

Ultraschall- und Magnetpulver-Prüfanlagen

Dr. (USA) Wolfram A. Karl DEUTSCH
KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal,
info@karldeutsch.de, www.karldeutsch.de

Kurzfassung. In diesem Beitrag wird der Anlagenbau der Firma KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau vorgestellt.

Beim Prüfen mit Ultraschall liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Halbzeug. Stangen, nahtlose und geschweißte Rohre, Bleche und Schienen sind typische Prüfobjekte. Selbstkonstruierte und kundenspezifisch angepasste Mechaniken ermöglichen einen hohen Prüfdurchsatz auch in einem rauen Industrieumfeld. Die Elektronik und die Sensorik der Prüfanlagen werden ebenfalls im eigenen Haus entwickelt und gefertigt. Durch die Teilhaberschaft an der französischen Firma M2M und durch die gemeinsame Produktentwicklung mit der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) in Berlin sind auch Anlagen auf Gruppenstrahlerbasis im Produktportfolio der Fa. KARL DEUTSCH.

Bei der Magnetpulverprüfung wird ein großer Kundenkreis bedient: Automobil, Windkraft und der Eisenbahnsektor sind erfolgreiche Standbeine. Auch hier kommt der Anlagenbau aus einer Hand. Dies zeigt sich in nahezu unverwüsthlichen Prüfmechaniken, bedienerfreundlichen Anlagensteuerungen (auf Basis von innovativen Siemens-S7-Automatisierungslösungen im Industriestandard) und fortschrittlichen Prüfkonzepten bezüglich des Durchsatzes (Kettentransport, Mehrkontaktprüfung, optimierte Beschickungs- und Entladesysteme). Die automatisierte und patentierte Prüfmittelüberwachung ist dabei eine wichtige Option.

Die Anlagen werden in der werkseigenen Halle endmontiert und im Regelfall durch den Kunden vor der Lieferung besichtigt. Kleinere Änderungen können durch die Mechanische Fertigung zeitnah erfüllt werden. Insgesamt stehen 1500 m² Hallenfläche und zwei Hallenkräne zur Verfügung und ermöglichen auch die Fertigung großer Anlagen.

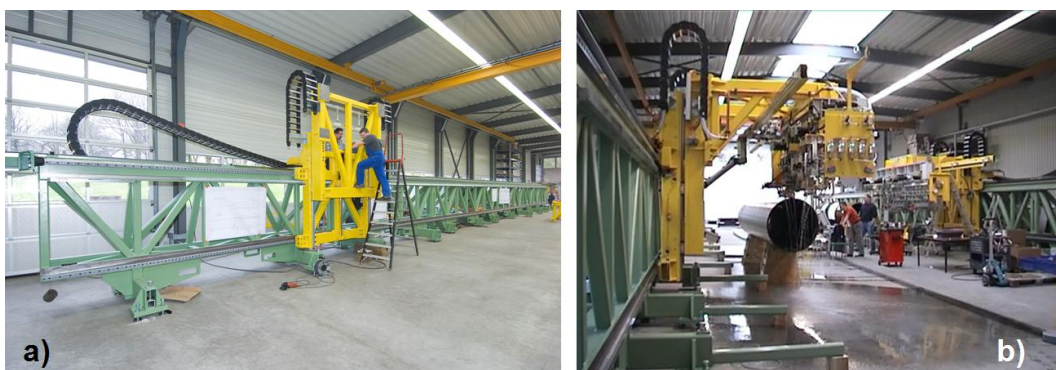


Bild Endmontage zweier Schweißnahtprüfanlagen a) Montage der Schwermechanik mit einer Baulänge von 35 m, **b)** Überprüfung der Anlagen anhand eines Testrohres bei voller Prüfungsgeschwindigkeit.



Bild Endmontage einer Tauchtankanlage a) Blick in die Halle des Sondermaschinenbaus in Wuppertal, **b)** Einsetzen der Drehrollenstation in den Edelstahltank unter Verwendung eines Schwerlast-Kranwagens.

Ultraschall-Prüfung von Knüppeln und Stangen

Stranggegossene Knüppel sind während der Produktion regelmäßig Gegenstand einer Ultraschallprüfung (ECHOGRAPH-KNPS). Runde oder quadratische Knüppel mit typischen Abmessungen zwischen 50 mm und 180 mm werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 m/s untersucht. In diesem Fertigungsabschnitt weisen gerade die quadratischen Knüppel erhebliche Toleranzen auf (ballige oder eingefallene Flächen, unterschiedliche Kantenradien, verwundene Profile), so dass eine flexible Führung der Sensorhalter an der Knüppeloberfläche von entscheidender Bedeutung für den Prüfprozess ist. Die Sensoren können über Federsysteme mehrere Zentimeter am Profil nachgeführt werden. Während früher an blockgegossenen Knüppeln oft nur zwei Prüfköpfe zum Einsatz kamen, ist heute eine möglichst große Querschnittsabdeckung erwünscht. Daher sind aktuell bei quadratischen Knüppeln bis zu 28 Prüfköpfe (sieben pro Seite) vorgesehen. Typische Prüfempfindlichkeiten liegen im Bereich von 1,5 mm KSR bis 5 mm KSR.

Im weiteren Fertigungsprozess werden die Knüppel zu Stangen ausgewalzt. Auch hier sind die Oberflächen noch schwarz. Die Geradheitstoleranzen sind in diesem Stadium noch so groß, dass eine Nachführung der Sensoren (Arbeitsbereich: mehrere Millimeter) an der Oberfläche gewährleistet sein muss. Typische Durchmesser für diese Prüfaufgabe betragen 15 mm bis 130 mm (ECHOGRAPH-STPS). Je größer die Zahl der eingesetzten Sensoren, desto größer die Abdeckung des Stangenquerschnitts. Bisher wurden Anlagen dieses Typs mit 3 bis 15 Sensoren ausgestattet. Die Umstellung auf einen neuen Durchmesser ist bei diesem Prüfsystem besonders einfach gelöst. Typische Prüfempfindlichkeiten betragen 1 mm KSR bis 2 mm KSR.

Stangen mit blanken Oberflächen dienen oft im Automobil- und Luftfahrtbereich als Rohmaterial. In diesem Fall ist eine vollständige Querschnittsabdeckung erforderlich. Hierfür wird ein Tauchtanksystem mit typischerweise 23 Sensoren eingesetzt (16 Winkel-Prüfköpfe, 7 Senkrecht-Prüfköpfe). Die Prüfgeschwindigkeiten betragen 1 m/s bis 2 m/s. Die gute Oberflächenbeschaffenheit erlaubt eine entsprechend höhere Prüfempfindlichkeit (typisch 0,7 mm KSR bis 1,5 mm KSR). Aktuell sind Durchmesser zwischen 10 mm und 100 mm mit diesem Anlagenkonzept prüfbar.

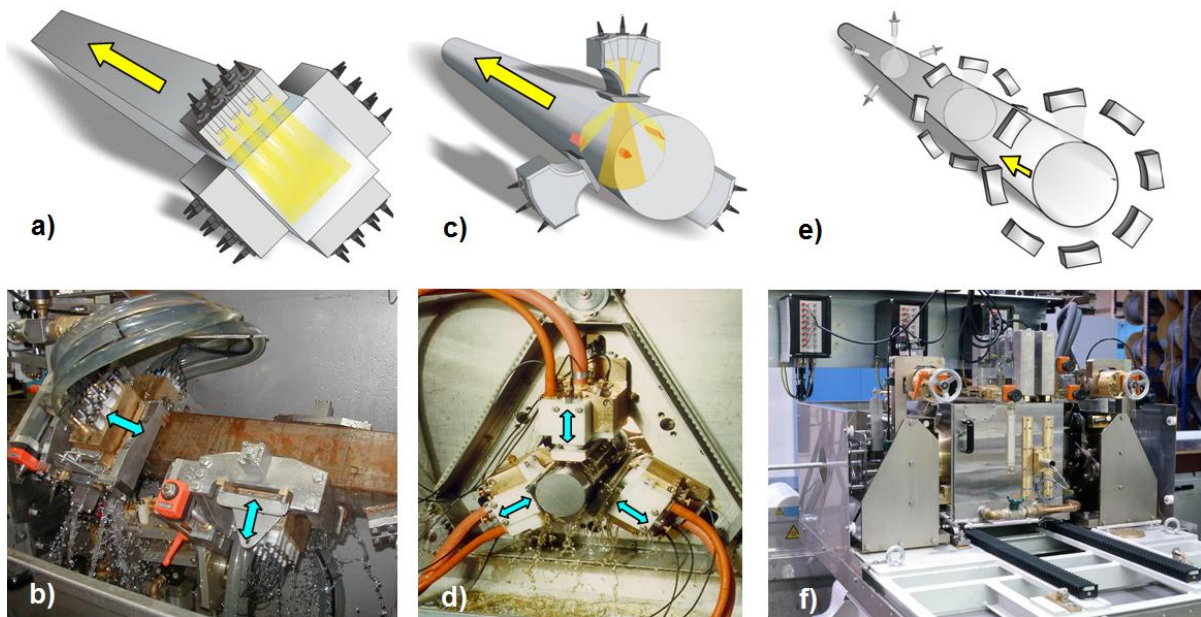


Bild Knüppel- und Stangenprüfung. a) Prinzip Knüppelprüfung mit 28 Senkrecht-Prüfköpfen, b) zugehörige Prüfmechanik zur Knüppelprüfung mit Nachführung der Sensoren am Knüppel (Pfeile), c) Prinzip Stangenprüfung mit 3 Senkrecht-Prüfköpfen und 6 Winkel-Prüfköpfen, d) zugehörige Prüfmechanik zur Stangenprüfung mit schneller Durchmesser-Umrüstung, e) Prinzip Stangenprüfung mit 5 Senkrecht-Prüfköpfen und 16 Winkel-Prüfköpfen mit vollständiger Querschnittsabdeckung, f) zugehörige Prüfmechanik zur Stangenprüfung als Tauchtank.

Ultraschall-Prüfung von Rundbarren

Falls auch bei größeren Rundbarren eine vollständige Querschnittsabdeckung erforderlich ist, wird mit einem Prüfportal gearbeitet. In jedem Fall kommen Senkrecht-Prüfköpfe zum Einsatz, in manchen Fällen zusätzliche Winkel-Prüfköpfe, um den oberflächennahen Bereich ebenfalls zu erfassen. Typische Durchmesser für solche Anlagentypen beginnen bei ca. 130 mm – also in einem Bereich, in dem Durchlaufanlagen sehr viele Sensoren bräuchten, um eine akzeptable Überdeckung zu erreichen.

Die Bauteile bisheriger Projekte sind aus Stahl (Strangguss bzw. geschmiedete Wellen), aus Aluminium (vertikaler Strangguss) oder auch aus Titan. Die maximalen Durchmesser betragen 1 m und die Bauteile sind oft bis zu 10 m lang. Um bei solchen Volumina akzeptable Prüfzeiten zu erreichen, sind in der Regel mehrere baugleiche Sensoren im Einsatz. Die Prüfpuren der einzelnen Sensoren werden überlappend ausgelegt (z.B. 10% bei 6 dB-Schallbündelabfall), um eine vollständige Prüfung zu gewährleisten. Dazu müssen die Schallbündelformen sowohl in Richtung der Barrenachse als auch in Umfangsrichtung bekannt sein. In der Regel wird der 6-dB-Abfall in beiden Richtungen betrachtet, wobei beachtet werden muss, dass man runde oder elliptische Schallbündel zur Verfügung hat. Der DGZfP-Ausschuss für automatisierte Ultraschallprüfung beschäftigt sich aktuell mit dieser Problematik und wird hierzu eine entsprechende Richtlinie erarbeiten.

Ein weiterer wichtiger Parameter, der sich auf die Prüfzeit auswirkt, ist die Impulsfolgefrequenz. Zur Vermeidung von Phantomechos muss diese sorgfältig auf die Schalleigenschaften (Gefügemerkmale, Schallschwächung etc.) der Bauteile abgestimmt werden. Gerade die Senkrecht-Einschallung bereitet Probleme durch ggf. auftretende Mehrfachecho-Ketten. Typische Impulsfolgefrequenzen betragen daher 100 Hz bis 1000 Hz.

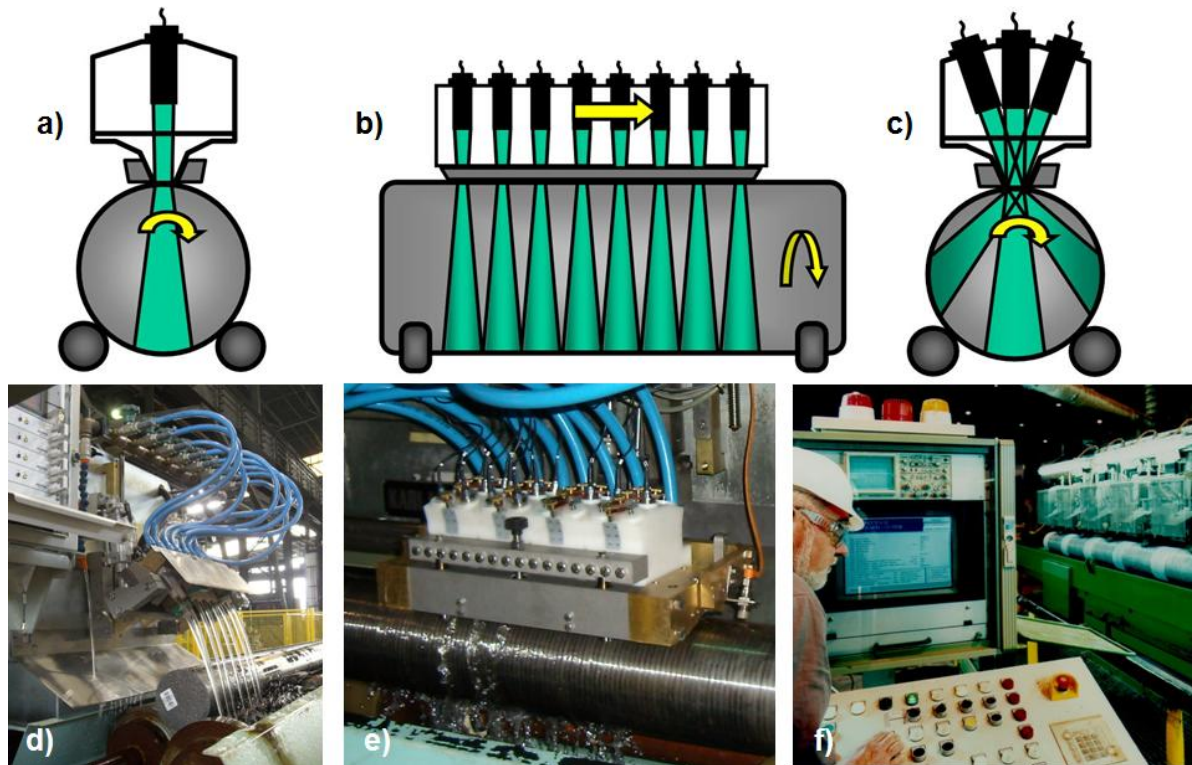


Bild Rundbarrenprüfung. a) Senkrecht-Einschallung, b) Einsatz mehrerer baugleicher Prüfköpfe zur Erhöhung des Durchsatzes, c) Erweiterung des Prüfkopfhalters um die Winkel-Einschallung, d) Prüfmechanik mit 8 Senkrecht-Prüfköpfen und Wasserstrahlankopplung, e) Kompakter Prüfkopfhalter mit 8 Senkrecht-Prüfköpfen und 16 Winkel-Prüfköpfen, f) Prüfportal für Aluminium-Rundbarren mit 10 Senkrecht-Prüfköpfen und 6 Winkel-Prüfköpfen, die für den Kopf- und Fußbereich des Barrens vorgesehen sind.

Ultraschall-Prüfung von nahtlosen Rohren

Der Rohrdurchmesser ist ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl der Prüfanlage. Zudem sind die Einschallrichtungen und Prüfanforderungen zu beachten. Die wichtigste Prüfaufgabe ist die Längsfehlerprüfung (Einschallung in beide Umfangsrichtungen). Die Wanddickenmessung wird über eine Senkrecht-Einschallung realisiert. Die Querfehler- und ggf. Schrägfehlerprüfung erfordern weitere Einschallrichtungen, die die Komplexität und Kanalzahl der Prüfanlagen deutlich erhöhen.

Rohre mit Durchmessern von 10 mm bis 170 mm werden mit dem ECHOGRAPH-HRP.R-System geprüft. Der größte Vorteil dieses Systems liegt in der hohen Durchlaufgeschwindigkeit von bis zu 2 m/s, wobei die Rohre ohne mechanische Rotationen linear verschoben werden. Das Rohr ist stationär von Prüfköpfen umgeben, deren Schallfelder sich überlappen und somit eine komplette Abdeckung gewährleisten. Fehlerlängen werden im Vergleich zu rotierenden Systemen zuverlässiger bestimmt, und auch der Nachweis kleiner Fehler ist ein besonderes Merkmal von Systemen mit stationären Prüfköpfen.

Rohre mit größeren Durchmessern bis 610 mm können in partieller Tauchtechnik mit der ECHOGRAPH-RPS.R-Anlage geprüft werden. Dabei befinden sich wassergefüllte Kammern mit den Prüfkopfsystemen unter dem Rohr. Die Prüfköpfe bleiben in ihrer Position, während das Rohr schraubenförmig über die Wasserkammern geführt wird. Mit dieser Methode können auch größere Prüfköpfe gut angekoppelt werden. Ein Nachteil ist allerdings die komplexe und relativ teure Rohrmanipulation, wobei die Drehbewegung und die lineare Verschiebung ohne Schlupf funktionieren müssen. Darüber hinaus müssen die

Wasserkammern regelmäßig gereinigt werden, weil sich loser Rost und Schmutz darin sammeln können.

Als drittes Prüfkonzept kommt ein Prüfportal in Frage (ECHOGRAPH-RPT.R). Dieses System eignet sich für die Offline-Prüfung. Mit Hilfe eines Fördersystems werden die Rohre geladen. Wenn das Rohr im Prüfportal liegt, wird es über Drehrollen in Rotation versetzt. Die Anzahl der Prüfkopfhalter richtet sich nach der geforderten Prüfgeschwindigkeit. Die Prüfkopfsysteme werden in der 12-Uhr-Position linear über das Rohr verschoben. Das Rohr wird somit schraubenförmig (helixförmig) abgescannt. Typische Durchmesser betragen 150 mm bis 600 mm.

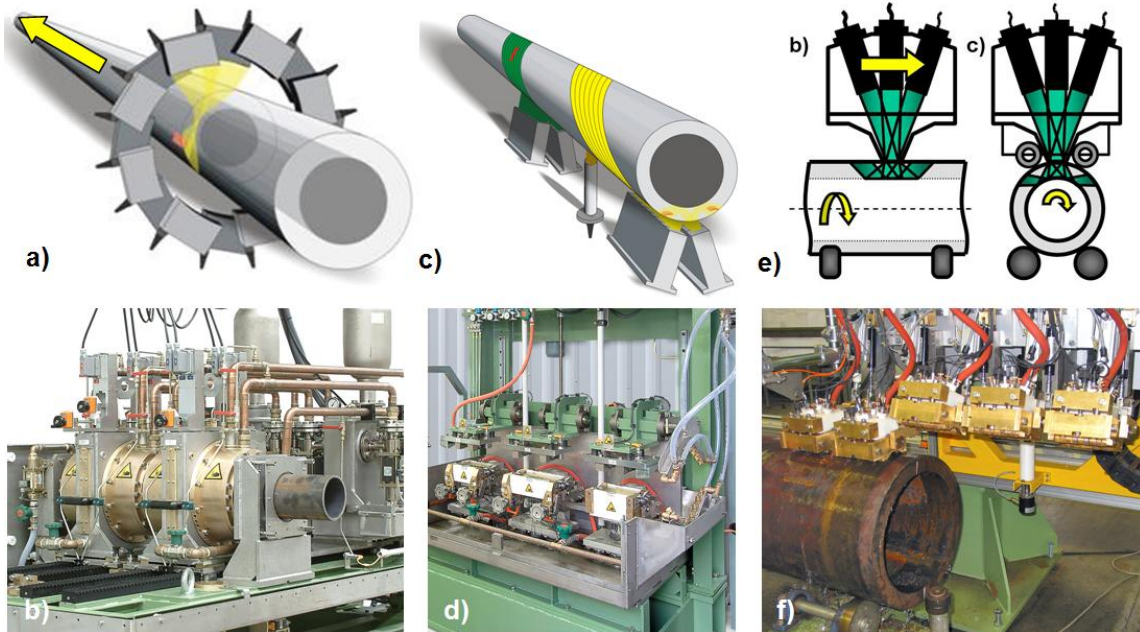


Bild Prüfung nahtloser Rohre. a) Schnelle Durchlaufprüfung mit ringförmiger Prüfkopfanordnung, b) zugehörige Prüfmechanik – in diesem Fall mit zwei Tauchtanks zur Aufnahme der Sensoren, c) Prinzip Rohrprüfung in Pflützentechnik und Spiraltransport der Rohre, d) zugehörige Prüfmechanik mit drei Prüfkammern zur Aufnahme der Sensoren, e) Prinzip Rohrprüfung mit Prüfportal und speziellen Mehrfach-Prüfkopfhaltern (mit fünf Sensoren pro Halter), f) zugehörige Prüfmechanik mit fünf Prüfkopfhaltern an einem sehr dickwandigen Rohr.

Ultraschall-Prüfung von UP-geschweißten Großrohren

Prinzipiell muss unterschieden werden, ob die Rohre spiralförmig oder längs geschweißt werden. Spiralförmige Rohre durchlaufen einen ähnlichen Herstellungsprozess wie HF-geschweißte Rohre. Die eingesetzten Bänder werden für einen kontinuierlichen Prozess aneinander geschweißt. Eine Bandprüfanlage muss allerdings auf dem drehbaren Wagen montiert werden, welcher sich direkt vor der Schweißmaschine befindet. Der Drehwinkel des Wagens korrespondiert dabei mit dem Schweißwinkel der Rohrschweißnaht.

Die Wandstärken betragen aktuell maximal 20 mm bis 25 mm und werden durch den Einformprozess limitiert. Somit sind normalerweise vier Sensoren für die Längsfehlerprüfung ausreichend. Diese kommen sowohl bei der ersten Schweißnahtprüfung direkt hinter der Schweißmaschine (am Endlosrohr) als auch bei der abschließenden Offline-Schweißnahtprüfung (am Einzelrohr) zum Einsatz. Die Querfehlerprüfung und die Dopplungsprüfung der Wärmeeinflusszone sind weitere Prüfaufgaben, die in jedem Fall in der zweiten Schweißnahtprüfanlage vorzusehen sind. Die Verfolgung der Schweißnaht ist bei Spiralrohren durch deren Lagetoleranzen besonders wichtig. Inzwischen sind

laseroptische Systeme im Einsatz, um sämtliche Prüfkopfhalterungen zentrisch zur Naht zu halten.

Größere Wandstärken sind bei längsnahtgeschweißten Großrohren möglich (mit Hilfe von Drei-Walzen-Rundbiegemaschinen bzw. U-O-Formpressen). Daher sind oft weitere Prüfkopfpaaire in Tandem-Anordnung im Einsatz, um Flankenbindefehler (Längsfehler) in der Schweißnahtmitte sicher aufzufinden. Der Rohrkörper wird in diesem Fall nicht im Rohrwerk, sondern im Grobblech-Walzwerk einer vollständigen Dopplungsprüfung unterzogen. Da hier die Blechbreiten inzwischen bis zu 5 m betragen können, bewegen sich die Kanalzahlen dieser Prüfanlagen in entsprechenden Dimensionen (z.B. 300 Kanäle bei 17 mm Prüfspurbreite pro Kanal).

Sowohl bei spiral- als auch bei längsnahtgeschweißten Rohren unterliegen die Rohrenden einer weiteren Prüfung. Die Dopplungsprüfung ist hierbei am häufigsten im Einsatz. Die Längsfehlerprüfung kann ebenfalls gefordert sein. Entweder wird diese Prüfaufgabe in die Prüfanlage zur Schweißnahtprüfung integriert oder in einem separaten Prüfstand durchgeführt. Im zweiten Fall ist natürlich ein deutlich höherer Durchsatz möglich.

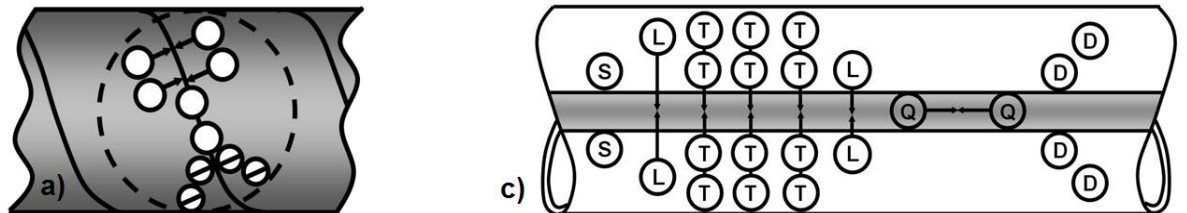


Bild Prüfung UP-geschweißter Großrohre. a) Prinzip der Schweißnahtprüfung mit 10 Prüfköpfen (4 für Längsfehler, 2 für Querfehler auf der Naht, 4 für Dopplungsprüfung neben der Naht), b) zugehörige Prüfmechanik als 3D-CAD-Zeichnung, c) Prinzip der Schweißnahtprüfung am längsnahtgeschweißten Großrohr mit 22 Sensoren (L = Längsfehler, T = Tandem, Q = Querfehler, D = Dopplungen, S = Nahtverfolgung), d) zugehörige Prüfmechanik in Auslegerbauweise, e) Seitenansicht der Prüfkopfhalterungen (zusätzlich erkennbar ist eine Rohrschale, die für die Kalibrierung der Anlage auf das Produktionsrohr gelegt wurde).

Magnetpulver-Rissprüfung an Automobilteilen

Gerade im Automobilsektor sind besonders hohe Taktraten erforderlich. Diesem Umstand wird durch vielfältige Maschinenkonzepte Rechnung getragen.

Die Prüfung mehrerer Bauteile pro Takt mit derselben Prüfanlage kann über die mehrfache Auslegung der Magnetisierstation erfolgen. Zudem ist es möglich, bei Werkstücklängen bis ca. 300 mm mit Mittenkontakten zu arbeiten, d.h. mit einer Magnetisierstation können zwei Teile gleichzeitig magnetisiert und geprüft werden. Bei einem Gesamttakt von ca. 10 Sekunden reduziert sich die Prüfzeit pro Bauteil entsprechend.

Die Zuführung der Bauteile kann entweder über einen Kettentransport oder über einen Roboter mechanisiert werden. Dies ist insbesondere bei hohen Durchsatzraten und

bei großen Bauteilgewichten sinnvoll. Das Entladen der Prüfmaschine übernimmt entweder derselbe Kettentransport oder ein pneumatisch betätigter BauteilAuswerfer. Die Bauteile werden dann in der Regel über ein Transportband zur Auswertestation befördert.

Die Prüfung komplex geformter Bauteile (z.B. Achsschenkel, Kolben, Querlenker) macht den Einsatz von Mehrkontaktmaschinen sinnvoll. In diesem Fall wird jedes Bauteilende separat kontaktiert und das Magnetfeld trotz der komplexen Bauteilgeometrie möglichst gleichmäßig über der gesamten Fläche ausgelegt. Kompromisse bzgl. der Gleichmäßigkeit müssen hierbei an Querschnittsübergängen oder Hohlstellen am Bauteil in Kauf genommen werden.

Bauteile mit einer Länge oberhalb von 900 mm (Kurbelwelle, Nockenwelle, Achse) werden in Maschinen mit Überlaufspulen geprüft. Auch hier kommen mechanisierte Be- und Entladekonzepte zur Anwendung (Roboter, Portalbeladung).

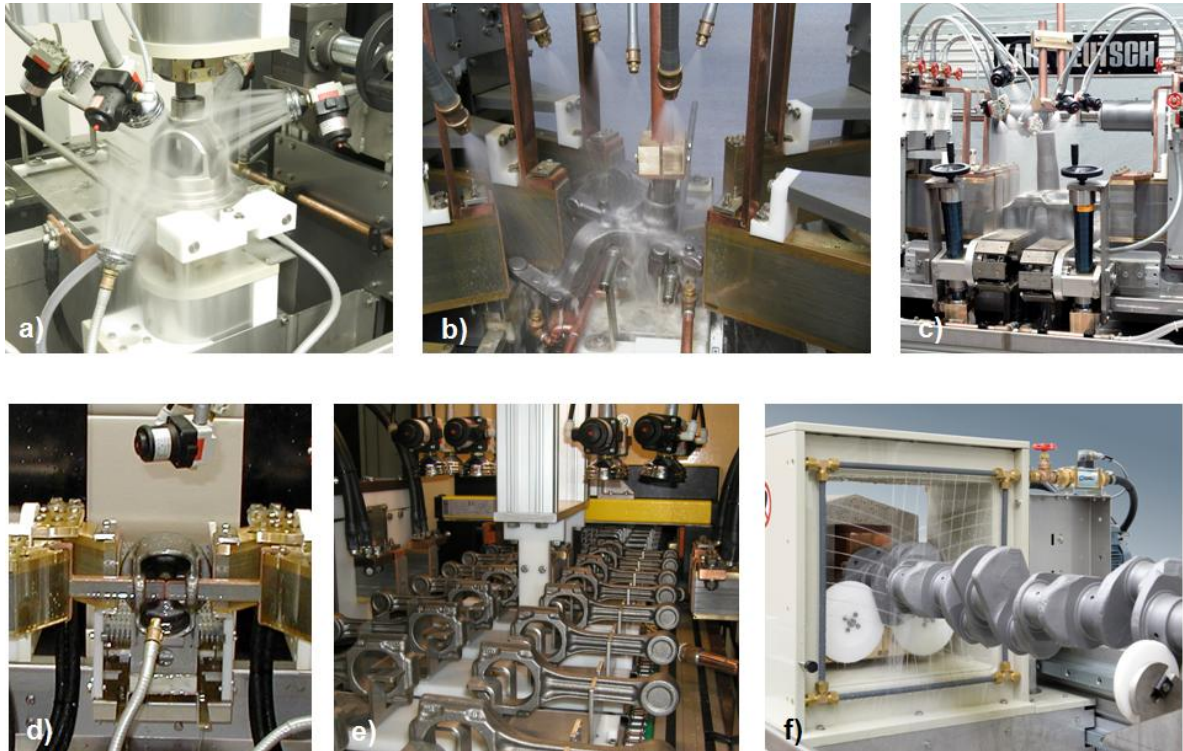


Bild MT-Prüfung von Automobilteilen. a) Prüfung von Getriebeteilen mit vertikaler Magnetisierstation, Dorn und BauteilAuswerfer, b) Mehrkontaktmaschine für Achsschenkel mit Auswerfer, c) Mehrkontaktmaschine für LKW-Achsschenkel mit Kettentransport zur Entladung (und Roboter zur Beladung, nicht im Bild), d) Mehrkontaktmaschine für Kolben und Auswerfer (und Roboter zur Beladung, nicht im Bild), e) Maschine mit Kettentransport, 2 Mittenkontakte, Prüfung von 4 Teilen pro Takt, f) Prüfung von Kurbelwellen mit Überlaufspule.

Magnetpulver-Rissprüfung an Eisenbahnteilen

Sowohl während der Neufertigung von Wellen als auch bei der Revisionsprüfung in den Werkstätten der Eisenbahngesellschaften kommt der Magnetpulver-Rissprüfung eine wichtige Rolle zu. In fünf Betrieben der Deutschen Bahn werden Anlagen zur Wellenprüfung eingesetzt. Die Wellen sind in diesen Fällen schon überarbeitet und werden vor dem erneuten Zusammenbau der Radsätze auf Oberflächenrisse inspiziert. Die Prüfung auf Längsfehler erfolgt mittels einer Ringfeld-Magnetisierung, welche über eine Stromdurchflutung aufgebaut wird. Die Prüfung auf Querfehler wird mit einer Überlaufspule durchgeführt, die aus Taktzeitgründen in beide Richtungen fahren, bespülen

und magnetisieren kann. Eine automatisierte Spannweitenverstellung ist als Option verfügbar.

Beim Bochumer Verein wurde eine Maschine für geschmiedete Räder und Radreifen erfolgreich installiert. Für die Magnetisierung der Räder kommt eine Hochstromspule zum Einsatz. Durch eine Kombination aus Spule und Jochpaar ist es bei Radreifen möglich, Risse aller Orientierungen zu prüfen. In beiden Fällen wird eine vollständige Drehung des Bauteils durchgeführt, um die gesamte Oberfläche zu erfassen. Die Beladung der Maschine erfolgt über einen Kran.

Auch eine Vielzahl anderer Bauteile aus dem Eisenbahnbereich wird einer Rissprüfung unterzogen. Nicht in allen Fällen lohnt sich die Anschaffung einer Prüfmaschine. Handjoch und Stromerzeuger (Typ DEUTROPULS) wie auch die Eindringprüfung (Typ KD-Check) können für die Erledigung der Prüfaufgabe ausreichend sein. Leistungsfähige MT- und PT-Rissprüfmittel (Typen FLUXA und KD-Check) werden ebenfalls im Hause KARL DEUTSCH hergestellt.



Bild MT-Prüfung von Eisenbahnteilen. a) Prüfung von Eisenbahnwellen mit Überlaufspule, b) Gesamtansicht der Prüfanlage mit pneumatisch beweglichem Dach zur Kranbeladung, c) Prüfkabine für Eisenbahnräder mit Kran, d) Beladung der Prüfanlage mit einem Radreifen, e) Prüfung eines Eisenbahnwagens unter Rotation des Bauteils und unter Verwendung einer Hochstromspule, die pneumatisch in die Prüfposition bewegt wird.

Magnetpulver-Rissprüfung an Teilen zur Energieerzeugung

Komponenten für die Windenergie-Erzeugung stellen durch die unterschiedlichen Bauteilgeometrien und mitunter hohen Bauteilgewichte an den Maschinenbau hohe Anforderungen. Oftmals ist mehr als eine Maschine pro Kunde erforderlich, um sämtliche relevanten Komponenten zu prüfen.

Wellen mit Längen bis zu 900 mm Länge können in gängigen Zweikontaktmaschinen geprüft werden. Die Untersuchung von Wellen mit Längen oberhalb von 900 mm erfolgt in Maschinen mit Überlaufspule. Ringe mit ausreichend

großem Innendurchmesser können in der gleichen Maschine über die ebenfalls verbauten seitlichen Magnetjochs und mit einem Magnetisierdorn geprüft werden.

Spezielle DEUTROMAT-Prüfanlagen wurden für Windkraft-Zahnräder mit Durchmessern von 0,5 m bis 1,8 m und Gewichten bis 5000 kg ausgelegt. Bei der Prüfung werden die Zahnräder zunächst über eine Drehvorrichtung in der Maschine zentrisch positioniert. Ein Antrieb dreht das Prüfteil Zahn für Zahn an einer Magnetisierstation vorbei (Kreuzjoch, bestehend aus horizontalem und vertikalem Jochpaar für Längs- und Querrisse). Nach einer vollen Umdrehung kann die Verzahnung auf Risse aller Richtungen inspiziert werden. Um die komfortable Betrachtung von Zahnrädern mit stark unterschiedlichen Durchmessern zu ermöglichen, ist der Abstand der Drehvorrichtung zum vorderen Rand des Maschinengestells einstellbar. So ist sichergestellt, dass der Prüfer zur Betrachtung immer einen ergonomisch günstigen Abstand zum Bauteil hat.

Große Lagerringe werden mit einer Kombination von Klappspule und Jochpaar geprüft. Dazu müssen die Ringe mindestens einmal vollständig gedreht werden. Aufgrund der einfacheren Beladung per Kran wird eine fast vertikale Prüfposition gewählt.

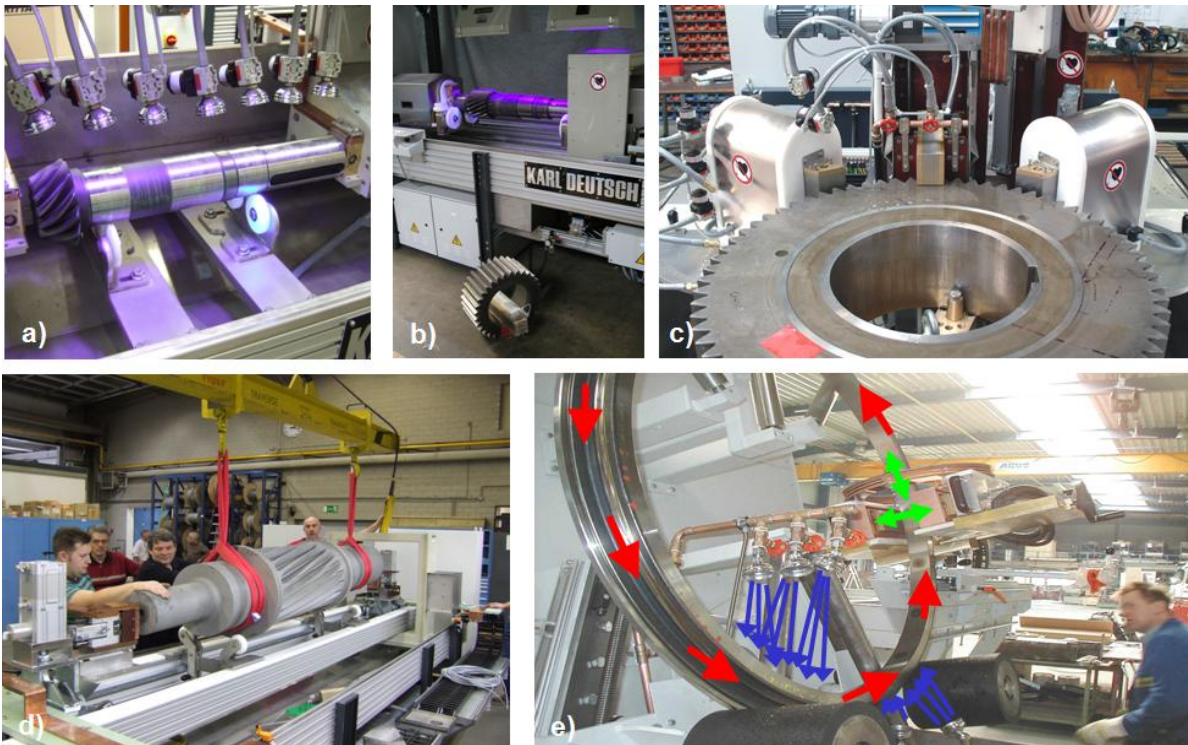


Bild MT-Prüfung von Teilen zur Energieerzeugung. a) Prüfung einer Getriebewelle in einer Zweikontaktmaschine mit Rollenauflage zur Drehung des Bauteils, **b)** Prüfanlage mit doppelt ausgelegter Magnetisierung (Jochs für kurze Bauteile und Ringe, Überlaufspule für lange Bauteile), **c)** Prüfung von großen Zahnrädern im liegenden Zustand unter Verwendung eines Kreuzjoches (Prüfung des verzahnten Bereichs), **d)** Prüfung von großen Wellen (bis vier Tonnen) mit Überlaufspule. Die Anlage verfügt über eine spezielle Schwerlast-Rollenauflage, mit der die Bauteile in der Anlage gedreht werden, **e)** Prüfung großer Lagerringe unter Rotation des Ringes (Kombination eines Jochpaares und einer Spule).