: Kaufpreis, Wartung, Bedienung).

Tabelle 6.10 Bewertungskriterien – Investitionskosten

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Keine Investition	↔	geringe Investition	↔	Hohe Investition

7.2.10 Bearbeitung

(Rang 5)

Das Kriterium „Bearbeitung“ soll zeigen, ob vor der Überprüfung der Schweißnähte eine spanabhebende Bearbeitung notwendig ist. Bei vielen Prüfverfahren werden die Messergebnisse durch unebene Flächen verfälscht.

Tabelle 6.11 Bewertungskriterien – Bearbeitung

	2	1	0	-1	-2
Beschreibung	Keine Bearbeitung erforderlich	↔	Grobe Bearbeitung notwendig	↔	Sauber, bearbeitete Fläche Voraussetzung

7.3 Bewertung und Auswahl der favorisierten Prüfverfahren

Mit Hilfe der einzelnen Definitionen werden alle Prüfverfahren hinsichtlich jedes einzelnen Bewertungskriterium in einer weiteren Matrix mit der Skala von *sehr gut* bis *sehr schlecht* bewertet.

Die Multiplikation von Einstufung und Gewichtung des einzelnen Bewertungskriteriums ergibt dann eine Gesamtsumme und letztendlich ein Ranking der Konzepte. Der vollständige Paarvergleich ist in *Anhang A* zu finden.

Tabelle 6.12 Auszug aus der Bewertungsmatrix – Prüfkonzpte

	Druckprüfung	Biegeumlaufprüfung	Streuflussprüfung ohne Pulver	Wirbelstrom	Sichtprüfung	Eindring-Prüfung	Magnetpulver	passive IR-Thermographie	aktive IR-Thermographie	Induktions-Thermographie	Ultraschallprüfung	akustische Resonanzanalyse	Schallemissions-Analyse	Röntgenprüfung	Gammastrahlen	Laservibrometer	Frequenzanalyse	Holographie	Computer-Tomographie
Σ	92	128	26	138	-79	-83	-86	79	133	54	77	50	20	39	-20	33	-21	-16	-63
Rang	4	3	11	1	17	18	19	5	2	7	6	8	12	9	14	10	15	13	16

Die Bewertung liefert letztendlich eine Rangfolge der einzelnen Konzepte. Anhand der Reihung werden die ersten neun Prüfverfahren ausgesucht, um verschiedene Prüfvarianten detailliert auszuarbeiten.

Da die Bewertung zum Großteil auf theoretischem Wissen und Erfahrung basiert und noch nicht durch Versuche abgesichert ist, wurden mehrere Konzepte weiterverfolgt. Um dabei die aussichtsreichen Varianten herauszufiltern, wurde die Auswahl auf das Kriterium *Zeitaufwand* (siehe Paarvergleich) bezogen, d.h. nur eindeutig als sehr ungünstig erkennbare Details werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

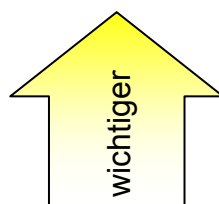
Die Gewichtung auf das Kriterium ergibt sich aus produktionstechnisches Sicht. Bei einer jährlichen Produktion von circa 4 Millionen Ventilen ergibt sich eine Prüfzeit pro Prüfverlauf von ungefähr 4 Sekunden.

7.4 Vergleich der Auswertung zum konventionelles Ventil

7.4.1 Vergleich Bewertungskriterium

In der konventionellen Produktion von Ventilen zeigen sich folgende Kriterien als Voraussetzung:

- Zeitaufwand
- Sauberkeit
- Bearbeitung



Die Aufzählreihenfolge entspricht der Prioritätseinstufung.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass der *Zeitaufwand*, für LBV sowie auch für traditionelle Ventile, das wichtigste Kriterium ist. Durch die fest vorgegebenen Zeitfenster für eine Prüfung der Ventile ist diese Größe vordefiniert.

Die *Sauberkeit* steht bei den Leichtbauventilen am Rang 8. Dieser große Unterschied der Rangfolge lässt sich durch den unterschiedlichen Herstellprozess erklären. Das konventionelle Ventil wird in der formgebenden Phase induktiv erwärmt und durch Schmieden bearbeitet. Die dabei entstehenden Oberflächen (Oxide) stellen für nachfolgende Umformprozesse eine Verunreinigung dar. Daher muss nach jedem Herstellschritt das Werkstück gereinigt werden.

Die Einzelteile des LBVs werden aus Blechtafeln ausgestanzt und wenn erforderlich kalt verformt. Dabei werden die Teile nur leicht verunreinigt. Ein Waschen der Einzelteile erfolgt vor dem Schweißen. Durch die unterschiedlichen Herstellverfahren, die beim LBV wesentlich sauberer ablaufen, ergibt sich der große Unterschied in der Rangordnung.

Die *Bearbeitung* hängt direkt mit der Sauberkeit zusammen. Da die Oxidschichten sehr gut an der Ventiloberfläche haften, ist eine spanabhebende Bearbeitung die kostengünstigste und schnellste Methode, die konventionellen Ventile zu reinigen.

7.4.2 Vergleich Prüfverfahren

Die Auswertung zeigt, dass das Ergebnis ähnlich dem der konventionellen Ventilprüfmethoden ist. Die Verfahren Wirbelstrom (Rang 1), Biegeumlaufprüfung (Rang 3) und Ultraschall (Rang 6) finden in der Serienproduktion von Ventilen bei der Firma MAHLE Ventiltrieb GmbH Verwendung. Eine Art der Thermographie (Rang 2, 5, 7) würde sehr gut für das Leichtbauventil geeignet sein.

Um die Dichtheit der Schweißverbindungen der Ventile zu prüfen stellt die Druckprüfung (Rang 4) eine einfache Methode dar.

Die Biegeumlaufprüfung (Rang 3) ist als Prüfverfahren mit einiger Vorsicht einzusetzen, es kann durch die mechanische Beanspruchung zu einer Vorschädigung des Ventils kommen.

8. Das digitale Röntgen

Das Thema Röntgen wird in einem eigenen Kapitel näher behandelt. Der Grund hierfür ist, dass die MAHLE Ventiltrieb GmbH über eine Mikrofokus-Röntgenanlage verfügt und zu überprüfen ist, ob sich das digitale Röntgen für eine Serienprüfung von Ventilen eignen würde. Diese Antwort findet sich im Kapitel 7 „*Bewertung und Auswahl der Konzepte*“, hier erreichte das Röntgen in der Bewertung den 9 Platz. Die Teilergebnisse dieser Frage werden in diesem Kapitel gezeigt.

8.1 Mikrofokus-Röntgenanlage

8.1.1 Funktionsprinzip

Die meisten Mikrofokus-Röntgengeräte durchstrahlen die Proben mit fächerförmigen Röntgenstrahlen um auf einem Bildempfänger ein vergrößertes Abbild zu erzeugen. Für die Darstellbarkeit eines Fehlers im Röntgenbild sind zunächst drei Größen maßgebend.

- Bildauflösung
- Vergrößerung
- Kontrast

Die erreichbare *Bildauflösung*, darunter versteht man die Bildschärfe, wird im Wesentlichen von der Größe der Röntgenquelle definiert. Bei Mikrofokus-Röntgenröhren liegt man hier im Bereich von wenigen Mikrometern.

Die geometrische *Vergrößerung* ergibt sich aus der Geometrie des Strahlengangs. Der Abstand zwischen Röntgenquelle und Bilddetektor ist konstant, der bewegliche Kreutztisch, auf dem das zu untersuchende Objekt liegt, befindet sich dazwischen.

Abbildung 8-1 verdeutlicht den Aufbau des Systems. Durch vertikales Verschieben des Tisches kann in die Probe gezoomt werden. Vergrößerungen von 1000 bis 2500fachen sind möglich.

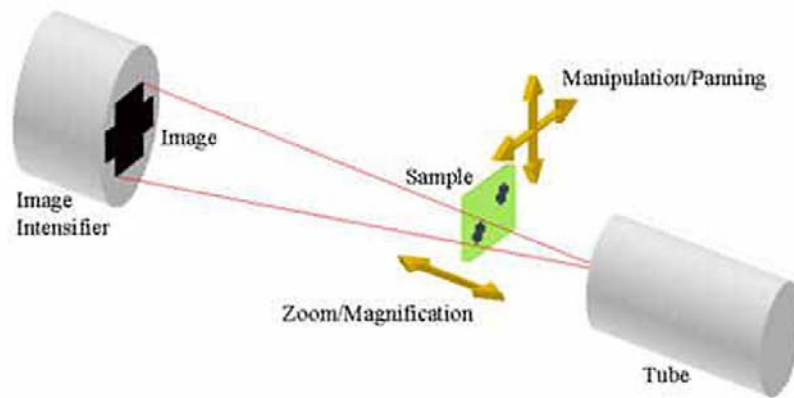


Abbildung 8-1 Prinzip der Röntgeninspektion (Quelle: Dage Semiconductor GmbH)

Der maßgebende Faktor für die Erkennbarkeit von Details bzw. Fehlern ist der *Kontrast*. Der Kontrast wird durch die unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlen hervorgerufen. Diese Absorptionsunterschiede im Ventil können einerseits durch unterschiedliche Materialdicken oder andererseits durch verschiedene Materialkompositionen bewirkt werden. Erst der Kontrast ermöglicht es Fehlerstellen eindeutig zu erkennen.

Voraussetzung dafür sind die Eigenschaften des Detektors, der die technischen Grenzen für einen bestimmten Kontrast liefert.

Ein weiterer Einflussfaktor für den Kontrast ist die Qualität der Röntgenstrahlung. Die Röntgenstrahlung bildet einen Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums mit Wellenlängen zwischen $1 \cdot 10^{-9} \text{m}$ und $5 \cdot 10^{-12} \text{m}$, entsprechend einer Energie der Röntgenquanten von 1keV bis 250keV. Für das Röntgenbild heißt das, je energiegeladener die Strahlung ist, desto leichter kann die Materie durchdrungen werden. Reziprok dagegen ist der Kontrast, umso höher, je langwelliger die Strahlung ist [44].

8.1.2 Röntgenröhre

Röntgenstrahlung entsteht, wenn ein Elektron (schnell geladenes Teilchen) abrupt abgebremst wird. Bei einfachen Röntgenröhren realisiert man dies, indem die austretenden Elektronen aus der Glühkathode durch ein elektrisches Feld zur Anode hin beschleunigt werden. Beim Auftreffen auf die Anode werden sie abrupt gestoppt und emittieren dabei Röntgenstrahlung. Die Größe des Auftreffbereichs liegt bei einigen Millimetern, dieser Bereich wird als Brennfleck bezeichnet, hiermit wären nur sehr unscharfe Röntgenbilder zu erwarten. Bei den Mikrofokus-Röntgenröhren werden die Elektronen durch ein Loch in der Anode in eine magnetische Elektronenlinse geleitet, deren Magnetfeld sie in einen Brennfleck von wenigem $\mu\text{-Meter}$ Durchmesser auf ei-

dem Target (Target (engl.): „Ziel“; bedeutet das Objekt, auf dem der Röntgenstrahl auftrifft) bündelt. Dadurch lassen sich selbst bei hoher Vergrößerung sehr scharfe Bilder erzeugen.

8.1.3 Detektor

Im Detektor werden aus den unterschiedlichen intensiven Röntgenstrahlen, die das Prüfobjekt durchdrungen haben, sichtbare Bilder erzeugt. Der klassische Detektor in der Schweißnahtprüfung ist der radiographische Film. Trotz seiner sehr guten räumlichen Auflösung und ausgezeichneten Kontrastauflösung eignet sich der Röntgenfilm wegen der langen Belichtungszeit nicht für Echtzeit-Röntgenaufnahmen. Dagegen bieten die digitalen Bildverstärker sofortige Live-Bilder, jedoch mit einer wesentlich größeren Auflösung, die nur durch die Mikrofokustechnik ausgeglichen werden kann. Erst bei ausreichender geometrischer Vergrößerung ist allein die Größe der Röntgenquelle für die verbleibende Bildunschärfe maßgebend, so werden auch kleinste Details scharf abgebildet.

Abbildung 8-2 zeigt den Aufbau eines Röntgenbildverstärkers, der in einem Zylinder aus den konvertierten Strahlen sichtbare Bilder erzeugt.

Die Röntgenstrahlen werden, nachdem sie das Werkstück durchstrahlt haben, vom Bildverstärker aufgefangen. Ein Eingangsfenster im Verstärker aus speziellem Aluminium bietet den Strahlen wenig Widerstand. Wenn die Strahlen das Gehäuse überwunden haben treffen sie auf einen Verbund aus drei Einzelschichten, eine Phosphorbeschichtung, eine Cäsiumschicht und eine sehr dünne Photokathoden-Beschichtung. In diesen Schichten werden aus den Röntgenstrahlen Photoelektronen erzeugt.

Die Röntgenstrahlen reagieren sehr empfindlich auf die Phosphorbeschichtung. Sie dient als Speicher und verhindert das Information verloren geht. Die Cäsiumschicht besteht aus ultrafeinen nadelähnlichen Kristallen. Der Vorteil dieser Technologie liegt darin, dass wirklich jeder Röntgenstrahl umgewandelt wird. Die Photokathodenschicht beschleunigt die Lichtteilchen. Im inneren des Verstärkers werden die Teilchen durch Elektronenplatten, die sich entlang des Zylinders befinden, fokussiert. Die Lichtblitze werden so gelenkt, dass sie auf eine zweite Phosphorschicht auftreffen. Diese befindet sich etwas entfernt parallel zum Eingang. Hier durchdringt das Elektron die Schicht und erzeugt dabei sichtbares Licht. Dieses Licht wird mit einem handelsüblichen Digitalkamerachip (CCD = Charge Coupled Devices) aufgefangen und ein Bild erzeugt [45].

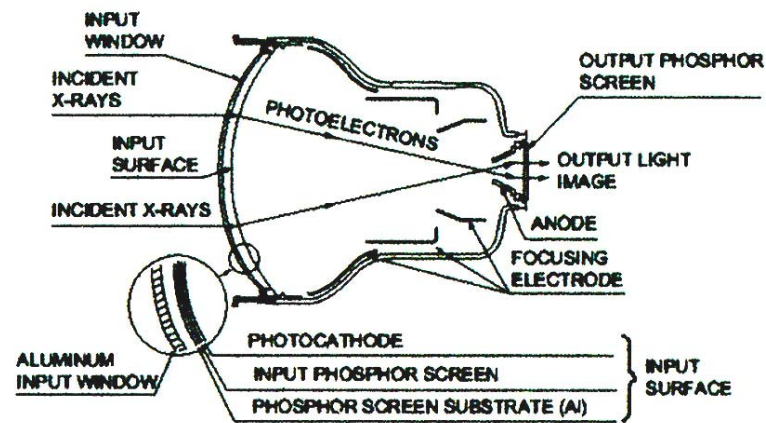


Abbildung 8-2 Aufbau und Funktion des Detektors (Quelle: Hamamatsu Photonics K.K.)

8.2 Röntgenanlage

8.2.1 Grundbegriffe

Die verwendete Anlage der MAHLE Ventiltrieb GmbH wurde von DAGE Semiconductor GmbH erworben. Es wurden seit geraumer Zeit die LBV-Prototypen auf dieser Röntgenanlage auf Anbindungsfehler und v.a. auf Poren untersucht.

Abbildung 8-3 zeigt die Vorderansicht der Mikrofokus-Röntgenanlage XD6600. Zu sehen ist links der Arbeitsplatz mit Eingabegeräten und Bildschirm und in der Mitte die Tür zum Beladen des Kreuztisches.



Abbildung 8-3 Mikrofokus-Röntgenanlage XD6600 (Quelle: Dage Semiconductor GmbH)

Um einen Überblick über die technischen Größen zu bekommen, wurden die wichtigsten Details zusammengefasst:

- Spannungsbereich: 0 bis 160kV
- Bildhelligkeit: 0 bis 3W
- maximale Zuladung: 5kg
- Tischgröße: 505 x 448mm
- Kameraauflösung 1.3 Megapixel
- Bildmittelung: 1024 „Frame“
- Bildauflösung: 1200 x 1600px

Die Anlage ist nur durch die mitgelieferte Software bedienbar, lediglich der Hauptschalter ist manuell zu betätigen. Das Abschalten der Maschine erfolgt nur zu Wartungsarbeiten, da sonst die Vakuumpumpe der Röntgenröhre nicht mehr arbeitet.

Für die Erzeugung von Röntgenbildern kann der Spannungsbereich und die Bildhelligkeit frei gewählt werden, das Ergebnis wird in Echtzeit am Monitor gezeigt. Je nachdem, welcher Bereich am Ventil untersucht wird, sind Spannung und Helligkeit zu wählen.

Tischgröße und maximale Zuladung sind gering. Versuche zeigten, dass der Untersuchungsraum für zirka 50 Ventile, die auf einem speziellen Ventilhalter eingesteckt werden, ausreichend ist. Die maximale Zuladung wird dabei nicht erreicht.

Die Kameraauflösung entspricht mit 1.3 Megapixel sicher nicht mehr dem technischen Standard, doch lassen sich mit dieser geringen Zahl von Bildpunkten detailreiche Bilder erstellen. Wenn man den Trend bei der Entwicklung von CCD-Chips verfolgt, sieht man, dass auf gleich bleibenden Chipgrößen immer mehr Bildpunkte gesetzt werden. Der Nachteil ist, mit zunehmender Zahl der Pixel vermindert sich der Kontrast. Die Folge ist, dass bei schlechten Lichtverhältnissen die Bilder unscharf werden.

Bei neueren Detektoren wurden bereits Kamerachips mit zwei Megapixel-Auflösung verbaut. Ein Vergleich zeigte keine merkbaren Qualitätsunterschiede der Aufnahmen.

Die Bildmittelung, die als „Frame“ bezeichnet wird, kann zwischen 16 und 1024 gewählt werden. Je höher die Mittelung eingestellt wird, desto mehr Tiefenschärfe bekommt die Aufnahme. Fehler und Umrisse sind besser zu erkennen. Die Verbesserung der Bildqualität wird dadurch erreicht, dass bis zu 1024 Einzelbilder im Hintergrund gespeichert werden und ein Mittel gebildet wird. Der Nachteil ist die lange Re-

chenzeit der Anlage (zirka 90 Sekunden). Die Bilder werden im jpg-Format gespeichert.

Abbildung 8-4 zeigt einen Ventilsitz der mit 1024 Frame geröntgt wurde. Sehr gut sind die Poren im Bereich der Laserschweißnaht und die Schweißnahtwurzel zu erkennen.

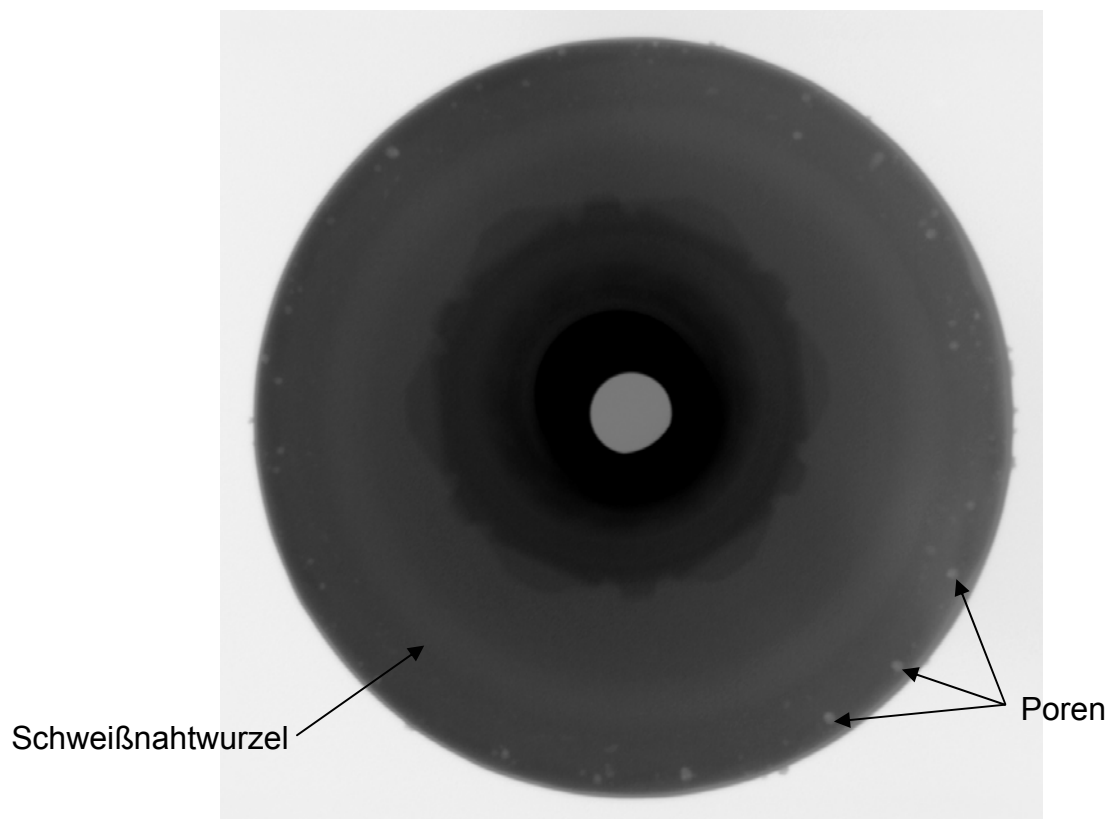


Abbildung 8-4 Röntgenbild eines LBV mit großen Poren

8.2.2 Programmierung

Die Röntgenanlage hat die Funktion automatische Messaufgaben auszuführen. Ein Teil dieser Diplomarbeit bestand darin, solche automatischen Abläufe zu programmieren um festzustellen, ob sich das automatisierte Röntgen für eine Serienprüfung eignet. Der Vorteil des Programms ist, dass an einem Werkstück der Messablauf festgelegt wird und über definierte Punkte kann eine beliebige Anzahl von Teilen in die Untersuchung mit einbezogen werden.

Das Erstellen eines automatischen Messablaufs erfolgt in zwei Aufgaben. Die erste Aufgabe beinhaltet das Festlegen des Messbereichs und die Anzahl der Teile. Dieser Teil der Programmierung wird in zwölf Schritte unterteilt und ist durch eine einfache Bildoberfläche zu handhaben. Im zweiten Aufgabenbereich wird die eigentliche Feh-

lermessung programmiert. Es wird der Messbereich für die Fehlererkennung definiert. Eine Maske legt den Bereich der Untersuchung fest.

8.3 Genauigkeit

Bevor man mit den eigentlichen Messungen beginnen konnte war es notwendig, einige Messreihen für die Wiederholgenauigkeit und für die Reproduzierbarkeit zu erstellen, die für eine exakte Auswertung der Messergebnisse von höchster Notwendigkeit sind.

8.3.1 Wiederholgenauigkeit

Definition Wiederholgenauigkeit [46]:

Die *Wiederholgenauigkeit*, vor allem von technisch-naturwissenschaftlichen Versuchen bedeutet, dass sich die Abweichung bei den Messwerten innerhalb konsistenter Grenzen bewegen muss. (z.B.: dem Dreifachen der Standardabweichung)

Der Ablauf gestaltet sich sehr einfach. Es werden drei Ventile aus einer Vorproduktion verwendet, diese in vier Positionen (0° – 90° – 180° – 270°) im Uhrzeigersinn gedreht und in vier Sätzen wiederholt eine Röntgenaufnahme gemacht. Durch diese Dreh-Wiederhol-Methode kann der Einfluss des Verdrehens untersucht werden. Dabei kam die automatische Fehlererkennung zum Einsatz, als Vergleichsgröße dient die Prozentzahl aller Fehlstellen zur vordefinierten Untersuchungsfläche. Der Außendurchmesser der Ventile wird als Sicherheitsgröße zusätzlich gemessen. Ventile die nicht richtig im Ventilhalter positioniert sind, erscheinen im Röntgenbild als Ellipse und somit wird der Durchmesserwert kleiner angezeigt.

Tabelle 7-1 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung *Wiederholgenauigkeit*. Die Einstellungen der Röntgenanlage (150kV; 2,4W; 128 Frames) wurde beibehalten.

Ventil 1

		Durchmesser [μm]	Rundheit [%]	Gesamtfehler [%]	größter Fehler [%]
1 Messung	0°	33796	100	1,4	0,07
	90°	33829	100	0,3	0,05
	180°	33813	100	1,9	0,07
	270°	33797	100	3,7	0,10
2 Messung	0°	33823	100	1,3	0,06
	90°	33829	100	2,1	0,07
	180°	33866	100	0,1	0,03
	270°	33857	100	0,1	0,03

3 Messung	0°	33881	100	0,0	0,00
	90°	33861	100	0,5	0,08
	180°	33882	100	0,0	0,00
	270°	33875	100	0,0	0,00
4 Messung	0°	33839	100	0,2	0,02
	90°	33807	100	1,7	0,80
	180°	33804	100	0,8	0,25
	270°	33820	100	0,9	0,35

Ventil 2

		Durchmesser [µm]	Rundheit [%]	Gesamtfehler [%]	größter Fehler [%]
1 Messung	0°	33752	100	1,0	0,08
	90°	33783	100	2,0	0,07
	180°	33755	100	1,9	0,08
	270°	33760	100	1,8	0,09
2 Messung	0°	33768	100	1,1	0,07
	90°	33779	100	2,1	0,08
	180°	33819	100	0,2	0,04
	270°	33805	100	0,2	0,04
3 Messung	0°	33844	100	0,0	0,00
	90°	33813	100	0,6	0,10
	180°	33834	100	0,0	0,00
	270°	33832	100	0,8	0,09
4 Messung	0°	33793	100	1,3	0,20
	90°	33753	100	1,6	0,80
	180°	33746	100	0,8	0,25
	270°	33763	100	0,9	0,55

Ventil 3

		Durchmesser [µm]	Rundheit [%]	Gesamtfehler [%]	größter Fehler [%]
1 Messung	0°	33780	100	1,1	0,10
	90°	33835	100	0,2	0,05
	180°	33782	100	1,8	0,09
	270°	33789	100	1,4	0,09
2 Messung	0°	33792	100	1,2	0,09
	90°	33805	100	2,1	0,10
	180°	33838	100	0,1	0,03
	270°	33839	100	0,2	0,03
3 Messung	0°	33865	100	0,0	0,00
	90°	33849	100	0,5	0,05
	180°	33858	100	0,0	0,00
	270°	33858	100	0,8	0,10
4 Messung	0°	33815	100	1,6	0,40
	90°	33781	100	1,7	0,75
	180°	33775	100	0,9	0,35
	270°	33786	100	1,1	0,40

In den Messergebnissen sind sehr starke Schwankungen zu erkennen. Wobei die Messung des Außendurchmessers mit einem relativen Fehler unter 1% als positiv zu werten ist, sind die Ergebnisse aus den Fehlermessungen sehr unterschiedlich.

Beim Untersuchen der 48 Röntgenaufnahmen ist zu erkennen, dass die Software die großen Fehlerstellen, trotz des Verdrehens im Halter, sehr gut erkennt.

In Abbildung 8-5 sieht man einen Vergleich von Ventil 3. Der große Fehler (rot gekennzeichnet) wird nach dem Drehen des Ventils wieder erkannt.

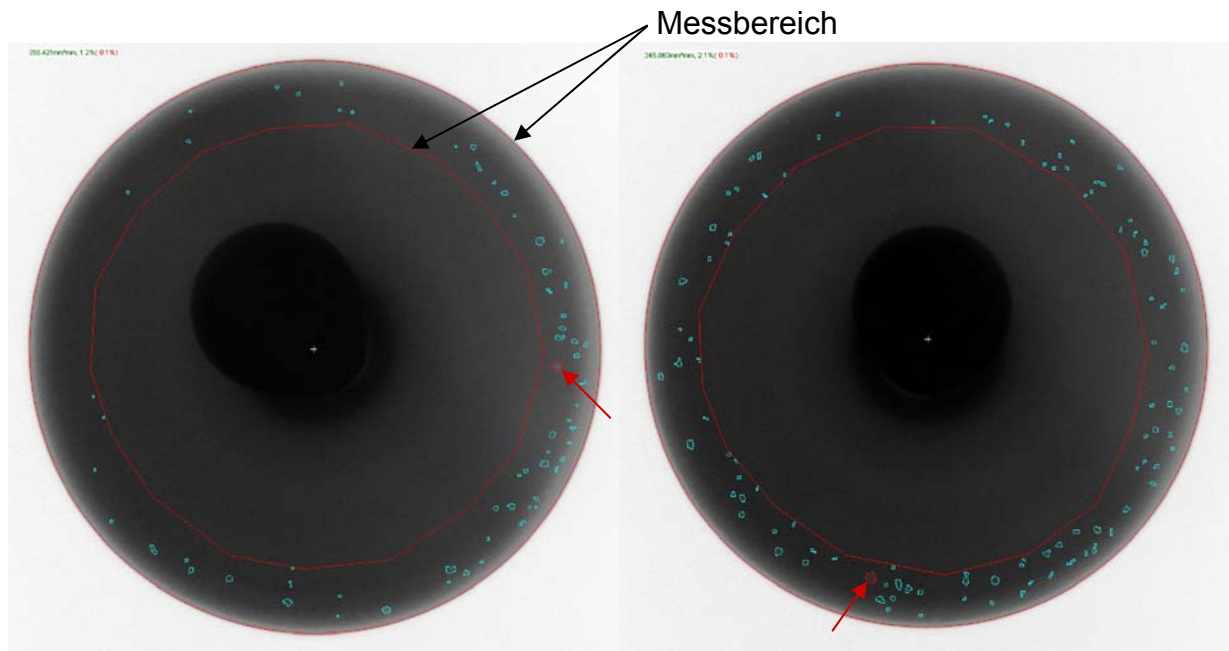


Abbildung 8-5 links sieht man die Ausgangsposition, rechts um 90 Grad gedreht

Eine sehr wichtige Erkenntnis aus der Untersuchung der Wiederholgenauigkeit ist, dass die Anlage empfindlich auf Veränderungen reagiert. Denn beim händischen Drehen der Ventile ist man nicht in der Lage die senkrechte Position des Schaftes wieder herzustellen, somit kommt es zu einer neuen Winkelstellung des Schaftes und die Ergebnisse der Röntgenuntersuchung schwanken sehr stark untereinander. Die Reproduzierbarkeit soll zur Empfindlichkeit mehr Erkenntnis bringen.

8.3.2 Reproduzierbarkeit

Definition Reproduzierbarkeit [47]:

„Eine Messung ist *reproduzierbar*, wenn sich bei einer Wiederholung unter gleichen Bedingungen (Betriebszustand des Messobjekts, Umgebungsverhältnisse etc.) abgesehen vom zufälligen Fehler, dasselbe Messresultat ergibt.“

Da bei der Messung der Wiederholgenauigkeit der Außendurchmesser mit einem kaum messbaren Fehler wiedergegeben wird, beschränkt sich die Reproduzierbarkeitsmessung auf die Fehlstellen.

Es wurde ein Ventil aus einer neuen Vorserie entnommen und im Röntgengerät fest verankert. Dazu wurde ein verschraubbarer Halter am Schlitten verklebt. Der Kreuzschlitten ist über die 20 Messungen in konstanter Position geblieben. Die Messreihe beschränkt sich auf die Messung der Fehlstellen (Poren).

Tabelle 7-2 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung *Reproduzierbarkeit*. Es wurden dieselben Geräteeinstellungen wie bei der Wiederholgenauigkeit verwendet.

Ventil 4

	Durchmesser [μm]	Rundheit [%]	Gesamtfehler [%]	größter Fehler [%]
1 Messung	41722	100	1,211	0,039
2 Messung	41725	100	1,088	0,028
3 Messung	41726	100	1,227	0,036
4 Messung	41727	100	1,153	0,027
5 Messung	41727	100	1,066	0,039
6 Messung	41728	100	1,051	0,032
7 Messung	41727	100	1,151	0,033
8 Messung	41728	100	1,008	0,025
9 Messung	41727	100	1,137	0,036
10 Messung	41728	100	1,086	0,035
11 Messung	41728	100	1,032	0,032
12 Messung	41727	100	0,900	0,031
13 Messung	41728	100	0,917	0,032
14 Messung	41728	100	0,967	0,028
15 Messung	41729	100	0,832	0,024
16 Messung	41729	100	0,934	0,028
17 Messung	41729	100	0,813	0,023
18 Messung	41728	100	0,937	0,028
19 Messung	41729	100	1,095	0,033
20 Messung	41729	100	0,901	0,029

Die Fixierung des Ventils am Schlitten brachte nicht die erhoffte Verbesserung in den Messergebnissen. Nach den Gauß'schen Fehlerberechnungen ergab sich ein relativer Fehler von 12% für die Gesamtporenanzahl bzw. ein relativer Fehler von 15% bei den größten Fehlerstellen.

Dieses Ergebnis ergibt eindeutig, dass die relative Bewegung sowie eine Veränderung der Lage der Ventile kaum einen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Es ist jedoch noch zu untersuchen welche Faktoren für die Messungenauigkeiten verantwortlich sind.

8.3.3 Eichschablone

Durch die enge Zusammenarbeit mit dem Gerätehersteller der Röntgenanlage ist eine Lochschablone zu Verfügung gestellt worden. Diese ermöglicht es durch vordefinierte Löcher eine Vergleichsbasis zur Genauigkeit der Fehlermessung.

Abbildung 8-6 zeigt die Lochplatte mit 10 Blechfenstern. Jedes dieser Blechplatten ist mit einem Loch versehen, das einen definierten Flächen-Prozentanteil hat. Die Lochgrößenanteile gehen von 1% bis 70% der Plattengröße. Der schwarze Rahmen dient als Trägereinheit und Kontrasthilfe. Bei der automatischen Fehlererkennung der Röntgenanlage wird die quadratische Platte als Grenze und das Loch als Fehler erkannt. Die errechnete Fehlermessgröße des Programms dient als Vergleich.

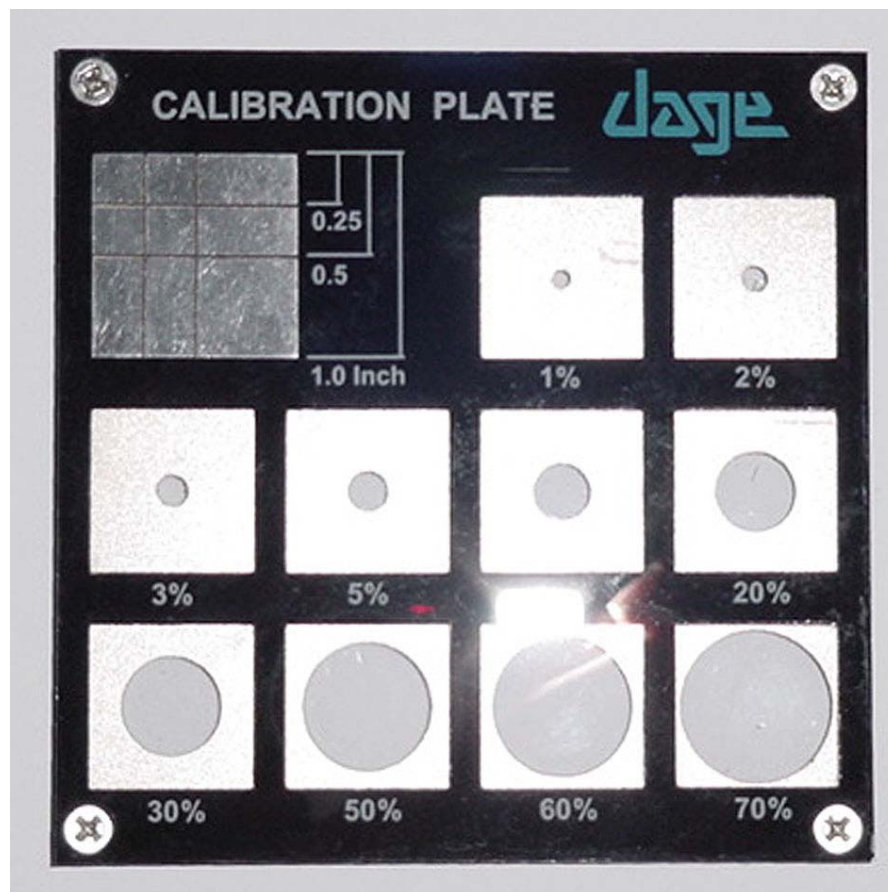


Abbildung 8-6 Eichplatte mit Vordefinierten Fehlern

Bei der Messung ist ein Sicherheitsabstand von 196 mm zum Detektor eingehalten worden. Dieser dient einerseits als definierter Abstand um ein gleich bleibendes Ergebnis zu erzielen und andererseits um den Detektor vor Beschädigungen zu bewahren. Um genaue Messergebnisse zu erzielen wurden die Bohrungen siebenmal vermessen

und zusätzlich gedreht. Danach erfolgte eine Auswertung des relativen Fehlers nach Gauß. Die Auswertung erfolgte bis zur Fehlergröße von 20%.

Abbildung 8-7 zeigt eine Zusammenfassung der Messung des relativen Fehlers. Es zeigt sich eine Abhängigkeit der Fehlergröße (Void) und dem relativen Fehler beim vordefinierten Abstand zum Detektor.

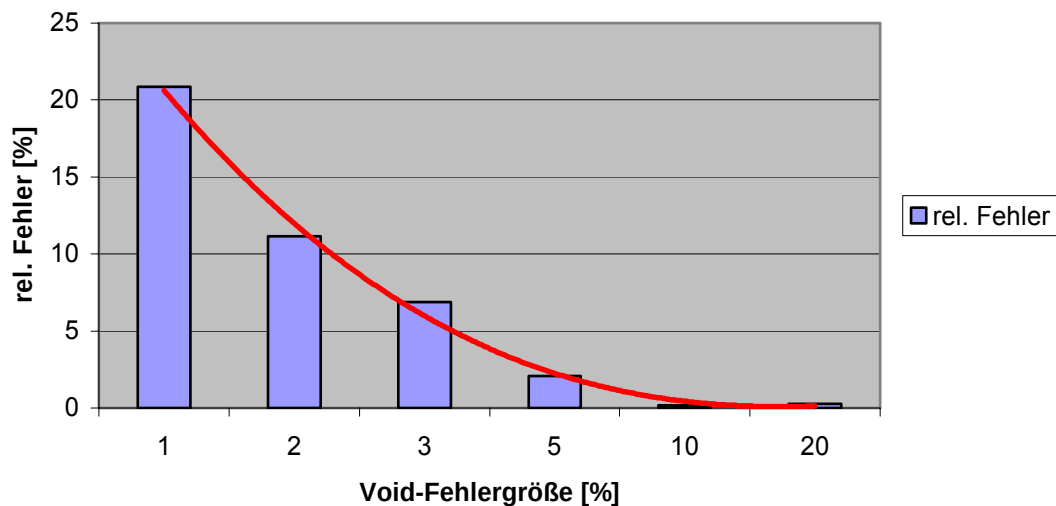


Abbildung 8-7 Relativer Fehler zum wahren Wert

Da der relative Fehler beim kleinsten Loch (1% Void) sehr hoch ausfällt, wurde auch der Einfluss des Abstandes zum Detektor untersucht. Als *Void* bezeichnet man in der Verbindungstechnik (Leiterplattenbau) Fehlstellen im Bereich der Anschlüsse. Diese entstehen beim Prozess des Lötens und sind kleine Lufteinschlüsse im Lötgut. Da dieses Röntgensystem für den Leiterplattenbau konzipiert wurde, kann die Bezeichnung leider nur übernommen werden. Ein Wiederholen der Messung mit verkleinerten Sicherheitsabständen soll Aufschluss geben.

Abbildung 8-8 zeigt den Zusammenhang zwischen relativem Fehler und Sicherheitsabstand. Eine Reduzierung des Fehlers von 21% auf 6% ist möglich, wenn der Abstand des Detektors zur Röntgenröhre auf 64mm reduziert wird.

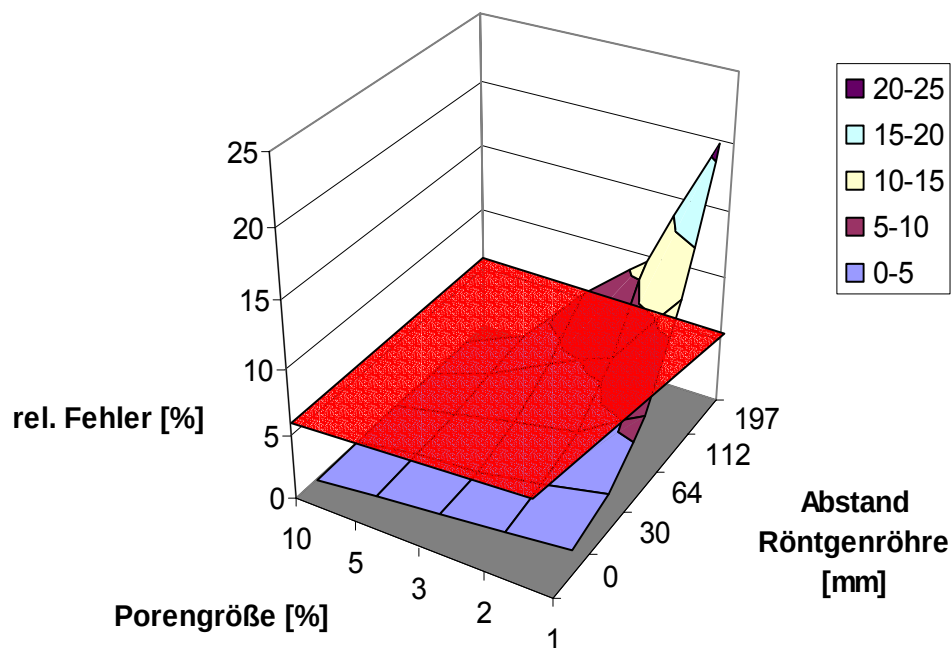


Abbildung 8-8 Zusammenhang relativer Fehler und Röntgenröhrenabstand

Ein Nachteil ergibt sich hierbei für die Untersuchung der Ventile. Es ist notwendig die Ventile in zwei bzw. in vier Schritten zu untersuchen, da durch die bauliche Größe der Teile die Anlage nicht im Stande ist, das vollständige Ventil mit einem kleinen relativen Fehler darzustellen. Dabei entsteht an den Untersuchungsgrenzen eine Ungenauigkeit, die den relativen Fehler wieder erhöht.

8.4 Bildbearbeitung und Filter

Um einen schnellen visuellen Eindruck von der Qualität des Ventils zu bekommen, sind Röntgenbilder mit der höchsten „digitalen“ Auflösung (1024 Frames) erzeugt worden. Um die Poren bei den erzeugten Röntgenbildern besser visuell sichtbar zu machen, wurden die Bilder mit einem Grafikbearbeitungsprogramm gefiltert. Mit der Erzeugung eines Relief-Bildes wurden gute Ergebnisse erzielt, jedoch waren immer einige Stellen im Bild zu undeutlich um eine genaue Aussage zu treffen.

In Abbildung 8-9 sind ein Röntgenbild und ein Reliefbild zu sehen. Es handelt sich um ein und dasselbe Bild. Eine Gegenüberstellung zeigt, welche Fehler man übersehen würde, diese sind mit Pfeilen gekennzeichnet.

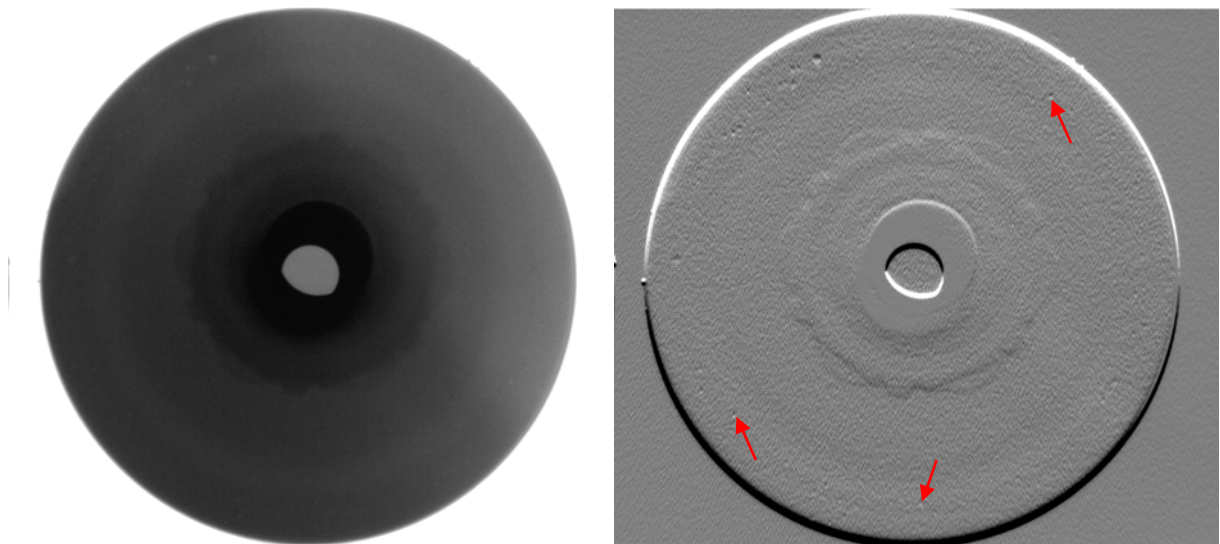


Abbildung 8-9 Links das Röntgenbild, rechts das gefilterte Röntgenbild

Der Filter verändert das ausgewählte Bild grundlegend. Eine Veränderung der Farbe sowie auch der Tiefenschärfe sind im Grafikbearbeitungsprogramm einfach zu erzeugen.

Mit dem Filter kann man die Helligkeitswerte jedes Pixels im Bild entsprechend einer vordefinierten mathematischen Operation, der so genannten *Faltung* ändern. Jedem Pixel wird ein neuer Wert zugeteilt, der auf den Werten der umliegenden Pixel basiert [48].

In Abbildung 8-10 wird der Aufbau eines Filters in einer 5x5 Matrix beschrieben. Im mittleren Textfeld, dass das zu bewertende Pixel darstellt, werden Werte eingetragen mit dem der Helligkeitswert des betrachteten Pixels multipliziert wird. Werte von -999 bis +999 sind zulässig. Ein positiver Wert hellt den Bildpunkt auf und ein negativer verdunkelt das Pixel. In den angrenzenden Textfeldern werden ebenfalls Werte eingetragen, die die Helligkeit des Pixels multiplizieren. Weiters werden noch zwei Werte angegeben, die Einfluss auf die Matrix haben. Der Erste ist die „Skalierung“, der die Summe der Helligkeitswerte der Pixel, die in der Berechnung enthalten sind, dividiert. Der zweite Wert ist die „Verschiebung“, der zum Ergebnis der Skalierungsberechnung addiert wird.

0	0	1	1	4
1	-2	0	4	4
-2	-2	-5	2	2
-2	-2	0	2	1
-2	-3	-1	0	0

Abbildung 8-10 Filtermatrix (5x5), zur Darstellung von kleinen Poren

8.5 Ergebnisse

Bei der Untersuchung der Einzelergebnisse ergaben sich zwei Schwachpunkte, die zeigten dass sich das Mikrofokus-Röntgen nicht für eine Serienprüfung eignet. Der erste Schwachpunkt liegt bei der Genauigkeit, mit einem relativen Fehler von über 10 Prozent ist es schwer, eine klare Aussage über Porenverteilung und Porenanzahl zu formulieren. Die zweite Schwachstelle ist die Messzeit pro Ventil. Die Anlage ist leider nicht im Stande die Prüfzeit von 4 Sekunden, die maximal für jede Messung zur Verfügung steht, einzuhalten. Jedoch lässt sich über die Menge der Ventile Einfluss darauf nehmen, je mehr Ventile pro Messvorgang untersucht werden umso kürzer wird die Prüfzeit für das einzelne Leichtbauventil.

Ein weiterer Nachteil liegt in der Sensibilität der Röntgenanlage. Für jede neu gefertigte Serie an Ventilen wird ein neues Einstellteil für die Empfindlichkeitsparameter der Anlage benötigt. Diese Einstellungsarbeiten sind mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Dadurch wird ein kontinuierliches Arbeiten unmöglich.

Es zeigte sich im Laufe der Versuchsreihen jedoch ein optimales Einsatzgebiet der Anlage. Für eine schnelle, stichprobenartige Untersuchung ist die Röntgenanlage bestens geeignet. Der Zeitaufwand ist gering und das Ventil ist für weitere Versuche und Untersuchungen unbeschädigt.

In der Serienprüfung würde sich das Mikrofokus-Röntgen nur für eine Stichprobenüberprüfung einer Ventilserie eignen.

9. Fertigungsablaufplan Leichtbauventil

Der Fertigungsplan soll die zerstörungsfreien Prüfverfahren, die nach Kapitel 6 ausgewertet wurden, in die Serienproduktionskonzeption integrieren.

9.1 Allgemeines

Der Ablauf beginnt mit dem Zusammenbau der ersten Schweißnaht Teller-Rohr (ZB1). Danach erfolgt ein schrittweiser Fertigungsplan bis zur Endkontrolle.

Die Fertigung erfolgt in drei Hauptgruppen:

- Rohteilherstellung
- Pre-Line
- Finish-Line

In der *Rohteilherstellung* werden die Blechmaterialien angeliefert, verarbeitet und die Rohblecheinzelteile erzeugt. Es folgt das Laserschweißen aller Nähte, dass notwendige Prüfen, sowie das optionale Befüllen des Rohres mit Natrium. Danach wird das Schaftendstück (VSE) reibverschweißt und das Rohventil geglüht.

Die Abbildung 9-1 zeigt ein Rohventil nach dem Schweißprozess ohne VSE.



Abbildung 9-1 Rohventil nach dem Laserschweißen ohne Ventilschaftende (VSE)

In der *Pre-Line* werden die einzelnen Bereiche des Ventils vorbearbeitet. Es beinhaltet die Bearbeitung des Schaftes, des Tellers und des Ventilsitzes.

Der letzte Teil, die *Finish-Line*, beinhaltet die Fertigbearbeitung der Funktionsflächen am Ventil, die Oberflächenveredelung und Endkontrolle.

9.2 Aufbau

Es soll ein Ablauf entwickelt werden, der eine effiziente Prüfmethode enthält und den Qualitätsansprüchen der MAHLE-Ventiltrieb GmbH entspricht.

Ein wichtiges Kriterium ist, die Bereiche des Ventilsitzes und der Teller-Rohr-Naht zu überprüfen. Hier sollte eine Überprüfung vor der Endbearbeitung erfolgen, um die Herstellkosten niedrig zu halten.

Die Stichprobenprüfung wird in einer getrennt laufenden Schiene angeführt.

Auf Maschinenkosten, Personalaufwand und Flächenbedarf wird hier nicht eingegangen. Die Taktzeiten sind ein wesentlicher Teil dieser Arbeit und werden für jeden Teilschritt als theoretischer Wert angegeben.

9.3 Prozessablauf

Im *Anhang B* befindet sich der Fertigungsablauf über der Zeitachse. Es beginnt mit dem Fertigungsschritt (FS) Laserschweißen Teller/Rohr und endet mit dem Verpacken der Ventile.

Tabelle 9-1 zeigt in tabellarischer Form den Fertigungsablauf des Auslass-Leichtbauventils. In der Spalte *Operationen* werden die Fertigungsaufgaben angegeben. Bei der *Maschinen*-Spalte wird die notwendige Technik aufgelistet, die für den Zu- und Abtransport eingesetzt wird, sowie die Maschinen für die Bearbeitung [49]. Der *Maschinentakt* in Sekunden ist die theoretische Zeit, die für den FS notwendig ist. Die Begriffe werden im nachfolgenden Kapitel 9.4.1 genauer erläutert.

Tabelle 9-1 Fertigungsablauf Auslassventil

	FS	Operationen	Maschinen	Maschinentakt [s]
Rohteilherstellung	1	Laserschweißen Teller/Rohr -> ZB1	autom. Zuführung Rohr (Schüttgut) autom. Zuführung Teller (Schüttgut) Laserschweißvorrichtung mit autom. Verkettung Nd-YAG-Laser, 2 kW	4
	2	Thermographie Schweißnaht Teller/Rohr	autom. passive Thermographie-Prüfeinrichtung im Abkühlprozess Laserschweißen	2
	3	Laserschweißen Teller/Kegel/Rohr-> ZB2	autom. Zuführung Teller/Rohr (Schüttgut) autom. Zuführung Kegel (Schüttgut) Laserschweißvorrichtung mit autom. Verkettung Abkühlstrecke Nd-YAG-Laser, 3 kW	4
	4	Sitzvorbearbeitung (Drehen)	Wendelgleitförderer Saugverkettung Drehmaschine Waschband	4,5
	5	Thermographie gesamt ZB2	autom. Aktive Thermographie-Prüfeinrichtung	3
	6	Mikrofokus-Röntgen zur Losfreigabe/ Stichprobenprüfung	Mikrofokus-Röntgeneinrichtung, manuell bedient	
	7	Wirbelstromprüfung Sitz ZB2	Saugverkettung autom. WS-Prüfeinrichtung	3
	8	Natrium Füllen Rohr	Saugverkettung Na-Befüllereinrichtung (Hotmelt-Anlage)	6
	9	Reibschweißen Schaftendenstück -> ZB3	autom. Zuführung Schaftendenstück (Schüttgut) Reibschweißmaschine -> Schüttgut	8
	10	Drehen Reibschweißwulst	Wendelgleitförderer Saugverkettung Drehmaschine -> Schüttgut	5
	11	Anlassen, 650°C	Durchlaufofen; in kleinen Kisten als Schüttgut	var.
	12	Biegeprüfung	Saugverkettung Biegeprüfmaschine	4
Pre-Line	13a	Schaft egalisieren	Saugverkettung Centerless-Schleifmaschine Waschband -> Schüttgut	4,5
	13b	Länge schleifen	Wendelgleitförderer Saugverkettung Längenschleifmaschine Waschband	5
	14	Härten Schaftende	Saugverkettung Härtemaschine	4,5

Finish-Line	15	Vorschleifen Schaft	Saugverkettung	4,5
			Centerless-Schleifmaschine	
			Waschband -> Schüttgut	
	16	Ultraschallmessen Reibschweißnaht	Modul Lageprüfung	3
	17	Tellerbearbeitung (Drehen): Teller Ø, Tellerfacette, Tellerfläche	Wendelgleitförderer	9
			Saugverkettung	
			Drehmaschine	
			Waschband	
	18	Bearbeitung Schaftende: Rille, Fase, Fuß	Saugverkettung	5
			HSG-Maschine	
	19	Fertigschleifen Sitz ggf. inklusive Kantenbruch	Saugverkettung	8
			Sitzschleifmaschine	
			Waschband	
	20	Fertigschleifen Schaft	Saugverkettung	4,5
			Centerless-Schleifmaschine	
			Waschband	
			Pufferzelle, palettiert	
	21	Verchromen	Saugverkettung	5
			Inline-Chromanlage	
	22	Läppen Schaft	Saugverkettung	4,5
			Läppmaschine	
			Pufferzelle, palettiert	
	23	Kennzeichnung	Signiergerät	4,5
	24	Waschen, Trocknen	Saugverkettung	4,5
			EKV-Waschanlage	
	25	Messen, Prüfen, Verpacken	Modul Maßprüfung: Maße, Rund- und Planläufe	4,5
			Modul Dichtheitsprüfung	
			Modul Rissprüfung: Fußbereich (Härterisse)	
			Sortier-Einheit	
			Saugverkettung	
			Sichtprüfplatz	

Beim Einlass-Leichtbauventil sind Pre-Line und Finish-Line identisch. In der Rotheilherstellung entfällt das Natriumfüllen (FS: 8) des Rohres.

Durch alternative Materialien kann es zu Änderungen im Ablauf kommen.

9.4 Begriffserklärung

Um die Maschinen-und Transporteinheiten besser zu verstehen, werden diese kurz beschrieben. Zusätzlich wird die spezielle Anwendung von Messtechnik beschrieben.

9.4.1 Allgemeines

„Schüttgüter sind als eine Vielzahl von Einzelgütern mit relativ kleinen Abmessungen aufzufassen.“ Man bezeichnet sie auch als Massengüter, die in z.B. Kisten oder Paletten transportiert werden [49].

Beim *Wendelgleitförderer* wird eine Förderrinne schraubenförmig um eine senkrechte Achse gelegt. Das Fördergut wird durch einen niederfrequent arbeitenden Unwuchtantrieb nach oben bewegt [49].

Die *Saugverkettung* wird für den schnellen Weitertransport der Ventile zu den einzelnen Bearbeitungsstationen verwendet. Dabei wird mit Saugluft das Stückgut durch Kunststoffschläuche bewegt. Die Ausschleusung des Fördergutes aus dem Ausscheider erfolgt meist mit einem Zellenrad.

Das *Waschband* besteht aus einem Kettenband auf dem die Ventile liegen und durch eine Reinigungsanlage befördert werden. Die Anlage reinigt und trocknet die Rohteile, die Reinigungsflüssigkeit fließt durch das Kettenband ab, wird darunter gesammelt und gefiltert.

Die *Natriumbefüllung* erfolgt vollautomatisch. Da Natrium mit Wasser stark chemisch reagiert muss auf konstante, niedrige Luftfeuchte geachtet werden. Das Natrium wird mittels einer Presse aus Kartuschen mit circa 1kg Inhalt stäbchenförmig in die Ventile gefüllt, dabei schneidet ein rotierendes Messer die ausgepressten Stäbchen mengen genau ab. Mittels Stickstoff wird das Natriumstäbchen dann ins Ventil geblasen, so dass es sicher am unteren Ende aufliegt und beim anschließenden Reibschweißen von der Naht entfernt ist.

Der Ablauf des *Reibschweißens* wird im Kapitel 3.2 genauer beschrieben.

Bei den *Pufferzellen* handelt es sich um kleine Lagerplätze. Dadurch werden kurzfristige Schwankungen zwischen den einzelnen Fertigungsstationen ausgeglichen.

9.4.2 Anwendung der Messtechnik

Um die Lage der Reibschweißnaht festzustellen wurde hierfür eine spezielle Vorrichtung entwickelt. Die Schweißnaht darf sich nur zwischen zwei definierten Grenzen befinden, ansonst liegt Ausschuss vor. Es werden zwei Ultraschallköpfe in einem definierten Winkel zueinander auf dem Schaft des Ventils gerichtet.

Abbildung 9-2 zeigt die Vorrichtung mit dem angedeuteten Ventil. Das Ventil dreht sich um seine Symmetrieachse. Dabei kontrolliert der eine Ultraschallkopf die obere Grenze und der andere die untere Grenze der Reibschweißnahtlage. Die Handräder sind für die exakte Positionierung der Köpfe. Ab einer Rauhtiefe von $6,3\mu\text{m}$ kommt es zu Störsignalen durch Rauschen, diese müssen bei der Auswertung nachträglich gefiltert werden.

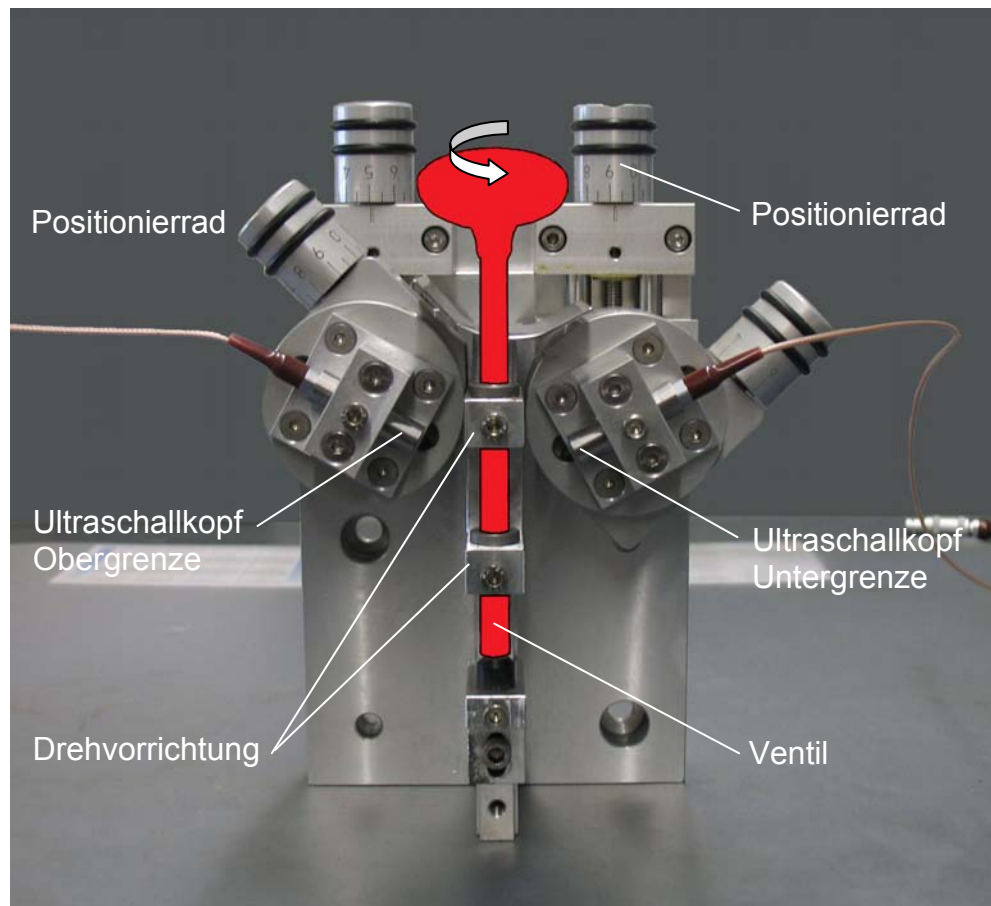


Abbildung 9-2 Messeinrichtung für die Reibschweißnaht am LBV; Ausrichtung für einlanges VSE (Quelle: Mahle)

Diese Vorrichtung überprüft lediglich die Lage der Reibschweißnaht. Eine Aussage über Qualität derselben ist nicht möglich.

9.5 Zusammenfassung Prozessablauf

Eine Überprüfung der Schweißnaht ZB1 erfolgt unmittelbar nach dem ersten Fertigungsschritt (FS: 1). Diese frühe Kontrolle ist notwendig, weil die nachfolgende Operation (ZB2) diese Schweißstelle überdeckt. Die Thermographie wurde hier eingesetzt, da die Wärmestrahlung, die durch den Laserschweißprozess entsteht, genutzt werden kann.

Im Fertigungsschritt 5 wird das komplette Rohteil einer Thermographieuntersuchung unterzogen. Hier sollte besonders darauf geachtet werden, ob eine sauber geschweißte Verbindung zwischen Kegel und Rohr vorliegt. Durch die krumme Oberfläche ist diese Stelle mit Prüfverfahren aus dem konventionellen Ventilbau nur erschwert zu messen. Das Vorbearbeiten des Ventilsitzes ist notwendig, um die Poren zu erkennen, die eventuell knapp unter der Oberfläche liegen und durch die Endbearbeitung freigelegt werden könnten. Daher eine vollständige Überprüfung mit der Thermographie.

Zusätzlich erfolgt noch eine Kontrolle des Sitzes mit Wirbelstrom. Der vorgefertigte Ventilsitz unterscheidet sich nur gering von dem eines konventionellen Ventils. Die jahrelange Erfahrung mit diesem Prüfverfahren kann hier genutzt werden um schadhafte Ventile auszusortieren.

Das digitale Röntgen (FS: 6) eignet sich wohl nicht für die Serienüberprüfung, es ist jedoch für eine Losfreigabe oder eine Stichprobenprüfung gut geeignet. Diese Kontrolle der teilgefertigten Leichtbauventile würde parallel zur Produktion ablaufen. Eine angepasste Software wäre eine Voraussetzung für die Anwendung des hier eingesetzten digitalen Röntgengerätes.

Die Biegeprüfung (FS: 12) ist ein adaptiertes Messinstrument aus dem konventionellen Ventilbau. Bei diesem Prüfverfahren ist zu beachten, dass es zu einer Vorschädigung des Ventilschaftes kommen kann. Auch hier liegt eine jahrelange Erfahrung mit diesem Prüfverfahren vor.

Nach den ersten Schleifprozessen des Ventilschaftes erfolgt eine Überprüfung der Reibschweißnahtlage mit Ultraschall (FS: 16). Eine Beschreibung des Verfahrens findet man im Kapitel 9.4.2. Die Position sollte innerhalb der definierten Grenzen liegen, damit es in der Ventilfehrung nicht zu unzulässig hohen Spannungen in der Naht kommt, die zu einem Schaftbruch führen können.

Eine ausführliche Endkontrolle durch nochmaliges Messen mit Wirbelstrom oder Ultraschall kann entfallen, da durch die letzten Fertigungsschritte kaum noch Material abgetragen wird und eventuell versteckte Fehler bereits durch die vorhergehenden Überprüfungen entdeckt worden wären.

Die Module Dichtheitsprüfung und Rissprüfung (FS: 25) werden optional eingesetzt. Die Dichtheitsprüfung soll für Natrium gefüllte Ventile zum Einsatz kommen um undichte Stellen (Anbindungsfehler) ausfindig zu machen. Die Rissprüfung im Ventilsitzbereich soll bei gepanzerten Ventilen eine Möglichkeit bieten, die Härterisse sichtbar zu machen.

Eine letzte Kontrolle erfolgt durch eine Sichtprüfung der Oberflächen. Optische Fehler werden erkannt und die schadhafte Ventile aussortiert.

10. Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren zu finden, die in der Serienproduktion des Leichtbauventils zum Einsatz kommen können. Erstellt wurde ein Serienprüfkonzept für ein neuwertiges Ventil, das in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden soll. Es besteht aus einzelnen Stahlblechelementen, die mit modernen Schweißmethoden miteinander verbunden werden. Die Schweißstellen, die die einzelnen Blechelemente miteinander verbinden, sind die Untersuchungsbereiche für das erstellte Prüfkonzept.

Das Leichtbauventil bietet neben dem geringen Gewicht noch weitere Vorteile gegenüber konventionellen Ventilen. Nennenswerte Gewinne sind die erhöhte Motordrehzahl und die reduzierte Reibleistung, die eine Erhöhung der Motorleistung bewirkt und den Verbrauch reduziert. Weiters ist mit einem geringeren Verschleiß an Ventilsitzring und Ventilsitz zu rechnen. Ein wirtschaftlicher Faktor sind die geringeren Herstellkosten im Vergleich zu anderen Leichtventilkonzepten.

Die angewandten Fügetechniken am Leichtbauventil sind als sehr modern einzustufen. Das Laserstrahlschweißen entwickelte sich in den letzten Jahren als eines der wichtigsten Werkzeuge in der industriellen Fertigung. Die hohe Schweißgeschwindigkeit, die schmale und schlanke Nahtform sowie der geringe thermische Verzug, sind bestens geeignet für das Fertigen des Leichtbauventils. Die verwendeten Nickel-Basis-Werkstoffe sind jedoch nur schwer zu beherrschen und gelten allgemein als nicht schweißbar. Das hier verwendete Reibschweißen ist eine Hochleistungsmethode des traditionellen Verfahrens, bei dem mit hoher Drehzahl und kurzen Fügezeiten gearbeitet wird.

An den vier Schweißstellen sind Fehler nicht ausgeschlossen. Die Verbindung Teller/Rohr wird als nicht kritisch eingestuft, bei Ventilen kleiner 40mm Tellerdurchmesser waren keine Ausfälle zu beobachten. Bei den Schweißnähten der ZB2 ist die Verbindung Teller/Kegel als kritische Naht am Leichtbauventil einzustufen. Eine hohe Ausschussrate zeigten Ventile mit Poren am Ventilsitz, die knapp unter der bearbeiteten Sitzfläche liegen. Diese Fehler werden bei der Fertigbearbeitung oder durch Verschleiß freigelegt, es kommt zum Spülen der Poren und das Ventil wird undicht. Die zweite Schweißnaht Rohr/Kegel der ZB2 ist bei guter Anbindung als nicht kritisch zu sehen. Der letzte Zusammenbau beinhaltet das Reibschweißen. Durch langjährige Er-

fahrung mit diesem Verfahren treten kaum Fehler auf. Die Untersuchungen beschränkten sich auf Bindefehler, Risse und oberflächennahe Poren.

Es wurden aus der Vielzahl von zerstörungsfreien Prüfverfahren, die sich für das Prüfen der Schweißstellen eignen, eine Reihe von möglichen Kandidaten ausgewählt und nach ihrer Serientauglichkeit bewertet. Dazu verwendete man definierte Kriterien und einen Paarvergleich. In einem Paarvergleich werden in einer Matrix die einzelnen Bewertungskriterien gegenseitig verglichen, um letztendlich eine Gewichtung jedes einzelnen Bewertungskriteriums zu erhalten. Danach erfolgte eine Klassifizierung und eine Benotung der ausgewählten Prüftechniken. Die ersten neun platzierten Prüfmethoden stellen potentielle Kandidaten für eine Serienprüfung dar. Bei den Kriterien bestätigte sich, dass der Zeitaufwand der Prüfung eine wesentliche Rolle bei der Herstellung von Ventilen spielt. Aus der Bewertung und der Auswahl der Prüfkonzepte kristallisierten sich drei grundlegende Ergebnisse heraus:

Digitales Röntgen, das einen wesentlichen Teil der Untersuchung in dieser Arbeit beansprucht, eignet sich nicht für die Serienprüfung. Besonders bei der Prüfzeit und der Prüfgenauigkeit ist erhebliches Entwicklungspotential von Nöten. Bevor man mit den eigentlichen Messungen beginnen konnte, mussten die Wiederholgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit untersucht werden, die für eine exakte Auswertung der Messergebnisse notwendig sind. In den Messergebnissen der Fehlermessung sind sehr starke Schwankungen zu erkennen, die auf ein empfindliches Reagieren von Veränderungen am Messobjekt, wie Wackeln oder Verrutschen der Ventile, zurückzuführen sind. Bei der Reproduzierbarkeit wurde versucht die Messgenauigkeit zu erhöhen. Die Fixierung des Ventils am Schlitten sollte die Relativbewegung verhindern und die erhoffte Verbesserung bringen. Nach den Gauß'schen Fehlerberechnungen ergab sich ein relativer Fehler von 12% für die Gesamtporenanzahl bzw. ein relativer Fehler von 15% bei den größten Fehlerstellen. Dieses Ergebnis ergibt eindeutig, dass die relative Bewegung sowie eine Veränderung der Lage der Ventile kaum einen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Das digitale Röntgen bietet jedoch ungeahnte Möglichkeiten. Es ermöglicht bei dünnen Bauteilen einen schnellen Einblick in das Innere, besonders bei der Untersuchung von Fehlerstellen in Schweißnähten. Hier entfällt das komplizierte Verfahren der Entwicklung der Röntgenbilder. In naher Zukunft wird man wahrscheinlich im Stande sein, kleine Bauteile in sehr kurzer Zeit zu röntgen und auszuwerten.

Beim heutigen Stand der Technik würde sich das digitale Röntgen besonders für die Stichprobenuntersuchung eignen. Damit könnten schnelle Untersuchungen in der

Produktion durchgeführt werden und die Proben würden weiters für nähere metallurgische Untersuchungen zur Verfügung stehen. Auch bei der Herstellung von Kleinserien (Losgröße bis 5000 Stück) stellt das Röntgen ein geeignetes Messwerkzeug dar. Langwieriges Umrüsten in der Serienproduktion würde entfallen.

Ein anderes Prüfverfahren, das sich sehr gut für die Serienprüfung eignen würde, ist die **Thermographie**. Durch die einfache Handhabung und die hohe Prüfgeschwindigkeit ist das Prüfverfahren bei der Prüfung der Leitchbauventile besonders zu beachten. Der Vorteil der Thermographie liegt in der schnellen bildlichen Darstellung beim Aufspüren von Fehlerstellen. Durch die farbliche Abbildung des Prüfobjekts werden Poren oder Risse als helle bzw. dunkle Bereiche gekennzeichnet. Fehler, die knapp unter der Oberfläche sitzen, können ausreichend genau erkannt werden.

Auch aus dem konventionellen Ventilbau lassen sich Prüfverfahren gut integrieren. Für eine zusätzliche Kontrolle des Ventilsitzes ist das **Wirbelstrom**-Verfahren bestens geeignet. Der vorgefertigte Ventilsitz unterscheidet sich nur gering von dem eines herkömmlichen Ventils. Die Lage der Reibschweißnaht wird mit **Ultraschall** kontrolliert. Eine Aussage über Qualität sowie Haltbarkeit der Naht ist nicht möglich. Man kann durch die langjährigen Erfahrungen aus dem Ventilbau profitieren, die Messzeiten sind kurz und die Genauigkeit ist ausreichend. Durch die vorhandene Technik lassen sich die Kosten enorm reduzieren.

Alle diese Untersuchungen und Auswertungen waren notwendig, um einen Fertigungsablaufplan zu erstellen. Der Fertigungsplan soll die zerstörungsfreien Prüfverfahren, die nach den definierten Kriterien bewertet wurden, in eine Serienproduktionskonzeption integrieren. Der dargestellte Ablauf wurde für ein Leitchbauauslassventil realisiert und enthält die effizientesten Prüfmethoden, um den Qualitätsansprüchen zu entsprechen. Hauptaugenmerk bei der Erstellung des Ablaufplanes war es, dass die Kontrolle der Schweißstellen unmittelbar nach ihrer Herstellung erfolgt, um die Produktionskosten zu minimieren und die fehlerhaften Ventile danach auszusortieren. Der Fertigungsablaufplan zeigt wie viel Aufwand in der Herstellung einer kleinen „unscheinbaren“ Motorkomponente stecken kann.

Diese Diplomarbeit soll einen Einblick gewähren, welche Anstrengungen unternommen werden müssen um innovative Erfindungen, wie das Leitchbauventil, in eine Serienproduktion überzuführen.

10.2 Ausblick

Um eindeutig die Leistungsgrenzen der Röntgenanlage festzustellen, sollte eine Prüfplatte konstruiert werden. Diese kann zur Leistungsüberprüfung der Anlage oder als Vergleichsgröße für Messungen dienen.

Dabei stellt die Fehlergröße von 1% den Schwerpunkt dar. Auf diese Größe wird der notwendige Flächenbedarf für die Fehlerstellengrößen von 0.2mm, 0.5mm und 1.0mm berechnet. Die verwendeten Materialien sollten einerseits dem Ventilwerkstoff entsprechen und andererseits sollten Werkstoffe zum Einsatz kommen, die das Messergebnis nur wenig verfälschen. Weiters sollten die zu untersuchenden Werkstoffdicken variabel gestaltet sein, um eine schnelle Anpassung an Konstruktionsänderungen vornehmen zu können.

Abbildung 10-1 zeigt ein Design dieser Prüfplatte. Die Untersuchungsplättchen wurden so ausgelegt, dass die eingebrachten Fehler (0,2/0,5/1mm) immer 1% der Gesamtfläche entsprechen. Die künstlichen Fehlstellen (Löcher) können willkürlich gesetzt werden. Als Trägermaterial dient Kohlefaserverbundwerkstoff. Die verschraubten Inconel[®]-Metallplättchen stellen die unterschiedlichen Materialdicken dar, unter denen sich die Fehler befinden. Die Anzahl der Schichten ist variabel. Zusätzlich kann die Messgenauigkeit von Rissen genauer untersucht werden.

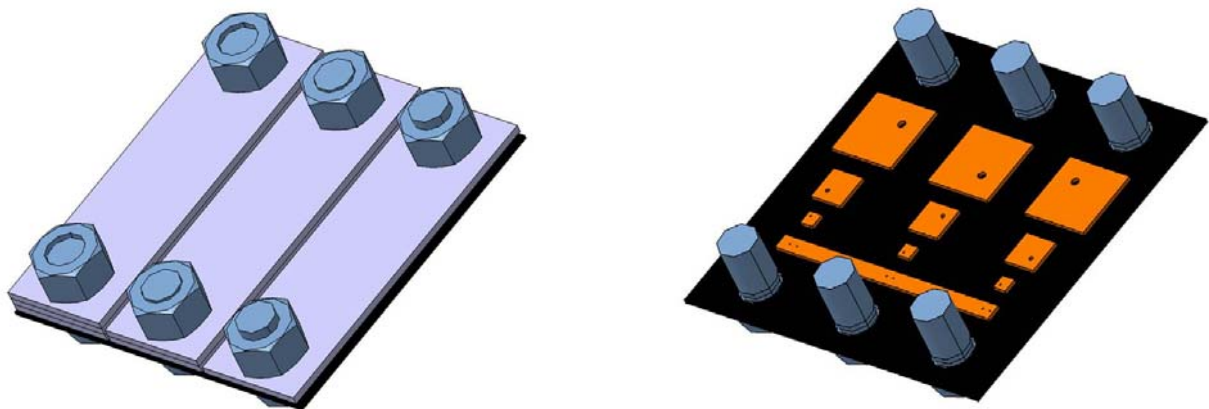


Abbildung 10-1 Prüfplatte; links mit nachgebildeten Metalldicken und rechts ohne

Diese neuentwickelte Prüfplatte bietet eine Vergleichsgröße, die einen direkten Vergleich der Fehlergröße bietet. So lassen sich die wahren Grenzen der Messgenauigkeit der Röntgenanlage abstecken.

Ein weiterer wichtiger Punkt, um das Mikrofokus-Röntgen sowie alle weiteren computerbasierenden abbildenden Prüfmethoden aussagekräftig zu machen, ist die Bildnachbearbeitung. Im Kapitel 7.4 wurde gezeigt welche Möglichkeiten man mit Filtersoftware erreichen kann. Eine interessante Untersuchung stellt das Vermessen der Poren mit Hilfe von speziellen Messprogrammen (z.B. Zeiss) dar. Hier sollte eine Statistik der realen Porengröße erstellt werden.

Ein wesentlicher interessanter Punkt ist die Entwicklung einer Software, die aus geringen Kontrastunterschieden in Bildaufnahmen Fehler erkennen kann. Dieser Lösungsansatz könnte bei der Mikrofokus-Röntgenanlage auf der automatischen Erkennung der Fehlerstellen basieren. Die effiziente Softwarelösung sollte auf die speziellen Probleme der Ventile zugeschnitten sein.

Das digitale Röntgen könnte durch die tief greifenden Modifikationen in naher Zukunft einen wesentlichen Bestandteil der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung des Leichtbauventils ausmachen.

11. Literaturverzeichnis

- [1] Köhler, E.: Verbrennungsmotoren-Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 2.Auflage
Braunsschweig-Wiesbaden: Vieweg-Verlag 2001
- [2] Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 25.Auflage
Wiesbaden: Vieweg-Verlag 2003
- [3] Der elektronische Ventiltrieb-Systembaustein für zukünftige Antriebskonzepte
Teil1., MTZ 61 (2000) 12
- [4] van Basshuysen, R.: Ottomotoren mit Direkteinspritzung Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial. 1.Auflage
Wiesbaden: Vieweg-Verlag 2007
- [5] Beitz W.; Grote K.-H.: Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau.
20.Auflage
Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag 2001
- [6]* Technischer Bericht: Technischer Bericht LBV Nr.2. MAHLE Ventiltrieb GmbH,
Stuttgart 2006
- [7] Behnisch A.: Die Schweißtechnik im Wandel der Zeiten, Vom Schmiedefeuer
zum Laserstrahl.
Düsseldorf: DVS-Verlag GmbH 2006
- [8] Grünauer H.: Reibschweißen von Metallen. Kontakt & Studium, Band 198.
Böblingen: expert-Verlag 1987
- [9] Gref, W.: Laserstrahlschweißen – Einführung und Stand der Technik. Stuttgarter Lasertage '01. Tagungs-CD (2001)
- [10] Cleemann, L.: Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern. VDI-Verlag, Düsseldorf 1987
- [11] Vorlesungsskriptum: Grundlagen der Entwicklung und Produktion. iwB, Wintersemester 06/07
- [12]* Technischer Bericht: Statusbericht Leichtbauventil. Mahle Ventiltrieb GmbH,
Stuttgart 2006
- [13] Steinhilpert W.; Sauer B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaues 2
(Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen).
3.Auflage
Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag 1993

- [14] Fahrenwaldt H.J.; Schuler V.: Praxiswissen Schweißtechnik (Werkstoffe, Prozesse, Fertigung). 2.Auflage
Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag 2006
- [15] Dillthey U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren BAND2, Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. 2.Auflage
Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1995
- [16] Dillthey U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2. 3.bearbeitete Auflage
Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag 2005
- [17] Wellinger, K.; Gimmel P.; Uebing D.: Werkstoffprüfung der Metalle.
Kröner-Verlag, Stuttgart 1960
- [18] DGZfP-Jahrestagung v58: Charakterisierung der Druckprüfung und der Schallemissionsuntersuchung im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfungen. Deutsche Gesell. für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Salzburg 2004
- [19] DGZfP-Jahrestagung p40: Einsatz von neuen Magnetfeldsensoren zur Streuflussprüfung an nahtlosen Stahlrohren. Reportsband 94. Deutsche Gesell. für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Rostock 2005
- [20] Libby, H. L.: Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods. Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, New York 1979
- [21] DGZfP-Jahrestagung v30: Nichtalltägliche Anwendungen der Wirbelstromprüfung an geschweißten Bauteilen. Deutsche Gesell. für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Weimar 2002
- [22] DIN EN 13018: Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Allgemeine Grundlagen. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag
- [23] DIN EN 571-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Eindringprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag
- [24] Steeb, S.: Expert Praxislexikon zerstörungsfreie Materialprüfung (Taschenbuch). Expert-Verlag 1998
- [25] Aderhold, J.; Dobman, G.; Goldammer, M.; Hierl, T.: Leitfaden zur Wärme-fluss-Thermographie – Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung. Hrsg. v. Fraunhofer-Allianz Vision, IRB-Verlag 2005
- [26] Krautkrämer, J. u. H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag 1986

- [27] Deutsch, V.; Vogt, M.: Die Ultraschallprüfung. Informationsschrift Fa. Karl Deutsch. Wuppertal 1972
- [28] Oppermann, W.: Untersuchungen zum Einfluss der Impulsparameter auf den Fehlernachweis bei der Ultraschallprüfung schallstreuender Werkstoffe. Dissertation an der Univ. Dortmund 1982
- [29] DGZfP-Jahrestagung v48: Akustische Resonanzanalyse in der Fertigung – Verfahren und Anwendungen in der Praxis. Deutsche Gesell. für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Celle 1999
- [30] DGZfP-Jahrestagung v15: Schallemissionsprüfung: Grundlagen – Gerätetechnik – Anwendungen. Deutsche Gesell. für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Berlin 2001
- [31] Weise H.-D.: Zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, 1969
- [32] DIN EN 444: Zerstörungsfreie Prüfung, Grundlagen für die Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin, Köln: Beuth-Verlag
- [33] Regler F.: Einführung in die Physik der Röntgen- und Gammastrahlen. München: Verlag Karl Thieme KG 1967
- [34] Dr. Bernard D.: A practical guide to X-Ray Inspection Criteria & Common Defect Analysis. Aylesbury UK: Dage Precision Industries 2006
- [35] Seliger H.-G.: Laser-Vibrometer. Aachen: Shaker-Verlag 1995
- [36] Medav GmbH: Vibroakustische Motorenprüfung in der Produktion. Quality Engineering (2005) Nr. 12, S46
- [37] Yang L.X.: Grundlagen und Anwendungen der Phasenschiebe-Shearografie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, Dehnungsmessung und Schwingungsanalyse. Dissertation: Universität Gh-Kassel 1997
- [38] Bjelkhagen H. I.: Silver Halide Recording Materials for Holography and Their Processing (Series in Optical Sciences). 2.Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1998
- [39] Ostrowski J. I; Osten W.: Holografie - Grundlagen, Experimente, Anwendungen. Nr.19: Deutsch Taschenbücher. 3.Auflage. Deutsch (Harri)-Verlag 1989
- [40] Yang L.; Steinchen W.; Kupfer G.: Digitale Shearografie für die direkte Messung der Biege- und Scherdehnungen von dünnen Platten. Forschung im Ingenieurwesen Vol. 62 (1996) Nr.6, S. 168

- [41] DGZfP-Jahrestagung p21: Computertomographie im Vergleich mit konventionellen Prüfverfahren. Deutsche Gesell. für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Berlin 2001
- [42] Zingel H.: Qualitätsmanagement und die ISO 9000er Normenfamilie. Version 3.10 (2000-2007), Internet: <http://www.zingel.de>
- [43] Müller A.: Optimierung LBV. Diplomarbeit. Fakultät Fahrzeugtechnik; Hochschule Esslingen; Deutschland. Mahle Ventiltrieb GmbH 2002
- [44] DIN Taschenbuch 56: Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe 2, Normen. 7.Auflage
Berlin-Wien-Zürich: Beuth-Verlag 2006
- [45] Hamamatsu Photonics: X-Ray Image Intensifiers. Technischer Bericht 1998
- [46] Brockhaus – Die Enzyklopädie. Band 18.
Leipzig, Mannheim: Brockhaus-Verlag 1998
- [47] Profos, P.; Domeisen, H.: Lexikon und Wörterbuch der industriellen Messtechnik. 3.Auflage: Oldenbourg 1993
- [48] Meyer-Bäse, U.: Schnelle digitale Signalverarbeitung – Algorithmen, Architekturen, Anwendungen. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag 2000.
- [49] Pfeifer, H.; Kabisch, G.; Lautner, H.: Fördertechnik – Konstruktion und Berechnung. 6.Auflage. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1995

* Interner Bericht der Firma Mahle Ventiltrieb GmbH

12. Anhang

Anhang A

Paarvergleich

	Lage Schweißnaht	Einfachheit	Anwendbarkeit	Zeitaufwand	Automatisierbarkeit	Sauberkeit	Zuverlässigkeit	Auswertung	Investitionskosten	Bearbeitung	Σ	%	Rang
Lage Schweißnaht		0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1%	10
Einfachheit	2		1	0	1	1	1	1	0	1	8	9%	7
Anwendbarkeit	2	1		1	2	1	1	2	1	1	12	13%	2
Zeitaufwand	2	2	1		1	2	0	2	2	1	13	14%	1
Automatisierbarkeit	1	1	0	1		1	0	1	1	1	7	8%	8
Sauberkeit	2	1	1	0	1		1	0	0	1	7	8%	8
Zuverlässigkeit	2	1	1	2	2	1		1	1	1	12	13%	2
Auswertung	2	1	0	0	1	2	1		1	1	9	10%	6
Investitionskosten	2	2	1	0	1	2	1	1		1	11	12%	4
Bearbeitung	2	1	1	1	1	1	1	1	1		10	11%	5
											90	100%	

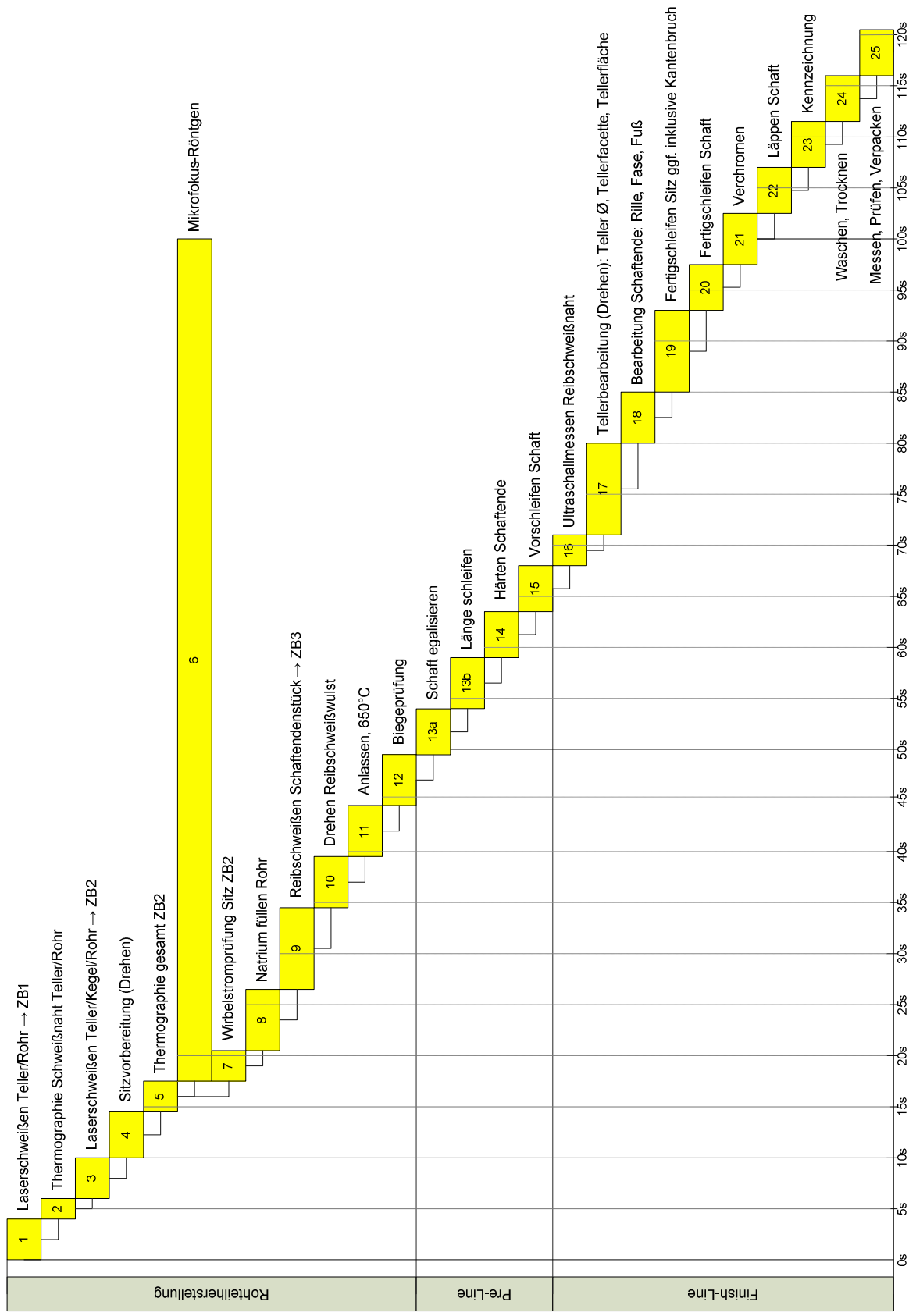
wichtiger	gleich wichtig	weniger wichtig
2	1	0

Bewertungsmatrix

Druckprüfung	Biegeumlaufprüfung	Streuflussprüfung ohne	Wirbelstrom	Sichtprüfung	Eindring-Prüfung	Magnetpulver	passive IR-Thermograp	aktive IR-Thermographi	Induktions-Thermographi	Ultraschallprüfung	akustische Resonanzar	Schallemissions-Analys	Röntgenprüfung	Gammastrahlen	Laservibrometer	Frequenzanalyse	Holographie	Computer-Tomographie
2	-1	1	-1	2	-2	-1	2	2	0	-1	1	1	1	2	-1	0	0	0
1	2	-1	2	0	0	-2	1	1	0	1	0	-1	-1	-2	-1	0	-2	-2
1	2	1	2	1	-1	0	1	2	2	2	1	0	0	-2	0	-2	-1	-2
2	2	0	1	-2	-2	-1	2	2	1	1	1	1	-1	-1	0	1	-2	-2
2	1	2	2	-2	-2	-1	2	2	2	2	2	0	0	1	2	1	1	1
2	2	1	2	-1	-2	-2	0	2	1	0	2	2	2	2	2	1	2	2
0	0	0	2	0	1	1	1	2	1	0	1	0	0	2	1	0	1	0
2	2	2	2	-2	-1	-2	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
-1	1	-1	2	0	0	0	-2	-1	-1	2	-1	-1	2	-2	0	-1	-2	-2
0	0	-1	-2	-2	-1	-2	1	1	-1	-2	-1	0	1	1	-1	-2	2	1
Σ	92	128	26	138	-79	-83	-86	79	133	54	77	50	20	39	-20	33	-21	-63
Rang	4	3	11	1	17	18	19	5	2	7	6	8	12	9	14	15	13	16

sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
2	1	0	1	-2

Anhang B

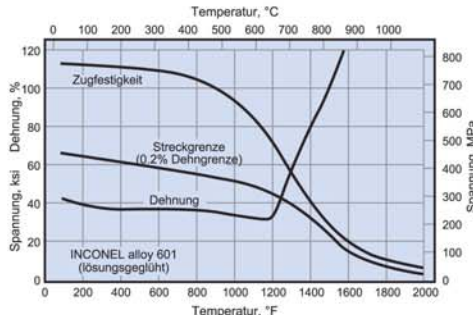
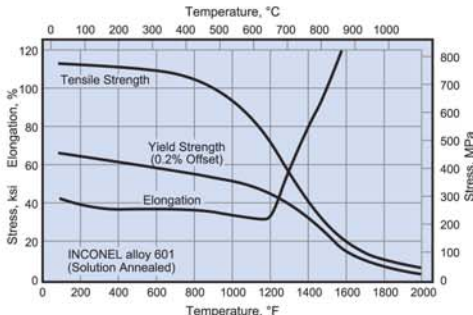


Anhang C

INCONEL® Alloy 601**W.Nr. 2.4851**

Eine Nickel-Chrom-Legierung mit Aluminiumzusatz für hervorragende Beständigkeit gegen Oxidation und andere Formen der Hochtemperatur-Korrosion. Gute mechanische Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen. Verwendung für Industrieöfen, Wärmebehandlungseinrichtungen wie Körbe, Muffeln und Retorten, für petrochemische und andere verfahrenstechnische Anlagen sowie für Gasturbinenteile.

A nickel-chromium alloy with an addition of aluminum for outstanding resistance to oxidation and other forms of high-temperature corrosion. It also has high mechanical properties at elevated temperatures. Used for industrial furnaces; heat-treating equipment such as baskets, muffles, and retorts; petrochemical and other process equipment; and gas-turbine components

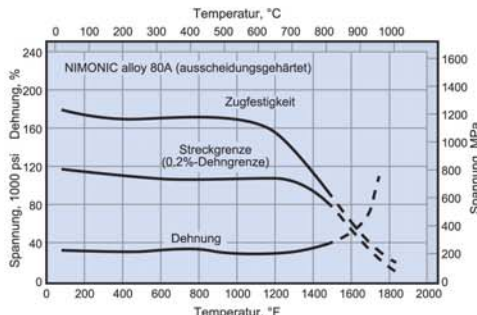
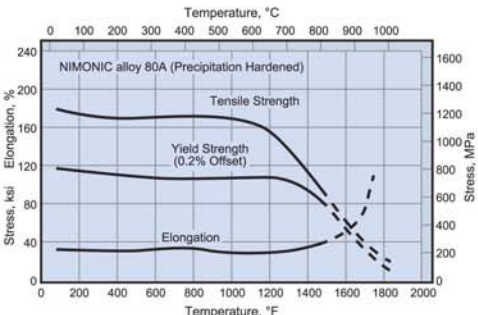
Produktformen Product Forms	Blech, Band, Rundstab, Flachstab, Sechskantprofile, Rohr, Draht, Schmiedestücke	Sheet, Plate, Strip, Round Bar, Flat Bar, Hexagon, Tube, Pipe, Wire, Extruded Section, Forging Stock
Normen und Bezeichnungen	UNS N06601 ASTM B 166 – B 168, B 751, B 775, B 829 ASME SB-166 – SB-168, SB-751, SB-775, SB-829	ASME Code Case 1500 DIN 17742, 17750 – 17754 Werkstoff Nr. 2.4851 EN 10095 ISO 6207, 6208, 9723-9725
Major Specifications		UNS N06601 ASTM B 166 – B 168, B 751, B 775, B 829 ASME SB-166 – SB-168, SB-751, SB-775, SB-829 ASME Code Case 1500 DIN 17742, 17750 – 17754 Werkstoff Nr. 2.4851 EN 10095 ISO 6207, 6208, 9723-9725
Chem. Zusammensetzung Chemical Composition, %	Grenzwerte Ni 58.0 – 63.0 Fe Rest Si max. 0.50 Cr ... 21.0 – 25.0 C max. 0.10 S max. 0.015 Al 1.0 – 1.7 Mn max. 1.0 Cu max. 1.0	Limiting Ni 58.0 – 63.0 Fe ... Remainder Si max. 0.50 Cr ... 21.0 – 25.0 C max. 0.10 S max. 0.015 Al 1.0 – 1.7 Mn max. 1.0 Cu max. 1.0
Physikalische und thermische Eigenschaften Physical Constants and Thermal Properties	Dichte, lb/in ³ 0.293 g/cm ³ 8.11 Schmelzbereich, °F 2480 – 2571 °C 1360 – 1411 Spezifische Wärme, Btu/lb·°F 0.107 J/kg·°C 448 Curie-Temperatur, °F <-320 °C <-196 Permeabilität bei 200 Oe (15.9 kA/m) 1.003 Ausdehnungsbeiwert, 70 – 200°F, 10 ⁻⁶ in/in·°F 7.60 20 – 100°C, µm/m·°C 13.75 Wärmeleitfähigkeit, Btu·in/ft ² ·h·°F 78 W/m·°C 11.2 Spez. elektr. Widerstand, ohm·circ mil/ft 717 µohm·m 1.19	Density, lb/in ³ 0.293 g/cm ³ 8.11 Melting Range, °F 2480 – 2571 °C 1360 – 1411 Specific Heat, Btu/lb·°F 0.107 J/kg·°C 448 Curie Temperature, °F <-320 °C <-196 Permeability at 200 Oersted (15.9 kA/m) 1.003 Coefficient of Expansion, 70 – 200°F, 10 ⁻⁶ in/in·°F 7.60 20 – 100°C, µm/m·°C 13.75 Thermal Conductivity, Btu·in/ft ² ·h·°F 78 W/m·°C 11.2 Electrical Resistivity, ohm·circ mil/ft 717 µohm·m 1.19
Typische mechanische Eigenschaften Typical Mechanical Properties	(Lösungsgeglüht) Zeitstandsfestigkeit (1000 Std) 1200°F / 650°C 28.0 195 1400°F / 760°C 9.1 63 1600°F / 870°C 4.3 30 1800°F / 980°C 2.1 14 2000°F / 1095°C 1.0 7 	(Solution Annealed) Rupture Strength (1000 h) 1200°F / 650°C 28.0 195 1400°F / 760°C 9.1 63 1600°F / 870°C 4.3 30 1800°F / 980°C 2.1 14 2000°F / 1095°C 1.0 7 

Anhang D

NIMONIC® Alloy 80A**W.Nr. 2.4952/2.4631**

Eine Nickel-Chrom-Legierung ähnlich wie NIMONIC Alloy 75, jedoch durch Aluminium- und Titan-zusatz ausscheidungshärtbar. Die Legierung hat gute Korrosions- und Oxydationsbeständigkeit sowie hohe Zug- und Zeitstandfestigkeit bei Temperaturen bis 815° C. Verwendung für Gasturbinenteile (Schaufeln, Ringe und Scheiben), Schrauben, Rohrstützen in kerntechnischen Dampferzeugern, für Druckgusseinsätze und -kerne sowie Auslassventile in Verbrennungsmotoren.

A nickel-chromium alloy similar to NIMONIC alloy 75 but made precipitation hardenable by additions of aluminum and titanium. The alloy has good corrosion and oxidation resistance and high tensile and creep-rupture properties at temperatures to 1500°F (815°C). Used for gas-turbine components (blades, rings, and discs), bolts, tube supports in nuclear steam generators, die-casting inserts and cores, and exhaust valves in internal-combustion engines.

Produktformen Product Forms	Blech, Rundstab, Flachstab, Sechskant, Draht, Strangpressprofile, Schmiedematerial	Sheet, round bar, flat bar, hexagon, wire, extruded section, forging stock
Normen und Bezeichnungen Major Specifications	UNS N07080 BS 3076 (NA20), HR1, HR201, HR401, HR601 ASTM B 637	DIN 17742 Werkstoff Nr. 2.4952, 2.4631 AECMA Pr EN 2188 – 2191, 2396, 2397
Chem. Zusammensetzung Chemical Composition, %	Grenzwerte Ni Rest Si 1.0 max. B 0.008 max. Cr .. 18.0 – 21.0 Cu 0.2 max. Zr 0.15 max. Ti 1.8 – 2.7 Fe 3.0 max. S 0.015 max. Al 1.0 – 1.8 Mn 1.0 max. C 0.10 max. Co 2.0 max.	Limiting Ni Remainder Si 1.0 max. B 0.008 max. Cr .. 18.0 – 21.0 Cu 0.2 max. Zr 0.15 max. Ti 1.8 – 2.7 Fe 3.0 max. S 0.015 max. Al 1.0 – 1.8 Mn 1.0 max. C 0.10 max. Co 2.0 max.
Physikalische und thermische Eigenschaften Physical Constants and Thermal Properties	Dichte, lb/in ³ 0.296 g/cm ³ 8.19 Schmelzbereich, °F 2410 – 2490 °C 1320 – 1365 Spezifische Wärme, Btu/lb • °F 0.107 J/kg • °C 448 Permeabilität bei 200 Oe (15.9 kA/m) 1.0006 Ausdehnungsbeiwert, 68 – 212°F 10 ⁻⁶ in/in • °F 7.1 20 – 100°C µm/m • °C 12.7 Wärmeleitfähigkeit, Btu • in/ft ² • h • °F 77.7 W/m • °C 11.2 Spez. elektr. Widerstand, ohm • circ mil/ft 746 µhm • m 1.24	Density, lb/in ³ 0.296 g/cm ³ 8.19 Melting Range, °F 2410 – 2490 °C 1320 – 1365 Specific Heat, Btu/lb • °F 0.107 J/kg • °C 448 Permeability at 200 Oersted (15.9 kA/m) 1.0006 Coefficient of Expansion, 68 – 212°F 10 ⁻⁶ in/in • °F ... 7.1 20 – 100°C µm/m • °C 12.7 Thermal Conductivity, Btu • in/ft ² • h • °F 77.7 W/m • °C 11.2 Electrical Resistivity, ohm • circ mil/ft 746 µhm • m 1.24
Typische mechanische Eigenschaften Typical Mechanical Properties	(Ausscheidungsgehärtet) Zeitstandfestigkeit (1000 Std) 1100°F / 595°C 94 650 1200°F / 650°C 73 500 1300°F / 705°C 51 350 1400°F / 760°C 32 220 1500°F / 815°C 16 110 	(Precipitation Hardened) Rupture Strength (1000 h) 1100°F / 595°C 94 650 1200°F / 650°C 73 500 1300°F / 705°C 51 350 1400°F / 760°C 32 220 1500°F / 815°C 16 110 

BIBUS METALS