TECHNIK
FH MAINZ
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Modul Ingenieurbaulabor

Teil: Einführung in das Labor für Tragwerksbau

Einführung zu studentischen Versuchen im Modul Ingenieurbaulabor 2
Prüfmaschinen und Messtechnik im Tragwerksbaulabor - Kurze Einführung 2
Prüfgeräte *2*
Messtechnik *2*
Spannungsoptik und FEM 3
Spannungsoptik *3*
FEM *4*
Foto- und Videodokumentation von Versuchen 5
Stahlzugversuch nach DIN EN 10002 6
E-Modul *6*
Obere und untere Streckgrenze R_{eH}, R_{eL} *6*
Bruchspannung bzw. Zugfestigkeit R_m *7*
Bruchdehnung A *7*
Härteprüfung nach Brinell an Stahlprobe nach DIN EN ISO 6506-1 bis DIN EN ISO 6501-4 8
Berechnung der Brinellhärte und Bezug zu R_m *8*
Normgerechte Angabe der Brinellhärte: (nach DIN EN ISO 6506-1 Stand: 03/2006) *9*
Weitere Methoden zur Härteprüfung *9*
Kerbschlagbiegeversuche an Stahlproben nach DIN EN 10045 9
Kerbschlagarbeit W *9*
Kerbschlagzähigkeit A_k *10*
Grundlagen der Messtechnik: Sensoren Justieren, Kalibrieren, Tarieren; Messfehler, Genauigkeitsklasse; Hysterese; Analog-Digital-Wandlung - Einführung am Beispiel eines Wegaufnehmers 11
Tarieren *11*
Kalibrieren *11*
Justieren *11*
Messfehler *11*
Genauigkeitsklasse *11*
Hysterese *12*
Analog-Digital-Wandlung – vertikale und horizontale Auflösung *12*
Analog *12*
Digital *13*
Vertikale Auflösung: Quantisierung, digitale Auflösung, Bit-Genauigkeit *13*
Horizontale Auflösung: Abtastrate, Samplingrate, Samplefrequenz *14*
Justieren und Kalibrieren eines Wegaufnehmers HBM WA100 ..... *15*
Messtechnik: Dehnungsmessstreifen (DMS) - Einführung am Beispiel eines Biegebalkens (Kragarm) mit Einzellast 16
DMS *16*
Wheatstone'sche Brückenschaltung *17*
Versuch: Biegebalken mit Einzellast *18*
Messtechnik: Ultraschallprüfung - Einführung 19
Schallgeschwindigkeit und Auflösung *19*
Senkrechtschallverfahren mit Vertikalprüfköpfen *20*
Schrägschallverfahren mit Winkelprüfköpfen *20*
Koppelmittel *20*

Einführung zu studentischen Versuchen im Modul Ingenieurbaulabor

Der Aufwand für Versuche ist je nach Gruppengröße gestuft. Vorhandene Ausarbeitungen dienen als Beispiele für mögliche Versuche und deren Auswertung. Besprechung der Versuche, der Rahmenbedingungen (max. geometrische Größen, max. Kräfte, Materialien, Aufbauten, Kostenübernahme) bei Herstellung und Durchführung der Versuche mit Dr. Freitag, Herrn Herschel und Herrn Hahner.

Prüfmaschinen und Messtechnik im Tragwerksbaulabor - Kurze Einführung

Das Labor für Tragwerksbau verfügt – zusammen mit dem Institut für Sandwichtechnik iS-Mainz über eine moderne und hochwertige Ausrüstung an Prüf- und Messtechnik:

Prüfgeräte

- Dyna-Mess Universalprüfrahmen mit max. 165 kN Prüfkraft, hydraulisch, Weg- und Kraftsensoren, Anklemmdehnaufnehmer, dynamisch fahrbar, Steuerung mit Weg- und Kraftregelung über Software
- Dyna-Mess Universalprüfrahmen mit max. 20 kN Prüfkraft, pneumatisch, Weg- und Kraftsensoren, Anklemmdehnaufnehmer und Videoextensiometer, dynamisch fahrbar, Steuerung mit Weg- und Kraftregelung über Software
- MAN Prüfrahmen mit max. 400 kN Prüfkraft, hydraulisch, Weg- und Kraftsensoren
- Härteprüfgerät Emco Test M4U-025
- Losenhausenwerk Kerbschlag-Prüfgerät (Pendelschlagwerk)
- Anlage zur Spannungsoptik

Messtechnik

- 3 x HBM Spider 8 Messverstärker und Analog-Digitalwandler mit je 8 Messkanälen und HBM Catman 32 Professional Messsoftware
- Kraftmessdosen HBM U10M (125 kN), C6A (500 kN), 2 x C2 (100 kN), S9 (9 kN) und S2 (2 kN)
- Induktive Wegaufnehmer 2 x HBM K-WA 100, 4 x WA 100 und 4 x WA 20 mit 100 bzw. 20 mm Messweg
- Dehnmessstreifen verschiedener Typen: (z. B. HBM DMS LY 63 6/120, ...)
- Krautkramer Branson Impuls-Schall-Gerät USL 48 M mit MSW-QC 5 und MB 4 F-E Schallköpfen und Zubehör
- Software: MSC Marc/Mentat (FEM); Autodesk Mechanical Desktop (FEM); CD-Adapco Star-CCM+(CFM); Wolfram Mathematica; Mathsoft Mathcad; Mathsoft Axum
- Digitale Foto- und Videotechnik zur Dokumentation
- Diverse Messuhren und –schieber

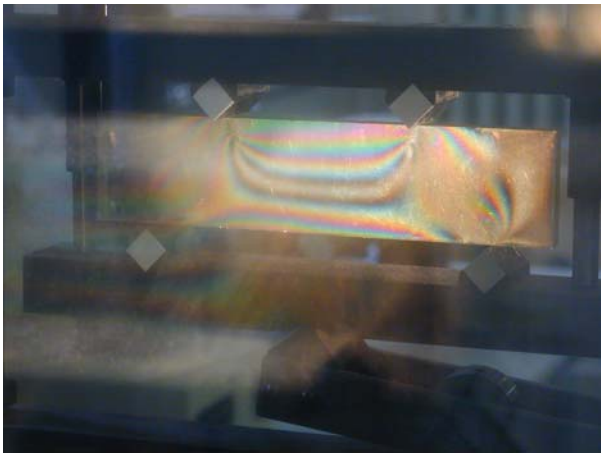
Spannungsoptik und FEM

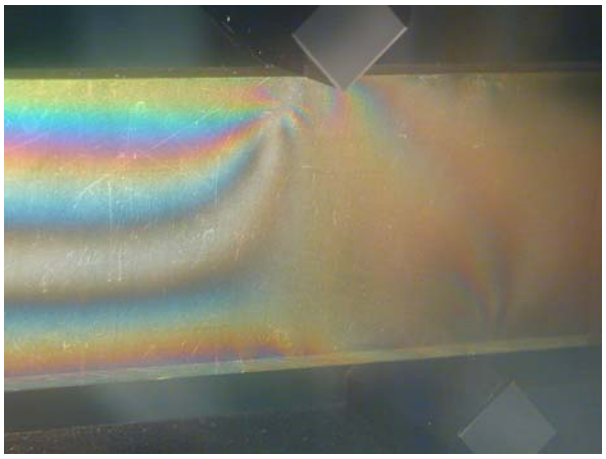
Analyse einer einfachen Scheibe mit zwei Auflagern und zwei Einzellasten als Beispiel für Anwendungen in Spannungsoptik und FEM (Finite-Elemente-Methode).

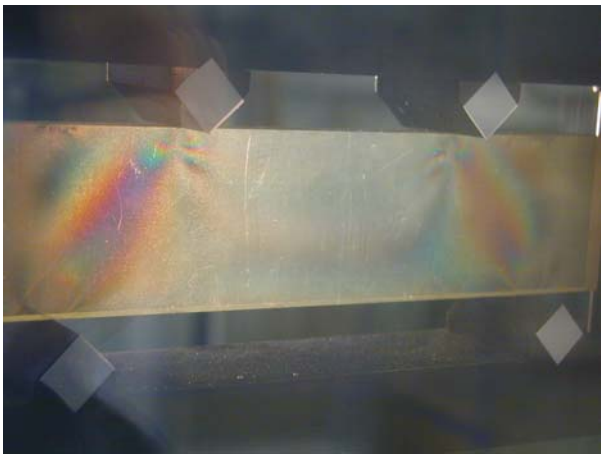
Spannungsoptik

Als Spannungsoptik wird ein Teilgebiet der Optik bezeichnet, in dem durch die Verwendung von polarisiertem Licht die Spannungsverteilung in lichtdurchlässigen Körpern untersucht wird. Als Material für die Probekörper bzw. Modelle wird ein doppelbrechendes Kunstharz (z. B. Araldit) verwendet.
Isochromaten sind Linien gleicher Farbe, die eine konstante Hauptspannungs-Differenz aufweisen (lineare oder zirkuläre Polarisation).
Isoklinen sind Linien gleicher Helligkeit. Die Richtung einer Hauptspannung fällt mit der Polarisationsrichtung (lineare Polarisation) des einfallenden Lichts zusammen, sie repräsentieren somit die Spannungstrajektorien des Körpers unter der gegebenen Belastung.
Bei der quantitativen Auswertung geht man von einem ebenen Spannungszustand aus. Die beiden Hauptspannungen in der Probenebene beeinflussen die Brechzahl des Materials, die dritte Hauptspannung in Dickenrichtung hat keine Wirkung.

Aufbau mit Lichtquelle und Polfiltern

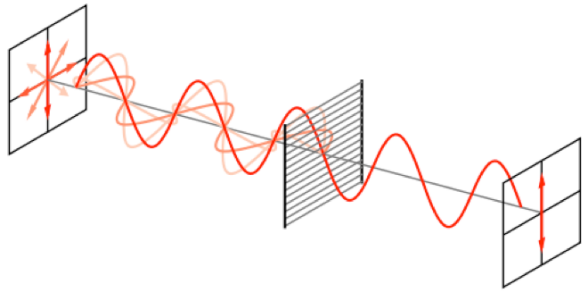

Hauptspannungen


Detail


Schubspannungen (Polfiter gedreht)

Spannungsoptik wird nur noch selten in der Werkstoffprüfung angewandt, indem transparente Kunstharzmodelle (mit optischer Aktivität) auf Belastungen, die in der praktischen Anwendung auftreten können, untersucht werden. Die Spannungs-

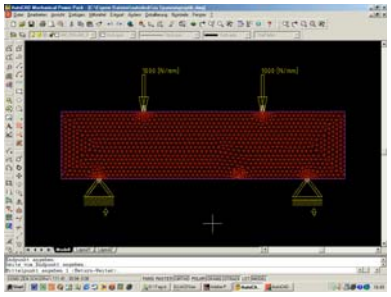
verteilung im Modell stimmt mit derjenigen im realen Bauteil überein, auch wenn sich die Deformation (wegen des unterschiedlichen E-Moduls) unterscheidet.
Durch verbesserte Rechenverfahren mit der Finite-Elemente-Methode werden solche Untersuchungen mittlerweile fast nur noch am Computer durchgeführt.



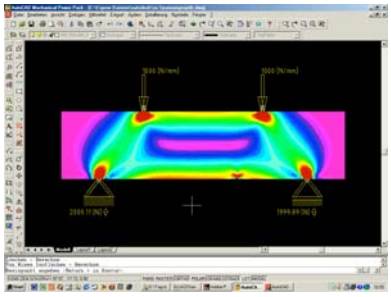
Polfilter mit linearer Polarisierung

FEM

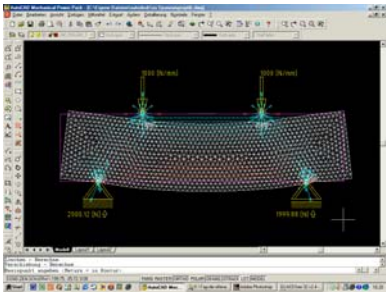
Mit der FE-Methode können Probleme aus verschiedenen physikalischen Disziplinen berechnet werden, da es sich grundsätzlich um ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen handelt. Zunächst wird das Berechnungsgebiet in eine beliebig große Anzahl Elemente unterteilt. Diese Elemente sind „endlich" (finit) und nicht unendlich (infinit) klein, die Anzahl der Elemente ist „endlich“ und nicht unendlich. Das Aufteilen des Gebiets in eine bestimmte Anzahl Elemente finiter Größe, die sich mit einer endlichen Zahl von Parametern beschreiben lassen, gab der Methode den Namen „Finite-Elemente-Methode".
Die FEM ermöglicht die rechnerische Simulation und Auswertung von Belastungen und Spannungsverläufen in Bauteilen. Dabei können Verformungen, Trajektorien und Spannungen (Van Mieses-Spannungen, nach verschiedenen Richtungen gefiltert und Schubspannungen) ermittelt werden. Die Analogie zur Spannungsoptik wird in der graphischen Darstellung der Ergebnisse deutlich.
Weitere gängige Verfahren in der numerischen Simulation sind die Methode der finiten Differenzen und die Methode der finiten Volumen, die häufiger bei dynamischen Strömungsvorgängen (Hydraulik, Pneumatik, Temperatur) eingesetzt werden.



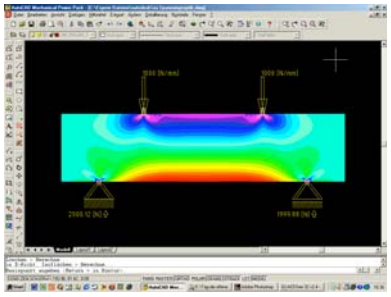
Netzgeometrie



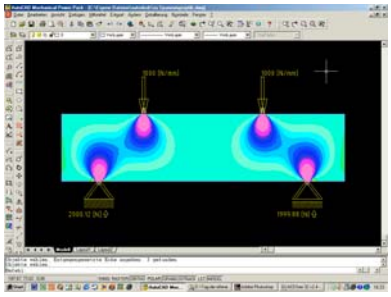
Van Mieses Spannungen



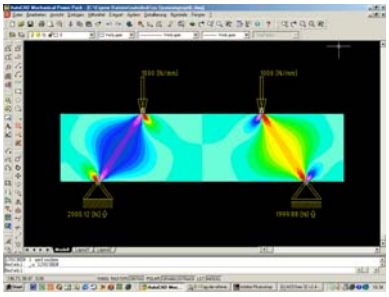
Deformation u. Hauptspannungen



Spannungsrichtung x



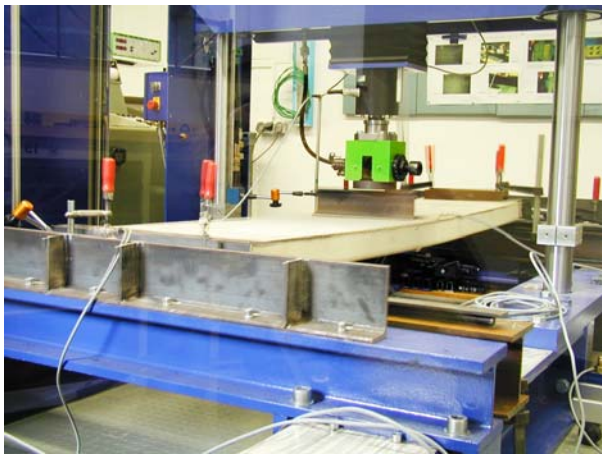
Spannungsrichtung y

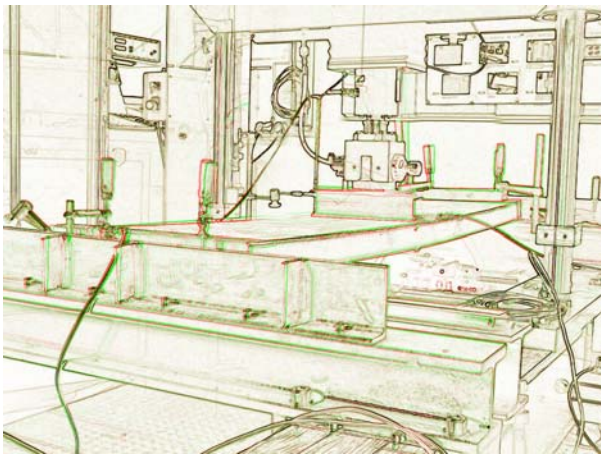


Schubspannungen

Foto- und Videodokumentation von Versuchen

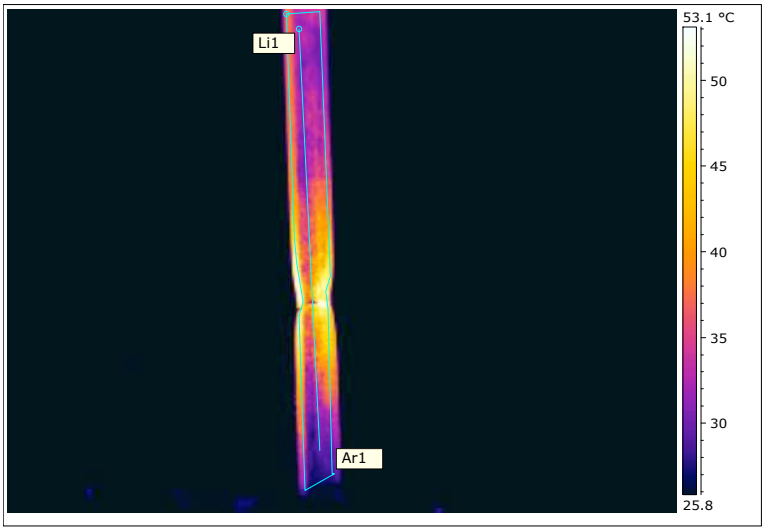
Zur Auswertung von Versuchen und Beurteilung von Versuchsabläufen dienen neben der Messtechnik für mechanische Größen auch die fotographische und filmische Dokumentation (am Besten unter Verwendung eines Stativs). Es kommen bei der Fotodokumentation Methoden der digitalen Nachbearbeitung zur Anwendung wie Überlagerung von Bildern, Änderung von Kontrast und Farbe und die Anwendung diverser Filter. Bei der filmischen Dokumentation spielen vorwiegend Änderungen des Zeitmaßstabes eine Rolle (Zeitlupe/Zeitraffer).
Eine interessante Rolle spielen auch thermographische Aufnahmen, mit denen man z. B. die Erwärmung von Bauteilen und –verbindungen durch innere Reibung (und dadurch die „Hotspots“ der mechanischen Belastung) sichtbar machen kann.

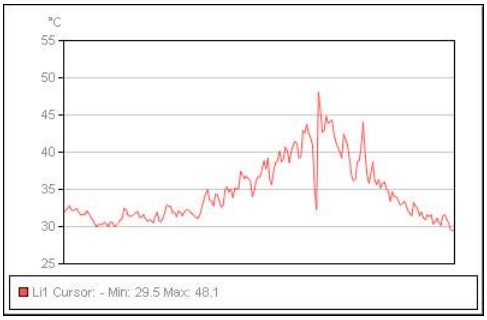




Beispiel zur Beurteilung eines Versuchsaufbaus - Verformungen an Bauteil und Versuchsaufbau bei der axialen Belastung eines Sandwichbauteils (grün vor - / rot nach Belastung).

Thermographische Aufnahme eines Stahlzugversuchs unmittelbar nach Probenbruch. Die Erwärmung erfolgt durch innere Arbeit bei der plastischen Verformung der Probe.

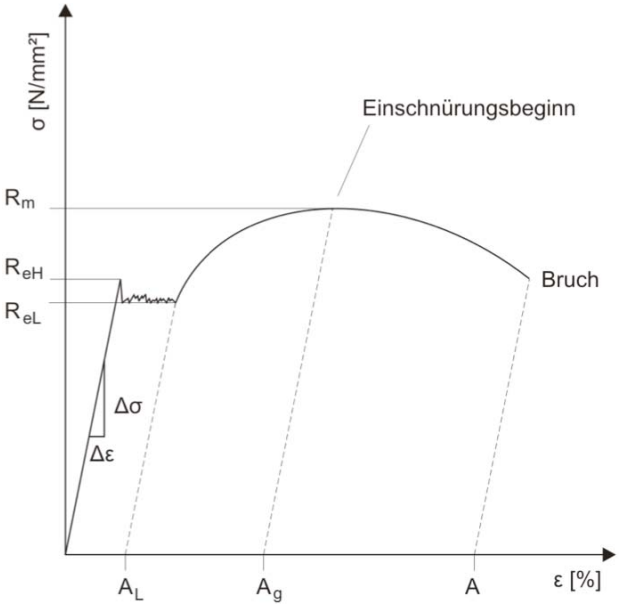




Date	07.08.2009
Filename	FLIR Bild 6.jpg
Max Temperature	55.8 °C
Min Temperature	23.7 °C
Ar1 Max. Temperatur	55.8 °C
Ar1 Min. Temperatur	25.8 °C

Stahlzugversuch nach DIN EN 10002

Der Versuch und die Nomenklatur zur Ermittlung der wichtigsten Werkstoffkennwerte von Stahl ist in der DIN EN10002 -1 geregelt.



Schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze R_{eH}

E-Modul

Zu Beginn einer Beanspruchung verhalten sich viele Werkstoffe linear-elastisch, d.h. die Verformung gegenüber der Ausgangslänge verschwindet bei Entlastung wieder vollständig. Der zugehörige Werkstoffkennwert, der das linear-elastische Verformungsverhalten beschreibt ist der Elastizitätsmodul E und entspricht der Steigung der sogenannten Hooke'schen Geraden. $E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$ [N/mm]

Obere und untere Streckgrenze R_{eH}, R_{eL}

Bei Erreichen der Streckgrenze R_{eH} ($f_{y,k}$ nach EN) setzt plastische Deformation ein (siehe Abb.). Ab diesem Punkt ist der Verlauf stark werkstoffabhängig. Häufig ist der Beginn plastischer Deformation nicht durch ein Abknicken der Kurve (wie in der Abbildung) eindeutig zu identifizieren. In diesen Fällen werden stattdessen die Dehngrenzen R_p unter Angabe der verwendeten plastischen Deformation verwendet (häufig: $R_{p0,2}$ für die Dehngrenze bei 0,2 % plastischer Deformation). Als untere Streckgrenze R_{eL} wird die kleinste im Lüdersbereich (Fließbereich) auftretende Spannung bezeichnet.

Die dargestellte Zugverfestigungskurve beschreibt den schematischen Verlauf eines ferritisch-perlitischen Stahles mit ausgeprägten Streckgrenzeneffekten. Austenitische Stähle, Vergütungsstähle oder duktile Nichteisenmetalle zeigen abweichende Kurvenverläufe. Bei nichtmetallischen Werkstoffen wie Kunststoffen, Keramiken oder Verbundwerkstoffen treten in der Regel deutliche andere Kurvenverläufe auf, da die mikrostrukturellen Prozesse der plastischen Deformation fast ausschließlich in metallischen Werkstoffen auftreten (Versetzungsbewegung). Im Vergleich dazu handelt es sich z. B. bei der bleibenden Verformung von Kunststoffen um die Auflösung und Neubildung sekundärer Bindungen (Wasserstoffbrückenbindungen, Dipol-Dipol- und Van-der-Waals-Kräfte).

Gemeinsam ist allen Werkstoffen, dass plastische Verformungen bei Entlastung bestehen bleiben. Nur der elastische Anteil ε_e an der Gesamtverformung ε_t verschwindet wieder. Vor diesem Hintergrund können die Beträge der Gleichmaßdehnung A_g und der Bruchdehnung A bestimmt werden, indem von der Zugverfestigungskurve parallel zur Hook'schen Geraden entlastet und der Schnittpunkt mit der Abszisse abgelesen wird. Bei allen Dehnungskennwerten handelt es sich demnach um plastische Dehnungsanteile und es gilt für die Gesamtdehnung stets: $\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_{pl}$ [-]

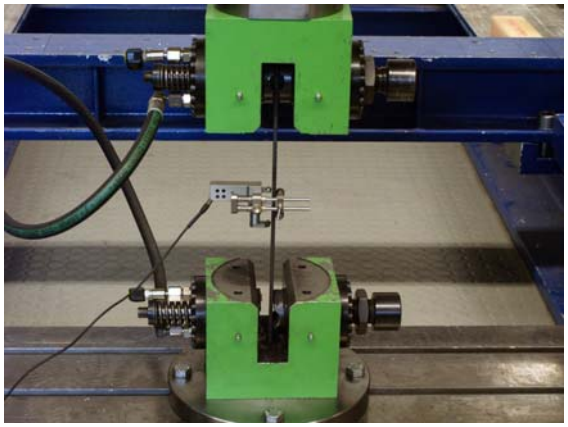
Bruchspannung bzw. Zugfestigkeit R_m

Das Maximum der Zugverfestigungskurve bezeichnet einen der wichtigsten Werkstoffkennwerte: die Zugfestigkeit R_m ($f_{u,k}$ nach EN). Der zugehörige Dehnungskennwert ist die Gleichmaßdehnung A_g, da bis hierher die Proben keine makroskopische Einschnürung (Querschnittsverjüngung) zeigen. Werkstoffe die nicht bei Erreichen der Zugfestigkeit versagen, zeigen eine deutliche Einschnürung.

Bruchdehnung A

Beim Probenbruch kann die Bruchdehnung A - wie oben beschrieben - ermittelt werden. Die Bruchdehnung wird immer mit Indizes angegeben, da je nach Dehnbasis der Anteil der Einschnürung (Bereich mit deutlich größerer Dehnung) größer (kleinere Dehnbasis) oder kleiner (größere Dehnbasis) ist.
Die proportionale Dehnbasis $L_{0\ prop}$ (für die Ermittlung von A_{prop}) hängt vom Querschnitt s_0 vor Versuchsbeginn ab und wird berechnet mit $L_0 = 5{,}65\ s_0^{0,5}$ [mm]. Aus praktischen Gründen sind 50 mm, 80 mm und 100 mm für die Dehnbasis L_0 üblich. Die Dehnungen werden dem entsprechend mit $A_{50\ mm}$, $A_{80\ mm}$ oder $A_{100\ mm}$ bezeichnet.

Stahlzugversuch nach EN10002

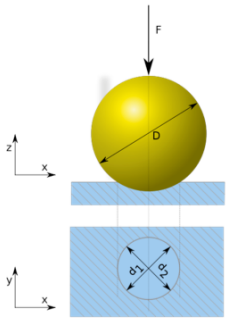

Anklemm-Dehnaufnehmer

Proben vor und nach Stahlzugversuch. Dehnung nach Probenbruch und Einschnürung im Bereich des Bruches sind deutlich zu erkennen.

Härteprüfung nach Brinell an Stahlprobe nach DIN EN ISO 6506-1 bis DIN EN ISO 6501-4

Die vom schwedischen Ingenieur Johan August Brinell im Jahre 1900 entwickelte und auf der Weltausstellung in Paris präsentierte Methode der Härteprüfung kommt bei weichen bis mittelharten Metallen (DIN EN ISO 6506-1 bis DIN EN ISO 6501-4) wie zum Beispiel unlegiertem Baustahl oder Aluminiumlegierungen, bei Holz (ISO 3350) und bei Werkstoffen mit ungleichmäßigem Gefüge, wie etwa Gusseisen, zur Anwendung. Dabei wird eine Hartmetallkugel mit einer festgelegten Prüfkraft F in die Oberfläche des zu prüfenden Werkstückes gedrückt. Früher wurden als Eindringkörper neben den Kugeln aus Hartmetall auch Stahlkugeln verwendet. Nach dem letzten Stand der Normung ist eine Stahlkugel ab dem Jahr 2006 allerdings nicht mehr zulässig. Die Norm schreibt jetzt für alle Stoffe Kugeln aus Sinterhartmetall vor. Die verwendeten Kugeln haben Durchmesser von 10 mm, 5 mm, 2,5 mm, 2 mm und 1 mm.

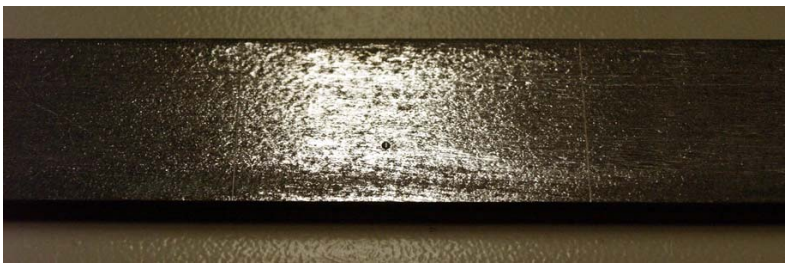
Nach einer Belastungszeit von 10 bis 15 Sekunden für Stähle oder Gusseisen und 10 bis 180 Sekunden für Nichteisenmetalle oder deren Legierungen wird der Durchmesser des bleibenden Eindrucks im Werkstück gemessen und daraus die Oberfläche des Eindrucks bestimmt. Der zu bestimmende Durchmesser d ist der Mittelwert zweier rechtwinklig zueinander liegenden Durchmesser d_1 und d_2 des bleibenden Eindruckes. Bei anisotroper Verformung wird der zur Berechnung der Härte nötige Durchmesser aus dem größten d_1 und kleinsten Durchmesser d_2 gemittelt.



Berechnung der Brinellhärte und Bezug zu R_m

Das Verhältnis von Prüfkraft zur Eindruckoberfläche multipliziert mit dem Wert 0,102 bezeichnet man als die Brinellhärte. Der angegebene Zahlenfaktor ist der Kehrwert von 9,81 und dient der Umrechnung der Krafteinheit Newton in die ältere Einheit Kilopond. Damit wird sichergestellt, dass Härtemessungen unter Verwendung moderner Einheiten dasselbe Resultat ergeben wie historische Werte, die auf heute veralteten Einheiten beruhen.

Bei un- und niedriglegierten Stählen kann aus der Brinellhärte mit gewisser Toleranz die Zugfestigkeit (R_m) des Werkstoffes abgeleitet werden. $R_m \approx 3{,}5 \cdot HBW$.



Messung des Eindrucks an Härteprüfgerät Emco Test M4U-025 und Probekörper mit Eindruck.

Normgerechte Angabe der Brinellhärte: (nach DIN EN ISO 6506-1 Stand: 03/2006)

Neben dem Härtewert muss auch das verwendete Verfahren, der Kugeldurchmesser und die Prüfkraft immer mit angegeben werden.
Bsp.: 345 HBW 10/3000, wobei:
345 = Härtewert, HBW = Prüfverfahren*, 10 = Kugeldurchmesser D in mm, 3000 = Belastung (Kraft F) in Kilopond kp
Bei einer Belastung die länger als 15 s dauert muss die Belastungszeit ebenfalls angegeben werden. Bsp.: 210 HBW 5/750/60
*Bem.: Angaben wie HB oder HBS sind laut aktueller Norm nicht mehr zulässig (siehe DIN EN ISO 6506-1:2005 Stand: 03/2006 Kap 4.1 „Formelzeichen und Abkürzungen“)

Weitere Methoden zur Härteprüfung

Als alternative Prüfmethoden für gehärtete Stähle gibt es die Härteprüfung nach Rockwell (Diamantkegel) nach ISO 6508-1 (DIN EN 10109) und die Härteprüfung nach Vickers (Diamantpyramide) nach DIN EN ISO 6507-1:2005 bis -4:2005. Die Shore-Härte, benannt nach Albert Shore, ist ein Werkstoffkennwert für Elastomere und Kunststoffe und ist in den Normen DIN 53505 und DIN 7868 festgelegt. Mineralische Werkstoffe werden in einem Ritzverfahren nach Mohs geprüft (Diamant: Mohshärte 10).

Kerbschlagbiegeversuche an Stahlproben nach DIN EN 10045

Der Kerbschlagbiegeversuch ist ein 1905 von Augustin Georges Albert Charpy eingeführtes Verfahren der Werkstoffprüfung, das nach DIN EN 10045 relativ schnell und einfach Zähigkeitseigenschaften von Werkstoffen bestimmt. Dabei wird das Verhalten eines länglichen Quaders, der einseitig gekerbt (meist V-, seltener U-Kerbe) und im temperierten Zustand (gekühlt oder erwärmt) ist, bei hoher Verformungsgeschwindigkeit (Schlagbeanspruchung) untersucht. Der Versuch besteht darin, dass ein Pendelhammer mit einer bestimmten kinetischen Energie auf die ungekerbte Rückseite der Probe trifft und sie dabei zerschlägt. Dabei wird im Moment des Aufschlagens auf die Probe ein Teil der kinetischen Energie des Hammers durch Verformungsprozesse in der Probe absorbiert. Entsprechend der Energie, die während des Zerschlagens von der Probe absorbiert wird, schwingt der Pendelhammer auf der anderen Seite weniger hoch. Ermittelt wird somit die Kerbschlagarbeit W in Joule für einen bestimmten Werkstoff bei einer bestimmten Temperatur.

Kerbschlagarbeit W

$W = m\,g\,(h_0 - h_1)$ [J]

W: Kerbschlagarbeit in Joule,
m: Masse des Pendelhammers [kg],
l: Länge von Drehgelenk bis Schneidenmitte [m]
g: Fallbeschleunigung 9.81 [m/s^2],
$h_0 - h_1$: Steighöhe des Pendelhammers im Null-Versuch ohne Probekörper minus Steighöhe im Versuch mit Probekörper [m]

Die Höhen h_0 und h_1 werden über die gemessenen Auslenkungswinkel berechnet.

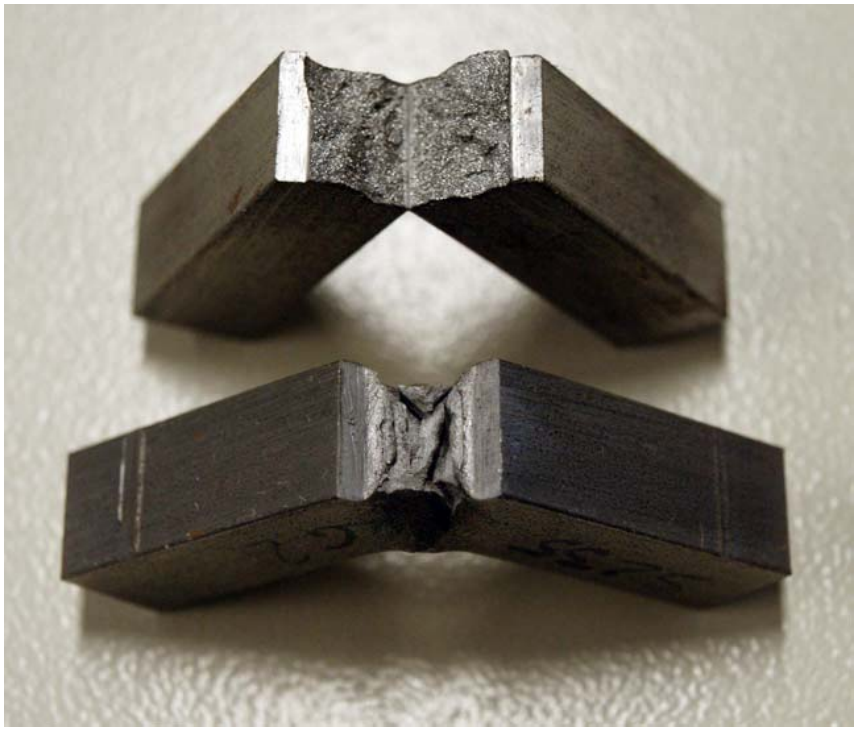
Das Verformungsvermögen eines Werkstoffes kann unter unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen verschieden sein. Deshalb ist die Kenntnis über das Verformungsverhalten des Werkstoffs ein wichtiges Kriterium für die Werkstoffbeurteilung bzw. Werkstoffauswahl. In zahlreichen Fällen hat es sich gezeigt, dass vor allem krz-Werkstoffe, die bei der üblichen Festigkeitsprüfung im (statischen)

Zugversuch die Anforderungen erfüllen, in der Praxis zum Beispiel bei mehrachsiger Beanspruchung und tieferen Temperaturen durch Sprödbruch versagen können.

Zähigkeit und Sprödigkeit sind also Eigenschaften, die nicht allein vom Werkstoff abhängen, sondern auch von den Beanspruchungsbedingungen wie Spannungszustand, Verformungsgeschwindigkeit und Temperatur (s. Übergangstemperatur). Wegen des Auftretens mehrachsiger und/oder schlagartiger Beanspruchung in der technischen Praxis ist es notwendig, neben Bruchdehnung und Brucheinschnürung, die im Zugversuch bestimmt werden, das Werkstoffverhalten auch unter Sprödbruchbedingungen zu untersuchen.

Kerbschlagzähigkeit A_k

Die Kerbschlagzähigkeit ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen eine schlagende (dynamische) Beanspruchung. Die Einheit ist die geleistete Kerbschlagarbeit W bezogen auf die Bruchfläche in [J/cm^2].
Die Zähigkeit ist abhängig von der Temperatur (Stahl ist warm zäher als kalt) und der Probenform (gekerbter Stahl ist weniger zäh).
Die dynamische Biegung in kurzer Zeit verursacht einen Bruch, oft ohne das bei langsamer Beanspruchung beobachtete Fließen des Werkstoffs.



Losenhausenwerk Kerbschlag-Prüfgerät (Pendelschlagwerk) mit eingelegtem Prüfkörper. Duktiler Bruch bei Raum-Temperatur (unten) und Sprödbruch bei -20° C (oben) von zwei Stahlproben S235 G2.

Grundlagen der Messtechnik: Sensoren Justieren, Kalibrieren, Tarieren; Messfehler, Genauigkeitsklasse; Hysterese; Analog-Digital-Wandlung - Einführung am Beispiel eines Wegaufnehmers

Tarieren

Als Tarieren (arabisch tahara, entfernen, wegnehmen) bezeichnet man das Nullstellen des Anzeigewertes eines Sensors. Der Wert vor Versuchsbeginn wird als Konstante subtrahiert.

Kalibrieren

Als Kalibrierung wird der Vergleich der mit einem Messgerät ermittelten Werte mit denen einer Referenz oder eines Normals bezeichnet. Dabei wird ermittelt, wie groß die Abweichung zwischen beiden Werten ist oder ob diese Abweichung innerhalb bestimmter Schranken (Genauigkeitskasse) liegt. Die gesetzlich vorgeschriebene Kalibrierung eines Messgerätes ist eine Eichung.

Justieren

Nach der Norm DIN 1319 wird Justieren (Abgleichen) wie folgt definiert: "Justieren heißt, ein Messgerät so einstellen oder abgleichen, dass die Messabweichungen möglichst klein werden oder dass die Beträge der Messabweichungen die Fehlergrenzen nicht überschreiten. Das Justieren erfordert also einen Eingriff, der das Messgerät oder die Maßverkörperung meist bleibend verändert."
Dabei wird einer elektrischen Größe (V oder mV/V) die entsprechende physikalische Messgröße (Kraft, Weg, Dehnung, ...) in einer oder mehreren Messreihe(n) zugeordnet. Als Resultat erhält man eine Regressionsgerade, ein –polynom oder eine –funktion, die aus den elektrischen Messwerten die physikalische Größe berechnet.

Messfehler

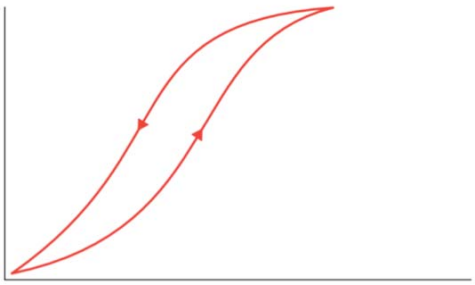
Jede Messung ist mit Fehlern behaftet. Diese können zufällig verteilt (Gauß'sche Normalverteilung) oder systematisch (dann meist schiefe Verteilung) sein. Gegen die zufällige Streuung kann man meist wenig tun, systematische Fehler lassen sich meist durch Eingriffe in das System minimieren. Zum Teil lassen sich Fehler in der Nachbearbeitung („Postprocessing") durch Fehlerrechnung weiter verringern.
Vor allem ist es aber wichtig die möglichen Messabweichungen zu kennen, um die Relevanz von erzielten Messergebnissen beurteilen zu können.

Genauigkeitsklasse

Die Genauigkeitsklasse eines Messgerätes gibt die maximal zu erwartende Abweichung eines Messwertes vom wahren Wert der gemessenen Größe an, bedingt durch das Messgerät bzw. die Messkette (Sensor, Kabel, Messverstärker, Analog-Digitalwandler) selbst.
In der für die Messtechnik grundlegenden DIN 1319 wird der Begriff Genauigkeitsklasse so beschrieben: „Die Genauigkeitsklasse ist eine Klasse von Messgeräten, die vorgegebene messtechnische Forderungen erfüllen, so dass Messabweichungen dieser Messgeräte innerhalb festgelegter Grenzen bleiben."
Messgeräte, die bestimmte Anforderungen an die Genauigkeit erfüllen, können einer Genauigkeitsklasse zugeordnet werden. Diese Klasse wird durch ein Klassenzeichen in Form einer Zahl (...) gekennzeichnet, welche die maximale Abweichung des Anzeigewertes (Ist-Wert) vom tatsächlichen Wert (Soll-Wert) in Prozent vom Messbereich angibt. Typische Klassen sind 0.1, 0.2, 0.4, 1, 2, ...

Hysterese

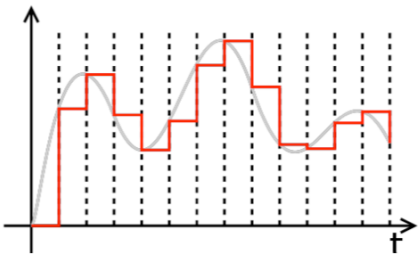
Hysterese, auch Hysteresis (griech.: hysteros = hinterher, später) charakterisiert ein System, dessen Ausgangsgröße nicht allein von der Art der Eingangsgröße abhängig ist, sondern auch von der Geschichte, welche die Eingangsgröße hatte. Das System beweist dadurch Pfadabhängigkeit. Hysterese tritt bei vielen natürlichen und technischen Vorgängen und Regelungsprozessen auf und ist damit ein wesentlicher Begriff der Kybernetik.



Hysteresekurve bei einem Elastomer: zeitlich verzögert-elastisches Verhalten

Analog-Digital-Wandlung – vertikale und horizontale Auflösung

In der modernen Mess- und Regeltechnik kommen Analog- und Digitaltechnik gleichermaßen zur Anwendung. Ein Analog-Digital-Umsetzer ADU, englisch ADC für Analog-to-Digital-Converter (auch Analog-Digital-Wandler oder A/D-Wandler) setzt die analogen Eingangssignale von Sensoren und Messverstärkern in digitale Daten bzw. einen Datenstrom um, die dann weiterverarbeitet oder gespeichert werden können. Das analoge Signal wird dabei zeitlich (Abtastung) und wertmäßig (Quantisierung - von lat. quantitas – Menge) in diskrete (lat. discretus „unterschieden“, „getrennt“) Werte umgewandelt. Das Gegenstück dazu ist der Digital-Analog-Umsetzer oder DAU.



analoges (grau) und digitalisiertes Signal (rot)

Analog

Das Adjektiv analog bezeichnet in der Mess- und Regeltechnik:

- ein technisches Signal, das kontinuierlich ist
- die kontinuierliche Anzeige eines Messinstruments mittels Zeigern

Als **Analogsignal** wird ein Signal bezeichnet, wenn sein Augenblickswert kontinuierlich jeden Wert stufenlos zwischen einem Minimum und einem Maximum annehmen kann. Dieses trifft auf nahezu alle realen Prozesse oder Zustände zu.
Von **Analogtechnik** oder analoger Technik spricht man in der Elektrotechnik bei sich wert- und zeitkontinuierlich ändernden physikalischen Größen. Somit kann bei der Analogtechnik ein Signal in einem zeitlichen Verlauf unendlich viele Wertigkeiten besitzen. In der Regel benutzt man den Begriff Analogtechnik bei der Signalübertragung und -verarbeitung, aber auch im Zusammenhang mit der Mess- und Steuertechnik. Typische Bauelemente der Analogtechnik sind Verstärker.

Digital

Digital (v. lat. digitus, „Finger“/„den Finger betreffend“, „mit dem Finger“) bezeichnet

- wert- und zeitdiskrete (gestufte) Signale
- die nicht-kontinuierliche Anzeige eines Messinstruments mittels Ziffern

Die **Digitaltechnik** beschäftigt sich mit der Verarbeitung wert- und zeitdiskreter Werte und Zahlenfolgen sowie der Verarbeitung digitaler Signale. Im engeren Sinn liegt ihr Schwerpunkt in der Speicherung, Übermittlung und Transformation von Information. Typische Bauelemente sind Logikgatter, Mikroprozessoren und Datenspeicher. **Diskrete Signale** sind seit der Erfindung des Computers meist auch **binär**, d. h. sie bestehen aus einer Abfolge von zwei verschiedenen Werten, etwa 0 und 1. Der Begriff **Digitalisierung** bezeichnet die Überführung kontinuierlicher (analoger) Größen in diskrete Werte.

Vertikale Auflösung: Quantisierung, digitale Auflösung, Bit-Genauigkeit

Die digitale Auflösung beschreibt, wie fein gestuft eine ursprünglich kontinuierlich veränderliche Größe bei einer digitalen Mess- oder Rechenoperation digital abgebildet bzw. dargestellt werden kann. Bei der Quantisierung wird der Messbereich der analogen Größe in eine endliche Zahl aneinander angrenzende Teilbereiche (Intervalle) aufgeteilt und jedem davon ein Wert eines endlichen symbolischen Systems zugeordnet. Hierbei treten verschiedene Fehler auf, wie Linearitätsfehler, Quantisierungsfehler und Quantisierungsrauschen. Als Auflösung wird die Anzahl der verwendeten Teilbereiche der analogen Größe, bei binären symbolischen Systemen auch ihre Zweierpotenz (Auflösung in Bit) bezeichnet, jedoch bei gleich großen Intervallen auch die Größe der Intervalle selbst.

Näherungsweise kann zur Ermittlung der digitalen Auflösung der Messbereich durch die Anzahl möglicher Zahlen geteilt werden:

8-Bit:	2^8	=	256	(nicht verwendet)
12-Bit:	2^{12}	=	4.096	(veraltet)
16-Bit:	2^{16}	=	65.536	(aktuell in der Messtechnik)
24-Bit:	2^{24}	=	16.777.216	(aktuell bei Spezialanwendungen)
32-Bit:	2^{32}	=	4.294.967.296	(aktuell bei Spezialanwendungen)

Beispiel:

Die große Dyna-Mess Prüfmaschine verfügt über einen Kolbenhub von 30 cm und einen Kraftbereich von ± 160 kN. Die Wandlerkarte arbeitet mit 12-Bit-Wandlern:

30 cm	/	4.096	=	0,00732 cm	bzw. 7,32 Hundertstel mm
320 kN	/	4.096	=	0,0781 kN	bzw. 78,1 N

Diese Werte entsprechen der praktischen Schrittweite beim Messen und Regeln.

Nach der Modernisierung auf eine Karte mit 16-Bit-Wandlern sieht das wie folgt aus:

30 cm	/	65.536	=	0,000458 cm	bzw. 0,458 Hundertstel mm
320 kN	/	65.536	=	0,00488 kN	bzw. 4,88 N

Die Auflösung ist hier um die Differenz von 4 Bit (2^4 = 16 fach) besser.

Die erreichbare digitale Auflösung alleine sagt noch nichts über die erzielbare Genauigkeit der Messungen aus. Die Messgenauigkeit hängt von allen in der Messkette beteiligten Komponenten ab (siehe oben).

Horizontale Auflösung: Abtastrate, Samplingrate, Samplefrequenz

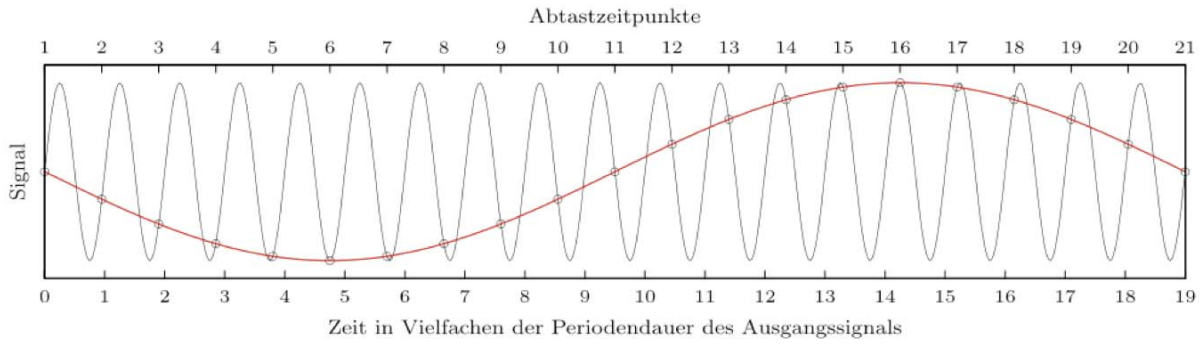
Das **Nyquist-Shannon-Abtasttheorem**, in neuerer Literatur auch WKS-Abtasttheorem (für Whittaker-Kotelnikow-Shannon) genannt, ist ein grundlegendes Theorem der Nachrichtentechnik, Signalverarbeitung und Informationstheorie. Claude Elwood Shannon formulierte es 1948 als Ausgangspunkt seiner Theorie der maximalen Kanalkapazität, d. h. der maximalen Bitrate in einem frequenzbeschränkten, rauschbelasteten Übertragungskanal.

Das Abtasttheorem besagt, dass ein kontinuierliches, bandbegrenztes Signal, mit einer Minimalfrequenz von 0 Hz und einer Maximalfrequenz f_{max}, mit einer Frequenz größer als $2 \cdot f_{max}$ abgetastet werden muss, damit man aus dem so erhaltenen zeitdiskreten Signal das Ursprungssignal beliebig genau approximieren kann.
In der Praxis bedeutet das Abtasttheorem, dass man vor der Abtastung die maximale Frequenz kennen oder herausfinden muss (zum Beispiel mit Hilfe der Fourier-Analyse eines hochfrequent abgetasteten Signals) und dann das Signal für die Digitalisierung mit mehr als der doppelten Frequenz abgetastet werden muss, wenn man das Signal in guter Näherung rekonstruieren will.

Wird die Abtastfrequenz zu klein gewählt (**Unterabtastung**), treten Artefakte auf. Diese nicht linearen Verzerrungen sind auch unter dem Begriff **Alias-Effekt** bekannt. Frequenzanteile, die höher sind als die Nyquist-Frequenz, werden als niedrigere Frequenzen interpretiert. Die höheren Frequenzen geben sich sozusagen als eine andere (niedrigere) aus (siehe Grafik), daher die Bezeichnung Alias (Spiegelfrequenz, Seitenbänder).
Zur Vermeidung solcher Aliasing-Effekte wird das Eingangssignal durch einen Tiefpass gefiltert (Anti-Aliasing-Filter). Diese Filterung muss vor der Digitalisierung geschehen - eine nachträgliche Korrektur von Alias-Effekten ist nicht mehr möglich.

Wenn man eine höhere Abtastfrequenz (**Überabtastung**) wählt, erhält man keine zusätzlichen Informationen, der Aufwand für Verarbeitung, Speicherung und Übertragung steigt jedoch. Trotzdem wird die Überabtastung bei der Analog-Digital-Wandlung genutzt,

- um Frequenzen oberhalb der halben Zielabtastfrequenz zu entfernen (teilweise Verlagerung der Filterung vom Analog- in den einfacher zu handhabenden Digital-Bereich),
- um irreparable Aliasingfehler im Zielsignal zu vermeiden,
- um den Signal-Rauschabstand und die Linearität von Analog-Digital-Wandlern zu verbessern.

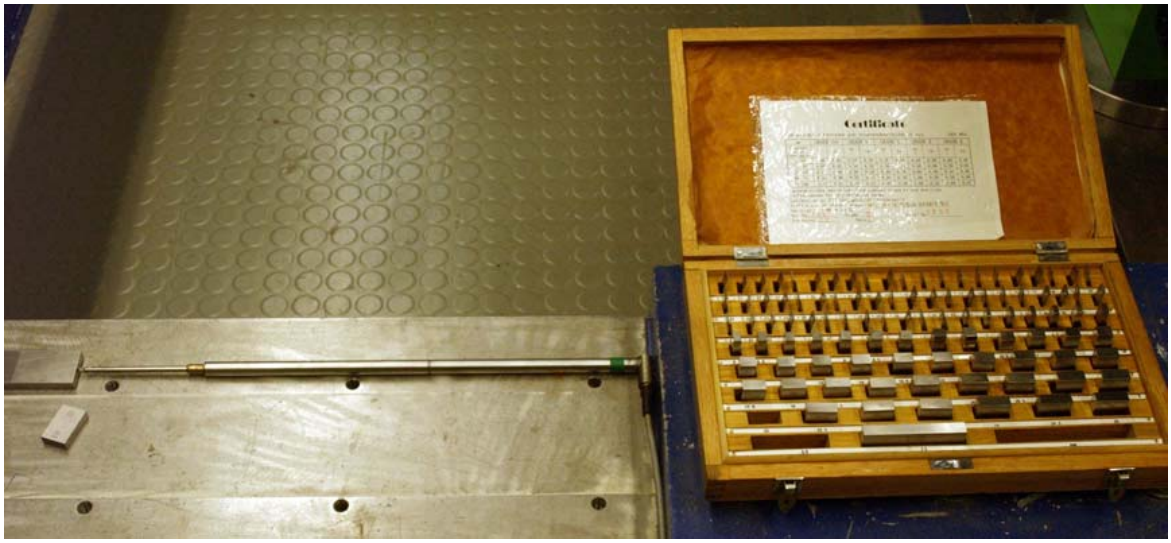


Aliasing durch Unterabtastung – die Abtastfrequenz ist hier etwas kleiner als die Frequenz des gemessenen Signals (grau), die gemessene Frequenz (rot) ist fälschlicherweise sehr viel kleiner.

Justieren und Kalibrieren eines Wegaufnehmers HBM WA100

Ein induktiver Tauchanker-Wegaufnehmer HBM WA 100 mit 100 mm Messbereich wird mit Hilfe eines Endmaßkastens für die Verwendung mit einem Spider8-Messverstärker und HBM catman Software eingerichtet. Den relativen Spannungswerten [mV/V] werden die gemessenen Längenänderungen [mm] in einer Linearisierungstabelle zugeordnet.

Anschließend wird mit verschiedenen Wegvorgaben tariert und es werden dazu jeweils einige Testmessungen an Endmaßen vorgenommen (Kalibrierung). Schließlich lassen sich Messabweichungen und Genauigkeitsklasse des Sensors (bzw. der Messkette) ermitteln.

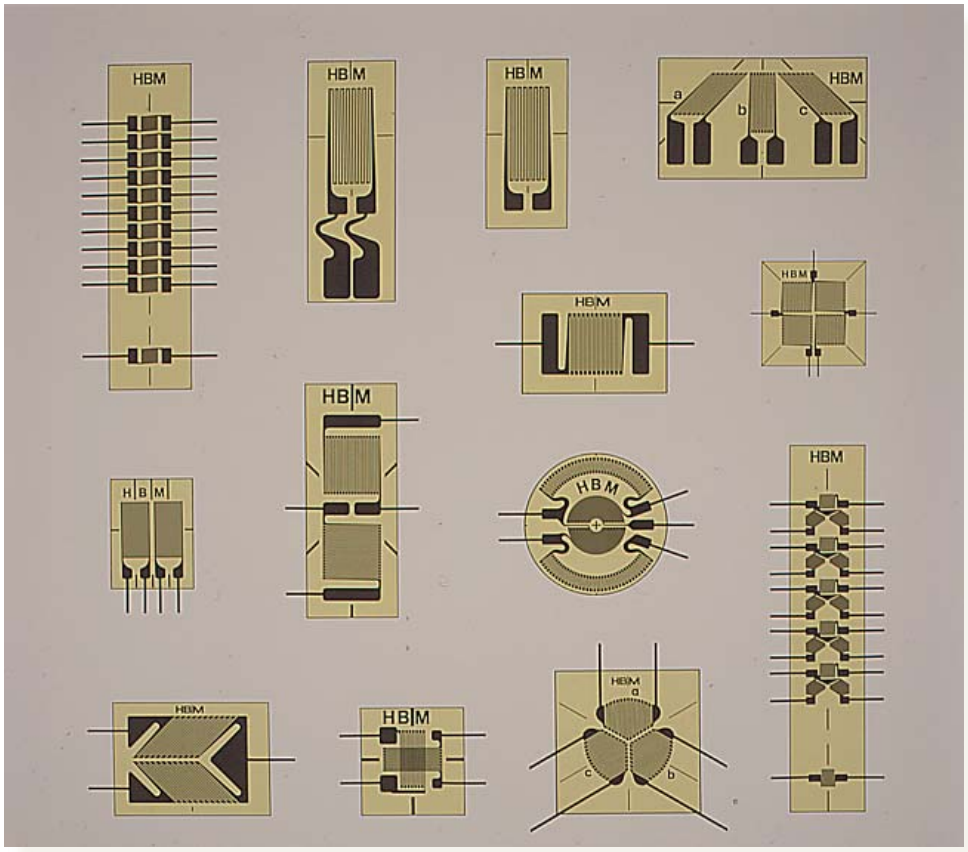


Induktiver Wegtaster HBM WA100 und Endmaßkasten

Messtechnik: Dehnungsmessstreifen (DMS) - Einführung am Beispiel eines Biegebalkens (Kragarm) mit Einzellast

DMS

Dehnungsmessstreifen (Abk.: DMS, englisch: strain gauge) sind Messsemsoren zur Erfassung von dehnenden Verformungen. Sie ändern bereits bei geringen Verformungen messbar ihren elektrischen Widerstand.
Als Väter des DMS gelten Simmons und Ruge, die keinen Kontakt zueinander hatten und unabhängig voneinander arbeiteten. Aus heutiger Sicht hat Edward E. Simmons allerdings eher einen Kraftaufnehmer erfunden, während Arthur C. Ruge, damals angestellt am Massachusetts Institute of Technology (MIT), den heute in der Spannungsanalyse verwendeten Sensortyp erfunden hat. Das Prinzip des DMS wurde übrigens bereits 1856 von William Thomson, dem späteren Lord Kelvin beschrieben.
Da Simmons bereits ein Patent eingereicht hatte, als Ruge 1940 mit seinem DMS auf den Markt wollte, wurde das Patent kurzerhand aufgekauft, um Patentstreitigkeiten zu vermeiden (Patenterteilung Simmons: August 1942, Patenterteilung Ruge: Juni 1944). Die ersten (Draht-)DMS trugen daher die Bezeichnung SR-4: Simmons, Ruge und 4 andere. Als Geburtsjahr des DMS gilt 1938, weil in dieses Jahr die Veröffentlichung von Simmons und die wesentlichen Arbeiten von Ruge fallen.



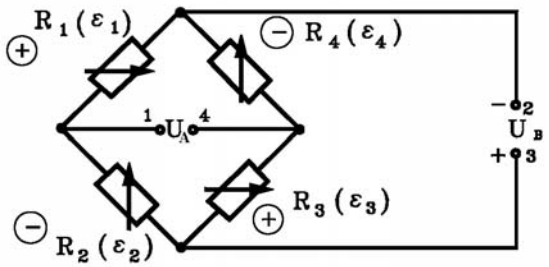
Einige typische DMS von Hottinger Baldwin Messtechnik: Einzel-DMS, DMS-Ketten zur Ermittlung von Spannungsverläufen, DMS-Rosetten zur Ermittlung von Hauptspannungen nach Richtung und Größe und Spezial-DMS für die Ermittlung von Eigenspannungen.

Dehnungsmessstreifen erfassen Formänderungen (Dehnungen/Stauchungen) an der Oberfläche von Bauteilen. Sie ermöglichen die experimentelle Bestimmung von mechanischen Spannungen und damit der Beanspruchung des Werkstoffs. Dies ist

sowohl in den Fällen wichtig, in denen diese Beanspruchungen rechnerisch nicht hinreichend genau bestimmt werden können als auch zur Kontrolle von berechneten Beanspruchungen, da bei jeder Berechnung Annahmen gemacht werden müssen und Randbedingungen angesetzt werden.

Anwendungsgebiete für DMS sind Dehnungsmessungen – mittels DMS-Rosetten zusätzlich auch die Ermittlung von Hauptspannungsrichtung und –betrag – an Bauteilen, Holzkonstruktionen, Tragwerken etc. bis hin zu Knochen oder Zähnen.
Ebenso werden sie in Aufnehmern (Sensoren) eingesetzt, z. B. Wägezelle, Kraftaufnehmer, Drehmomentaufnehmer, Druckaufnehmer, Beschleunigungsaufnehmer. Es können statische und dynamische (zeitlich sich ändernde) Belastungen erfasst werden. Auch Schwingungen im Hochfrequenzbereich können nach Frequenz und Amplitude untersucht werden.

Wheatstone'sche Brückenschaltung



Die Wheatstone'sche Brückenschaltung dient in der Anwendung mit DMS der präzisen Messung relativer Widerstands- bzw. Längenänderung.

U_B Brückenspeisespannung
U_A Brückenausgangsspannung
$R_{1...4}$ Widerstand des jew. DMS
ΔR Widerstandsänderung durch Dehnung
$k * \varepsilon_{1...4} = \Delta R/R = \Delta L/L_0 = \sigma/E$ Dehnung des jew. DMS mit k als k-Faktor des DMS

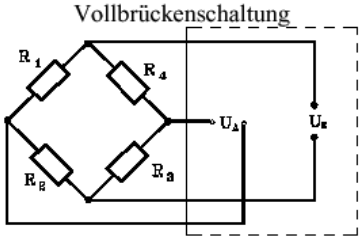
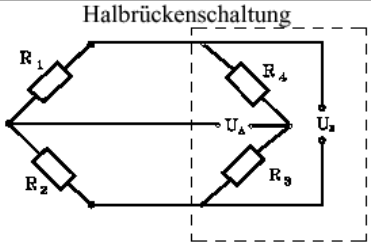
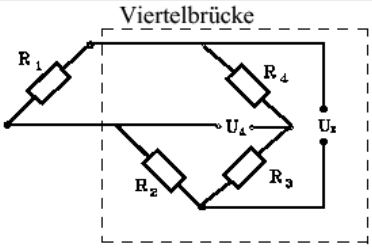
$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

$$\frac{U_A}{U_B} = 0 \quad wenn \quad R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad oder \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

D.h. wenn sich die Balance in der Brückenschaltung nicht ändert, bleibt $U_A = 0$.
In einer Halbbrückenschaltung sind R_3 und R_4 Festwiderstände, deren Verhältnis sich nicht ändert. R_1 und R_2 sind als DMS ausgeführt.
Häufig ist R_1 der aktive DMS zur Messung der Dehnungen während R_2 auf einem (spannungsfreien) Stück des gleichen Materials aufgebracht ist und so als Temperaturkompensator dient. Bei Dehnungen aus Temperaturänderungen ändern sich die beiden DMS gleichartig, ihr Verhältnis ändert sich daher nicht.
Eine weitere Anwendung ist, 2 DMS in gleicher Richtung nebeneinander, hintereinander oder an gegenüber liegenden Stellen anzubringen. Damit werden Temperaturdehnungen und Normaldehnungen eliminiert, für Biegedehnungen erhält man den Brückenfaktor 2 (siehe unten).

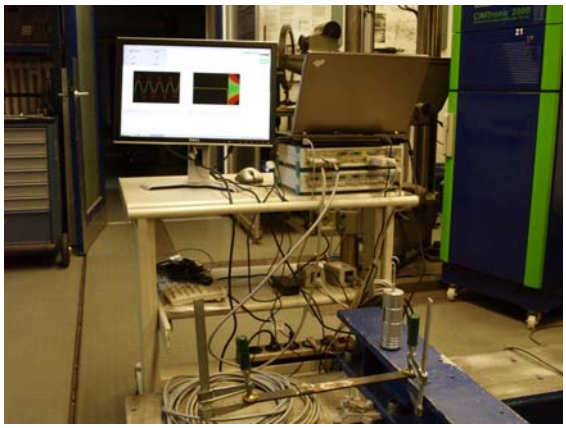
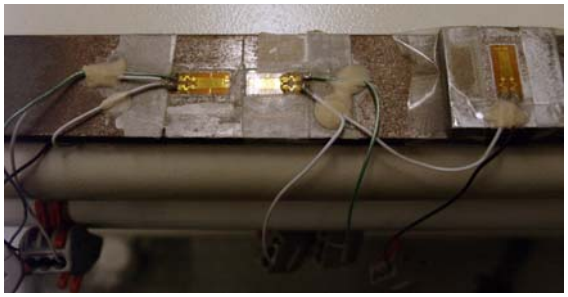
Die übliche Dehnungsangabe von ε in [µm/m] entspricht dem 10^6–fachen Wert von ε [-] und dient nur zur besseren/einfacheren Darstellung der Zahlenwerte.

Bezeichnung und Schaltung	aktive DMS	Kompensations DMS	passive DMS
Vollbrückenschaltung 	$R_1(+)\cdot R_2(-)$ $R_3(+)\cdot R_4(-)$ $R_1(+)$ $R_1(+)\cdot R_3(+)$ $R_1(+)\cdot R_2(-)$	— $R_2(-)$ $R_2(-)$ $R_4(-)$ —	— $R_3\cdot R_4$ — $R_3\cdot R_4$
Halbrückenschaltung 	$R_1(+)\cdot R_2(-)$ $R_1(+)$ $R_1(+)$	— $R_2(-)$ —	— — R_2
Viertelbrücke 	$R_1(+)$	—	—

Mögliche Verschaltungen mit der Wheatstone'schen Brückenschaltung. Am gängigsten sind die Vollbrücke für Aufnehmer wie Kraftmessdose und Wegtaster und die Halbbrücke für DMS mit Temperaturkompensation.

Versuch: Biegebalken mit Einzellast

Mit einem einseitig eingespannten Biegebalken, an dessen anderem (freien) Ende eine Last angebracht wird, lassen sich Dehnungen messen und mit den entsprechenden Berechnungen (Moment, Biegung, Spannung, Dehnung) vergleichen.
Am Biegebalken sind zwei Messstellen mit DMS angebracht, davon eine mit Temperaturkompensator, die andere mit Temperaturkompensator und dem Brückenfaktor 2 für Biegung.
Schließlich werden nach Anbringen einer Masse am freien Ende des Biegebalkens Schwingversuche durchgeführt und die Samplerate der Messelektronik beobachtet und angepasst, um die gedämpfte Schwingung optimal zu erfassen.

Schwingversuch und DMS-Verschaltungen mit Temperaturkompensation

Messtechnik: Ultraschallprüfung - Einführung

Die Ultraschallprüfung ist ein akustisches Verfahren zum Auffinden von Material- und Verarbeitungsfehlern, bei dem Ultraschall verwendet wird. Sie gehört zu den zerstörungsfreien Prüfmethoden. Dadurch lassen sich Bauteile auch im eingebauten Zustand prüfen.
Wie alle Prüfverfahren ist auch die Ultraschallkontrolle genormt und wird nach Richtlinien durchgeführt. Mittels eines Prüfkopfes, welcher mittels piezokeramischer Elemente Ultraschall von 0,2 bis 75 MHz aussendet und empfängt, wird die zu prüfende Oberfläche abgefahren. Dieses kann manuell, mechanisiert oder automatisch (innerhalb der Fertigungsstraßen) erfolgen.
Reflexionsschallverfahren teilt man ein in:

- Senkrechtschallverfahren mit Longitudinalwellen
- Schrägschallverfahren mit Transversalwellen

Grundsätzlich wird in beiden Verfahren mit einem Sende/Empfangskopf gearbeitet, der Longitudinalwellen aussendet und empfängt. Beim Eintritt der Welle aus dem Winkel-prüfkopf in das Material tritt eine Wellentransformation ein. Geprüft wird mit einer Transversalwelle. Die Schallgeschwindigkeiten für beide Wellenformen im Material sind unterschiedlich. Die Longitudinalwelle ist immer schneller.
Bei beiden Verfahren wird ein kurzer Schallimpuls in das Material gesendet. Der Impuls wird entweder reflektiert und gelangt zum Kopf zurück oder geht verloren. Um den Schall in den Prüfling einzuleiten, muss der Ultraschallprüfkopf mit einem schallleitenden Koppelmittel angekoppelt werden.

Änderungen der akustischen Eigenschaften an Grenzflächen (z. B. ein Lunker, ein Einschluss, ein Riss oder eine andere Trennung im Gefüge) im Inneren und an den Randflächen des zu prüfenden Teils reflektieren den Schallimpuls und senden diesen an den Schwinger im Prüfkopf zurück. Die Laufzeit zwischen Senden und Empfangen lässt die Berechnung des Weges zu (Impuls-Echo-Verfahren). Anhand der gemessenen Zeitdifferenz wird ein Signalbild erzeugt und auf einem Monitor sichtbar gemacht. Anhand dieses Bildes kann die Lage bestimmt und die Größe des Fehlers (in der Fachsprache Ungänze genannt) durch Vergleichen mit einem Ersatzreflektor (Flachbodenbohrung (Kreis-Scheiben-Reflektor), Nut, Querbohrung) abgeschätzt werden. Im Allgemeinen können Ungänzen mit einer Größe von ca. 0,6 mm erkannt werden, mit Spezialverfahren auch bis 10^{-7} mm. Bei automatischen Prüfanlagen werden die Informationen gespeichert, zum Prüfstück relativiert und auf verschiedene Weisen sofort oder später dokumentiert. Ultraschall-Wanddicken-Messgeräte zeigen die Wanddicke nach passender Kalibrierung bzw. Justierung als dezimale Größe an.

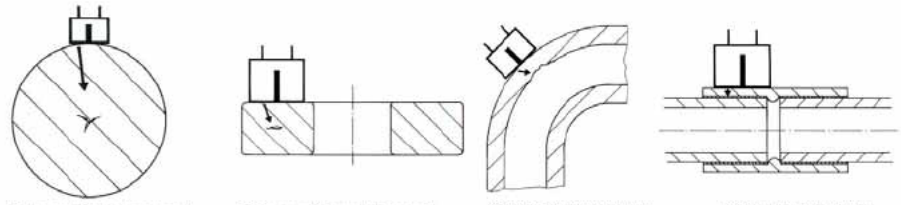
Schallgeschwindigkeit und Auflösung

Schallgeschwindigkeit in Stahl: 5920 m/s (longitudinal), 3255m/s (transversal)
Messköpfe – Schwingfrequenz bei 5 MHz
Auflösung:
Longitudinal mit $\lambda/4$: 5920 [m/s] / 5000000 [s^{-1}] / 4 = 0,000296 [m] bzw. 0,296 [mm]
Transversal mit $\lambda/4$: 3255 [m/s] / 5000000 [s^{-1}] / 4 = 0,000163 [m] bzw. 0,163 [mm]

Senkrechtschallverfahren mit Vertikalprüfköpfen

Beim Senkrechtschallverfahren werden Longitudinalwellen senkrecht in den Prüfling eingestrahlt. In den meisten Fällen kann man von der Rückwand des Prüflings ein Echo erwarten, das Rückwandecho. Üblicherweise wird die Schallstärke des Rückwandechos auf 80 % der Anzeigenhöhe eingestellt. Damit kann man sicher sein, von jeder erfassbaren Ungänze ein genügend starkes Echo zurückzubekommen. Zum Prüfen wird der Schallkopf gleichmäßig über die Oberfläche des Prüfstücks geführt und auf Echos geachtet.

Fingertip-Prüfköpfe B2F und MB4F



Prüfung von Messingstangen auf Kernfehler mit den Prüfköpfen SEB1 oder SEB2-0°

Prüfung von Sintermetallringen auf konzentrisch verlaufende Risse mit dem Prüfkopf MSEB4

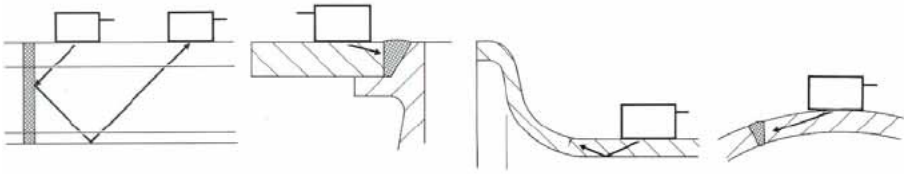
Restwanddickenmessung an einem Rohrkrümmer mit dem Prüfkopf MSEB5

Prüfung der Lötverbindung zwischen Muffe und Rohr mit dem Prüfkopf SEB10KF3

Schrägschallverfahren mit Winkelprüfköpfen

Auch beim Schrägschallverfahren wird eine Longitudinalwelle über ein Koppelmittel in den Prüfling eingetragen. Beim Übergang der Schallwelle in den Prüfling findet Schallreflexion, Schallwellenbrechung und Wellentransformation statt. Der Winkel am Kopf ist so gewählt, dass alle Wellen außer der transformierten Welle sich verlaufen oder aus dem Prüfling wieder austreten. Mit der transformierten Welle als Transversalwelle wird geprüft. Gesucht wird im Normalfall ein von der Oberfläche beginnender Riss (oder eine andere Störung) z. B. in einer Schweißnaht. Dabei sucht man entweder einen Riss an der Gegenseite des Prüflings, der mit der Oberfläche einen 90° Tripelspiegel erzeugt, oder – nach einer Reflexion an der Gegenseite – einen gleichen Riss an der eigenen Oberfläche.

Miniatur-Winkelprüfköpfe MWB45-04, MWB45-4, MSWQC mit QC-X und SMWB70-6



Prüfung der Thermitschweißung an Schienen mit den Prüfköpfen WB45-1 in Tandemtechnik

Prüfung einer 12 mm dicken Flansch-Schweißnaht mit dem Winkelprüfkopf MWB80-4

Prüfung einer Aluminium-Radfelge auf Anrisse mit dem Winkelprüfkopf MSW-QC5 und QC-X45

Prüfung der Schweißnaht einer Ni-Rohrleitung mit dem Prüfkopf WRY70

Koppelmittel

Der Übergang an der Grenzfläche zwischen Festkörper (Metall) und Gas (Luft) dämpft die Energie des Schallimpulses sehr stark ab. Daher wird auf die Oberfläche des Werkstückes ein Koppelmittel (z. B. Kleister, Gel, Wasser oder Öl) aufgetragen.
Bei automatisierten Prüfungen in Fertigungsstraßen wird zwecks Übertragung des Schallsignals das Prüfstück oft in eine geeignete Flüssigkeit getaucht (Tauchtechnik), oder definiert benetzt.