

# Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung mittels Koerzimetrie

Morgner, W., Michel, F., Methodisch-Diagnostisches Zentrum Werkstoffprüfung MDZWP Magdeburg  
Bezljudko, G. und Solomakha, R., Special Scientific Engineering SNR Charkov

## 1. Einleitung

Die zerstörungsfreie Materialcharakterisierung umfasst Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung, die nicht unmittelbar mit der Defektoskopie, das heißt, der Aufdeckung von Materialfehlern (Defekten) zu tun haben. Dazu gehört u.a. die Kontrolle der Legierungszusammensetzung, des Gefüges, der Härte und Härtetiefe, der Festigkeit, der Messung von Spannungen und Verformungen, der Spanbarkeit, der Ermüdung und Versprödung. Am meisten nutzt man dafür in Westeuropa elektromagnetische Methoden, insbesondere die auf der **Permeabilität** und der elektrischen Leitfähigkeit beruhenden Wirbelstrommethoden. In den osteuropäischen Ländern, wie z.B. Russland, der Ukraine und Weißrussland wird darüber hinaus mit der **Koerzitivfeldstärke** vielfach eine andere strukturempfindliche magnetische Eigenschaft ausgenutzt. Während sich die Permeabilität (Abb. 1) als feldstärkeabhängiges Verhältnis von  $B/H$  entlang der Neukurve ergibt, entspricht die Koerzitivfeldstärke (Abb. 1), gemessen in A/cm, praktisch der halben Breite der Hystereseschleife. Weichmagnetische Werkstoffe haben eine geringe Koerzitivfeldstärke und eine schmale Hystereseschleife, hartmagnetische Werkstoffe haben eine große Koerzitivfeldstärke und eine breite Hystereseschleife (Abb. 1).

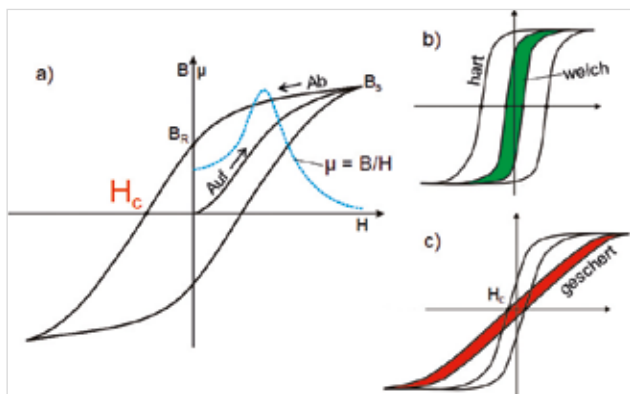


Abb.1 a: Hysteresekurve mit Neukurve, Sättigungsinduktion  $B_s$ , Restinduktion  $B_r$  und Koerzitivfeldstärke  $H_c$ . Permeabilitätskurve  $\mu = f(H)$ , b: Hysteresekurve eines weich- und eines hartmagnetischen Werkstoffs, c: Gescherte Hysteresekurve.

Manchmal wird die Koerzitivfeldstärke auch als magnetische Härte bezeichnet, weil sie ähnlich der mechanischen Härte von der Korngröße des Matrixgefüges, von Einschlüssen, inneren Spannungen und Verformungen beeinflusst wird. Vorausgesetzt, die Sättigungsmagnetisierung wird erreicht, ist die Koerzitivfeldstärke nicht feldstärkeabhängig, sondern ein fester Werkstoffkennwert. Sowohl die Wirbelstromverfahren als auch die Koerzimetrie erfordern Voruntersuchungen an Probenmaterial, um den Zusammenhang zwischen den magnetischen Eigenschaften und

den mechanisch-technologischen Eigenschaften durch Kalibrierung herstellen zu können, bzw. um zu kontrollieren, ob bekannte und zulässige Werte der jeweiligen magnetischen Eigenschaft über- oder unterschritten wurden. Wirbelstromverfahren beruhen auf einer Anwendung magnetischer Wechselfelder und spiegeln wegen des Skin-Effekts vorwiegend die Eigenschaften oberflächennaher Materialbereiche wieder. Die Messung der Koerzitivfeldstärke setzt normalerweise die Anwendung eines magnetischen Gleichfeldes voraus. Das ermöglicht größere Eindringtiefe des Magnetfeldes.

Es gibt **direkte** und **indirekte** Verfahren der Bestimmung der Koerzitivfeldstärke. Dieser Beitrag widmet sich vorwiegend den direkten Verfahren der Koerzitivfeldstärkemessung. Trotzdem sollen die indirekten Verfahren kurz erwähnt werden. Hierzu gehören das in Abb. 2 schematisch dargestellte Restfeldstärkeverfahren [1], das Restinduktionsverfahren [2] und das Restpunktverfahren [3]. Sie beruhen darauf, dass die meisten Teile des Maschinenbaus wegen ihrer Geometrie einen hohen Entmagnetisierungsfaktor aufweisen. Auch bei punktförmiger Magnetisierung liegt ein hoher, zur „Scherung“ der Hystereseschleife führender Entmagnetisierungsfaktor vor. Es lässt sich zeigen, dass in diesen Fällen sowohl die Restfeldstärke als auch die Restinduktion der wahren Koerzitivfeldstärke proportional sind.

Weitere indirekte Verfahren der Koerzitivfeldstärkemessung sind mit dem 3MA-Gerät des IZFP Saarbrücken [4] über den Verlauf des Oberwellenanteils und des Barkhausen-Rauschens sowie über den Verlauf der Überlagerungspermeabilität möglich. Allerdings handelt es sich dann nicht mehr um ein magnetisches Gleichfeldverfahren, sondern um die Ausnutzung von Wechselfeldern, wodurch nur eine begrenzte Eindringtiefe erreicht werden kann.

## 2. Direkte Koerzimetrie

Beachtlich breite industrielle Anwendung finden in Russland und der Ukraine die Aufsatz-Koerzimeter (Bild 2 rechts oben). Häufig werden sie dort als „Strukturoscope“ bezeichnet. Sie bestehen aus dem elektromagnetischen Joch zur Magnetisierung und Entmagnetisierung, einem weichmagnetischen Kern, der Wicklung und den Sensoren für Induktion und Feldstärke. Der Jochkern ist gewöhnlich aus weichmagnetischem Transformatorstahl hergestellt. Wenn das Joch auf die zu untersuchende Probe aufgesetzt wird, bildet sich ein geschlossener magnetischer Kreis. Etwas ungewohnt sind die manchmal relativ großen Aufnehmer, wenn es auf eine große Eindringtiefe des Feldes ankommt. Während noch bei den ersten Aufsatzkoerzimetern der 1960er Jahre (russisches KIFM-1) das Magnetisieren und Abmagnetisieren von Hand erfolgen musste, vollzieht sich heute, wie z.B. bei dem ukrainischen Gerät MC-04H2 (Bild 3) der gesamte Messvorgang mikrorechnergesteuert.

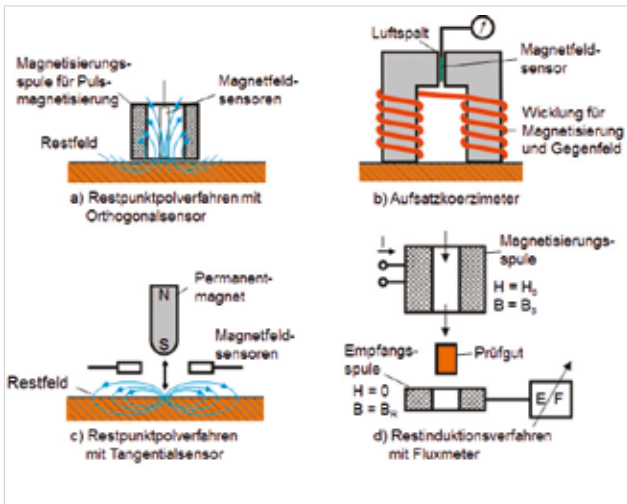


Abb. 2: Verfahren auf der Basis der Koerzimetrie (a, c, d: indirekt, b: direkt)

Anhand von zertifizierten Kalibriernormalen kann die Koerzitivfeldstärke des Werkstoffs ermittelt werden, wenn die Geometrie der zu untersuchenden Probe dem Kalibrierkörper ähnlich ist. Bei stark abweichender Geometrie wird die Koerzitivfeldstärke der Probe ermittelt. Dieser Wert ist rückführbar, wenn die Messung wieder an derselben Probe und an derselben Stelle der Probe gemessen wird. Ein Messzyklus, bestehend aus Entmagnetisierung, Auf- und Abmagnetisierung, dauert ca. 6 Sekunden.

Gegenwärtig sind am Methodisch-Diagnostischen Zentrum Werkstoffprüfung der Uni Magdeburg zwei aus der Ukraine gelieferte Geräte vom Typ MC-04H2 in Erprobung. Zu den Geräten gehören ein kleiner und ein großer Prüfkopf und je ein Kalibrierkörper aus normalgeglühtem Stahl USt 37-2 und gehärtetem Stahl 100Cr6 mit bekannten Koerzitivfeldstärkewerten.

### 3. Bisherige Erfahrungen

#### 3.1 Messunsicherheit

An den mitgelieferten Kalibrierkörpern aus 100Cr6 und USt 37-2 wurde die Wiederholbarkeit (Messunsicherheit) bei Messungen – etwa an ein und derselben Stelle – nach wiederholtem Abheben, Entmagnetisieren und Wiederaufsetzen bestimmt.

Es ergab sich aus 30 Messungen mit dem kleinen Prüfkopf eine prozentuale Messunsicherheit, bezogen auf  $2\sigma$  von 3,5 % für die ungehärtete Probe aus USt 37-2 und von

1,69 % für die gehärtete Probe. Bei dem großen Prüfkopf ergaben sich 0% (30 mal derselbe Wert) für die Probe aus USt 37-2 und 2 % für die gehärtete Probe.

#### 3.2. Abhebeeffect

Der Abhebeeffect ergab für den großen Prüfkopf und den gehärteten Kalibrierkörper bei einer zwischengelegten 0,12 mm dicken Kunststoff-Folie eine Abweichung von 0,09 A/cm; 0,15 A/cm bei einer Folie von 0,25 mm Dicke sowie 0,55 A/cm bei einer Folie von 2,55 mm Dicke.

#### 3.3. Randedeekt

Der Randedeekt war sowohl bei dem großen als auch bei dem kleinen Prüfkopf erstaunlich gering. An einer gewalzten Platte aus hochfestem Stahl von 6 mm Dicke und den Abmessungen 30 x 30 cm wies der kleine Prüfkopf so gut wie keinen Randedeekt auf. Der große Prüfkopf zeigte lediglich in der ungünstigsten Position längs zur Wand, beginnend bei 2 cm Abstand, eine beginnende Änderung der Messwerte. Die maximale Änderung stellte sich unmittelbar am Rand ein, d.h. wenn die beiden Jochschenkel unmittelbar am Rand aufsaßen.

#### 3.4. Oberflächenverfestigung

An beschichteten und gehärteten hochfesten Blechen war es, wie Bild 4 zeigt, nach vorheriger Kalibrierung mit ausreichender Genauigkeit möglich, zerstörungsfrei die Härte des Grundwerkstoffs zu bestimmen. Die Härte HV10 wurde an Stellen gemessen, wo vorher die Schutzschicht abgetragen worden war. Es wurden pro Blechprobe je 15 Messungen der Härte HV10 und je 30 Messungen der Koerzitivfeldstärke vorgenommen. Daraus wurden die Mittelwerte ermittelt. Das Ergebnis ist in Bild 4 dargestellt. Es zeigt einen guten Zusammenhang von Härte und Koerzitivfeldstärke. Die geringe Abweichung bei  $H_c = 7,6$  A/cm rührt davon her, dass dies die Werte einer Blechprobe im ungehärteten, allerdings kaltgewalzten, Ausgangszustand waren. Durch die Verfestigung trat eine Erhöhung der Koerzitivfeldstärke von 19 % gegenüber der bei 700° C geglähten Probe auf. Die Abflachung bei hohen  $H_c$ -Werten kann durch erhöhten Restaustenitanteil bei überhöhten Härtetemperaturen hervorgerufen worden sein (siehe auch [5] S. 130). Auch bei Kaltwalzen aus 85CrMo7.2 konnten unterschiedliche



Abb. 3: 1-Strukturprüfgerät MC-04H2, 2-großer, 3-kleiner Aufnehmer, 4-Kalibrierkörper. Rechts: Einsatz des Gerätes in einer Härtereianlage zur Kontrolle der einsatzgehärteten Schicht großer Zahnräder Modul 100

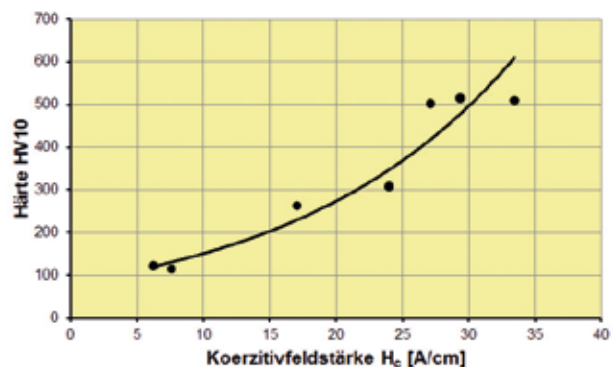


Abb. 4: Härte HV10 in Abhängigkeit von der Koerzitivfeldstärke, gemessen an hochfesten Blechen nach unterschiedlicher Glüh- bzw. Härtetemperatur.

Wärmebehandlungszustände mittels Aufsatzkoerzimeter KIFM-1 einwandfrei unterschieden werden [5]. Bei GGL konnte das Ferrit-Perlit-Verhältnis ebenfalls mittels Aufsatzkoerzimeter bestimmt werden [5]. Erste, in diesem Jahr bei der Lohnhärterei Harms, Magdeburg, durchgeführte, Untersuchungen an mehreren Pinions (Bild 3) ergaben, dass sich die Koerzitivfeldstärke nach dem Einsatzhärten an der Oberfläche der einsatzgehärteten Schicht um das 5-fache erhöht. Bei Kugellagerstahl tritt beim Härten eine Erhöhung der Koerzitivfeldstärke um das 3-fache auf. Beim Tempern von Temperguss wird  $H_c$  auf ein Fünftel erniedrigt.

### 3.5. Ermüdung

Die Koerzitivfeldstärkemessung wurde in der Ukraine erfolgreich für die Kontrolle auf Ermüdung bei hohen Kolonnen der Erdölchemie, bei Lasthebezeugen, Stahltürmen von Windkraftwerken und Schiffsrümpfen eingesetzt. Dabei wird angenommen, dass die einer ersten Mikrorissbildung vorausgehende ermüdungsbedingte starke Zunahme der Versetzungsdichte sich in der Koerzitivfeldstärke widerspiegeln muss [6 – 9]. Bild 5 zeigt, wie sich bei niederzyklischer Belastung eines unlegierten Baustahls, der etwa dem deutschen St 37-2 entspricht, wie er für Hebezeuge verwendet wird, die Koerzitivfeldstärke mit zunehmender Lastwechselzahl ändert. Für alle 4 Belastungen ergab sich ein  $H_c = 6$  A/cm als kritischer Wert. Er stellte sich allerdings je nach Belastung nach unterschiedlichen Lastwechselzahlen ein.

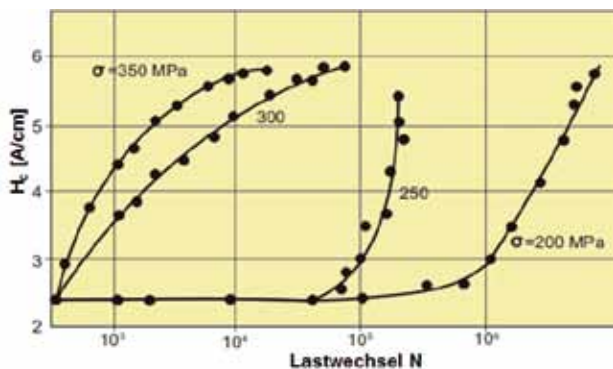


Abb. 5: Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei unterschiedlicher niederzyklischer Belastung von Proben aus USt 37-2

### 3.6. Anisotropie

Schon F. Förster [3] konnte zeigen, dass Koerzimeter nach dem Restpunktpolverfahren gut geeignet sind, den Effekt von Walztexturen aufzuzeigen und den Erfolg des Spannungsarmglühens nachzuweisen. Das ist bei der direkten Koerzimetrie wegen der linear angeordneten Pole gut feststellbar. Der Unterschied in der Koerzitivfeldstärke der o.g. unbehandelten, gewalzten 6 mm hochfesten Bleche beträgt zwischen Längs- und Querrichtung 0,45 A/cm.

### 3.7. Spannung und Verformung

Spannung und Verformung gehören zu den theoretisch und praktisch nachgewiesenen Einflüssen auf die Koerzitivfeldstärke [10]. Im elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungskurve ist der Einfluss noch relativ gering, er verstärkt sich im elastisch-plastischen Bereich und wird besonders auffällig mit beginnender plastischer Verformung.

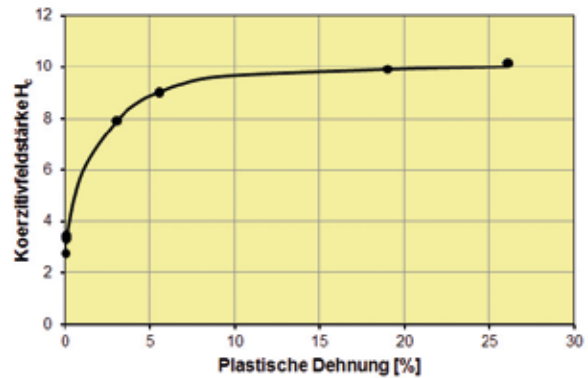


Abb. 6: Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit von der plastischen Dehnung für Proben aus USt 37-2. Nach [11]

Bleibende plastische Verformungen lassen sich gut mit einem Aufsatzkoerzimeter nachweisen [11] (Bild 6). Damit hat man bei einer Schadensanalyse ein Instrument in der Hand, um nach dem Versagen von Objekten aus Stahl und Gusseisen feststellen zu können, ob eine Überbeanspruchung vorgelegen hat.

### 3.8. Härtetiefenmessung

In einer früheren Arbeit [12] konnte bereits mit dem Micheevschen Koerzimeter KIFM-1 gezeigt werden, dass Aufsatzkoerzimeter nach vorheriger Kalibrierung für die Härtetiefenmessung geeignet sind. Das könnte besonders dort von Interesse sein, wo es sich um Stahlgussteile handelt, bei denen das Ultraschallrückstreuverfahren bisher nicht zur Anwendung kommen konnte. Manchmal genügt zur Härtetiefenmessung auch eine einfache Restfeldstärkemessung mit Tangentialfeldstärkemessung nach einer vorherigen Magnetisierung, um die Härtetiefe zu bestimmen [13]. Weitere Untersuchungen mit dem aktuellen Gerät MC-04H2 zur Härtetiefenmessung sind geplant. Kooperationspartner werden noch gesucht.

### 3.9. Weitere Anwendungen

Da sich die Koerzitivfeldstärke bei der Scherung der Hysteresekurve im Gegensatz zu allen anderen magnetischen Kenngrößen nicht ändert, sind die Einflüsse von Teilegeometrie und Abhebeeffect bei Aufsatzkoerzimetern gering (siehe 3.1 und 3.2). So ist es ohne Weiteres möglich, durch Lack- und andere Deckschichten hindurch zu messen. Eine Weiterentwicklung des Gerätes MC-04H2 stellt ein magnetischer Analysator KRM-C dar. Er erlaubt eine Mehrparameterkontrolle unter zusätzlicher Einbeziehung der Restinduktion  $B_r$ , der Sättigungsmagnetisierung  $B_s$  und der Hystereseverluste  $V_h$ . Es kann innerhalb von 8 Sekunden die komplette Hystereseschleife aufgezeichnet werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit wird bei der Sortierung von Materialverwechslungen gesehen. Dazu soll ein spektakuläres Anwendungsbeispiel erwähnt werden. Bei der Rohmontage eines Militärschiffs wurde in den 80er Jahren festgestellt, dass versehentlich sieben zu Schweißrissen neigende Bleche in den Schiffskörper eingeschweißt worden waren. Mit Hilfe des Restpunktpolverfahrens konnten alle sieben Bleche identifiziert werden. Nach einer punktförmigen Magnetisierung lag an diesen Stellen eine deutlich höhere Restfeldstärke vor.

#### 4. Zusammenfassung

Es wird über Erfahrungen bei der Nutzung der Koerzitivfeldstärke und damit verwandten Prüfverfahren als Mittel der zerstörungsfreien Materialcharakterisierung mit elektromagnetischen Mitteln berichtet. Es gibt die Möglichkeit der direkten Koerzimetrie mittels Aufsatzjoch und die Möglichkeit der indirekten Koerzimetrie über das Restfeldverfahren, das Restinduktionsverfahren und das Restpunktpolverfahren. Aufsatzkoerzimeter werden im Unterschied zu den osteuropäischen Ländern in Deutschland kaum oder gar nicht angewendet, obwohl sie einfach zu bedienen sind, bei einer festen Geräteeinstellung auf die  $H_c$  des Prüfteils und näherungsweise auf die wahre Werkstoffkenngröße  $H_c$  rückführbar sind, eine hohe Empfindlichkeit und geringe Messunsicherheit aufweisen. Sie zeigen einen geringen Abhebeeffect und ermöglichen hohe Eindringtiefen. Da auch das Preis-Leistungsverhältnis sehr gut ist, stellen die Aufsatzkoerzimeter eine interessante Alternative gegenüber anderen elektromagnetischen Prüfverfahren zur Materialcharakterisierung dar. Allerdings dauert eine Messung etwa 6 Sekunden. Mitunter ist auch noch eine zusätzliche Entmagnetisierung nach der Messung erforderlich. Auch die indirekten Verfahren der Koerzimetrie werden in Westeuropa mit Ausnahme des Restpunktpolverfahrens bisher wenig verwendet. Diese Geräte sind auch wesentlich teurer als die Aufsatzkoerzimeter und weisen eine geringere Eindringtiefe auf. Sie haben in automatischen Prüfanlagen [14] wegen ihrer höheren Prüfgeschwindigkeit Anwendung gefunden.

#### 5. Literaturhinweise

- [1] Förster, F.: Theoretische und experimentelle Grundlagen der elektromagnetischen Qualitätssortierung von Stahlteilen. IV. Restfeldverfahren. Z. Metallk.45 (1954) S. 233-238
- [2] Morgner, W. Michel, F.: Non-Destructive Testing of malleable cast iron using magnetic D.C. field methods. Ninth World Conference of Non - Destructive Testing Melbourne/Australien 1978, Proceedings Paper 1 ADD - 1/1-5
- [3] Förster, F., Zizelmann, G.: Die schnelle zerstörungsfreie Bestimmung der Blechanisotropie mit dem Restpunktpolverfahren. Z. Metallk.45 (1954) S. 245-249
- [4] Szielasko, K.: Umsetzung und Weiterentwicklung des 3MA-Prüfverfahrens mit innovativer Miniatur- Prüfgerätektechnik. ZfP-Zeitung 122, pp. 33-36, Dezember 2010
- [5] Morgner, W.: in: Herausgeber Livschitz, B.G. Physikalische Eigenschaften der Metalle und Legierungen. S. 390-391. Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1989.
- [6] Bezljudko, G., Popov, B., Solomakha, R., Karabin, V.: Metalware and Equipment - Fatigue and Lifetime Monitoring. Coerciv Force Method as a New Level of Efficiency and Culture Main Features. NDT World Review 3 (65), September 2014
- [7] Bezljudko, G., Marchenko, A., Solomakha, R.: Survey Assessment of the General Condition and Detailed Fatigue-Examination of Metal of Petrochemical Objects by a Coercimetric Method. NDT World Review 1 (55), March 2012
- [8] Bakunov, A.S., Gorkunov, G.S., Stscherbinin, W.E.: Technische Sicherheitsdiagnostik. Magnetische Prüfung. Lehrbuch der russ. Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung und Technische Diagnostik. Verlag Spektr Moskau 2011 S. 166-168
- [9] Kljujev, W.W., Mushizki, W.R., Gorkunov, E.S., Stscherbinin, W.E.: Handbuch zerstörungsfreie Prüfung (russ.) Band 6, S. 350-357, Verlag Maschb., Moskau 2004
- [10] Bozorth, R.M.: Ferromagnetism. D.Van Nostrand Company, Inc.Toronto-New York-London 1951.
- [11] Bezljudko, G.: Persönliche Mitteilung
- [12] Morgner, W.: Gelöste und ungelöste Probleme der zerstörungsfreien Kontrolle der Härte und Härtetiefe. Neue Hütte 30 (1985) H. 10, S. 378 - 381
- [13] Morgner, W., Michel, F.: Some new results in the field of non-destructive case depth measuring. ECNDT Berlin 2006 paper No. 3.1.6.
- [14] Kebe, T., Dürr, W., Goureev, D., Reimann, G.: Einsatz des IMPOC-Verfahrens zur Bestimmung mechanisch-technologischer Eigenschaften von Stahlband. DGZFP-Jahrestagung 2011-Mi1C1, S. 1-8