



Ergebnis -Bericht

Titel/Thema

Prüfung von Oberflächeneigenschaften mittels mikromagnetischer Verfahren

Universität, Gebäude 37
D-66123 Saarbrücken

Telefon +49 (0) 6 81/93 02-3941
Telefax +49 (0) 6 81/ 93 02-5920
e-mail: jens.junker@izfp.fraunhofer.de

Datum: 20.07.2006

Auftraggeber/Projektnummer	Berichtsnummer/Revision 060134-TW Vertraulichkeitsgrad -	Textseiten Anlagen	64 -
-----------------------------------	---	-----------------------	---------

Verfasser Jens Junker	Abteilung KK1	Telefon 3941	Unterschrift
---------------------------------	-------------------------	------------------------	---------------------

Freigabe für den Inhalt Altpeter, Iris	Freigabe für externe Verteilung Dobmann, Gerd
Name	Unterschrift
Name	Unterschrift

Stichworte (max. 8):

3MA, Barkhausenrauschen, Oberwellenanalyse, Nitrieren, Verbindungsschicht, Diffusionsschicht

Zusammenfassung

In dieser Arbeit sollte untersucht werden, ob eine miniaturisierte Version des 3MA – Geräts sich eignet, ungewollte Nitrierungen an den Gewinden von Kugelzapfen nachzuweisen. Das Gerät ist, durch die Integration der Geräteelektronik in den Sensor, in seinen Abmessungen stark reduziert, kann aber auch nur in einem geringeren Frequenzbereich eingesetzt werden. Diese Einschränkungen führen zu einer deutlichen Senkung der Herstellungskosten.

Die Versuche wurden an Gut- und Schlechtteilen aus der Serienproduktion, sowie an unbehandelten Teilen und an Teilen, die im Labor behandelt worden waren, durchgeführt. Im Zuge der Versuche wurde eine Anpassung der Gerätegeometrie vorgenommen, die eine Erweiterung der Möglichkeiten im Versuchsaufbau zuließ. Damit wurde eine Konzentrierung der Messung auf den relevanten Bereich erzielt.

Mit den durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit den im miniaturisierten 3MA – Prüfgerät realisierten Prüfverfahren *magnetisches Barkhausenrauschen* und *Oberwellenanalyse*, im verwendeten Frequenzbereich, Nitrierungen an Gewinden nachzuweisen. Dabei war keine Beschränkung auf Bauteile mit ausgeprägter Verbindungsschicht nötig, sondern auch Teile, die nur eine Diffusionsschicht aufwiesen, konnten erkannt und qualitativ hinsichtlich der Schichtdicken unterschieden werden.

Unbehandelte Teile konnten anhand der Prüfgrößen des magnetischen Barkhausenrauschens deutlich erkannt werden. Die Prüfgrößen der Oberwellenanalyse zeigten unter Einbeziehung der unbehandelten Teile keinen monoton steigenden bzw. monoton fallenden Verlauf.

Mit einem hinreichend definierten Kalibrierprobensatz wird es wahrscheinlich auch noch möglich sein, die Dicke der Diffusionsschicht quantitativ zu bestimmen. Dafür wären mehr Proben je Zustand und enger abgestufte Probenzustände nötig, um eine hinreichende statistische Absicherung zu gewährleisten.

Verteiler¹

-

Hinweis

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhaltes ist – auch auszugsweise – nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlung verpflichtet zum Schadenersatz.

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintragung.

¹ 1 x Auftraggeber, 1 x IZFP; falls nur Zusammenfassung zur Kenntnisnahme: "z.K." anfügen.

Zerstörungsfreie Prüfung nitriergehärteter Oberflächen mittels mikromagnetischer Verfahrensansätze

Diplomarbeit

Jens Junker

2006

HTW Aalen, Fakultät Maschinenbau und Werkstofftechnik, Studiengang Oberflächentechnik
und Werkstoffkunde

Fraunhofer - Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Saarbrücken

Betreuer:

Fr. Prof. Dr. S. Schumacher (HTW Aalen)

Fr. Dr. Ing. I. Altpeter (IZFP)

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Möglichkeit erörtert, mikromagnetische Verfahren zur Untersuchung von Oberflächeneigenschaften anzuwenden. Im betrachteten Fall war es das Ziel, eine Nitrierung an Gewinden von Kugelzapfen festzustellen, die während des Nitrierprozesses durch eine Kappe abgedeckt waren. Dem Hersteller zufolge kam es in einigen Fällen vor, dass Stickstoff unter diese Kappe diffundierte und dort das Gewinde nitrierte. Mit Hilfe einer abgewandelten Version des 3MA¹ – Prüfgeräts konnten Charakteristika in der Verlaufsförmigkeit der Barkhausenrausch – Profilkurve sowie in den Kennwerten der Oberwellenanalyse gefunden werden, die eine qualitative Beurteilung der Teile zuließen.

¹ 3MA steht für **m**ikromagnetische **m**ultiparameter **M**ikrostruktur- und Spannungs- **A**nalyse
Diplomarbeit Jens Junker, 2006

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, diese Diplomarbeit selbstständig verfasst zu haben ohne Verwendung von Quellen und Hilfsmitteln außer den angegebenen.

Datum, Ort

Unterschrift

Danksagung

Neben meinen Betreuerinnen Fr. Prof. Dr. S. Schumacher von der HTW Aalen und Fr. Dr. Ing. I. Altpeter vom IZFP möchte ich mich bei Hr. Dipl. Ing. K. Szielasko und allen Mitarbeitern der Abteilung WE am IZFP bedanken, die mir mit Rat und Tat behilflich waren. Außerdem gilt mein Dank auch allen anderen, die mir während meiner Diplomarbeit zur Seite standen.

Inhalt

1	Ausgangssituation	6
1.1	Gründe für die Untersuchungen.....	6
1.2	Stand der Technik.....	7
1.2.1	Gasnitrieren nach dem IONIT – OX - Verfahren	7
1.2.2	Prüfung der Kugelzapfen.....	9
1.2.3	Prüfen von Nitrierschichten mit dem 3MA - Verfahren	10
1.3	Verwendete Probensätze	10
1.3.1	Probensatz 1	10
1.3.2	Probensatz 2	10
1.3.3	Probensatz 3	11
1.3.4	Probensatz 4	11
1.3.5	Probensatz 5	11
2	Zielsetzung	12
3	Grundlagen	13
3.1	Magnetische Hysterese	13
3.2	Magnetisches Barkhausenrauschen	14
3.3	Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke.....	17
3.4	3MA Verfahren.....	19
3.4.1	Hardware des 3MA-Systems	19
3.4.2	Software des 3MA-Systems	20
3.5	Miniaturisiertes 3MA Prüfgerät	21
3.6	Anpassung der Gerätegeometrie.....	22
4	Durchgeführte Arbeiten	25
4.1	Messungen ohne angepasste Sensorgeometrie	25
4.1.1	Vorversuche	25
4.1.2	Versuche mit nicht angepasstem Sensor	29
4.2	Messungen mit angepasster Sensorgeometrie.....	35
4.2.1	Gestaltung der Sensoreinheit.....	35
4.2.2	Gestaltung des Elektromagneten	35
4.2.3	Versuche mit angepasster Sensorgeometrie	37
5	Interpretation und Auswertung.....	51
6	Zusammenfassung und Ausblick	54

7 Literatur..... 55

1 Ausgangssituation

1.1 Gründe für die Untersuchungen

In modernen industriellen Prozessen ist die Qualitätssicherung ein wichtiger Aspekt im Verlauf der Produktion. Um Reklamationen und daraus resultierenden Schadensersatz zu vermeiden wird häufig eine 100 % - Prüfung gewünscht, die naturgemäß zerstörungsfrei sein muss.

Für zerstörungsfreie Prüfverfahren werden die verschiedensten Wechselwirkungen zwischen Prüfteil und Prüfmittel genutzt. So nutzt zum Beispiel die Ultraschallprüfung die Reflexion von Schallwellen und die Auswertung der Laufzeit (-differenz), die Durchstrahlungsprüfung nutzt den Unterschied in den Schwächungskoeffizienten für elektromagnetische Strahlung verschiedener Werkstoffe, und die Farbeindringprüfung nutzt die Kapillarwirkung von Rissen. Diese Verfahren sind prinzipiell für alle Werkstoffe anwendbar, sie haben jedoch ihre Grenzen, beispielsweise in der Auflösung, bei komplizierten Geometrien oder bei modernen Werkstoffen wie Faserverbundwerkstoffen oder aufgeschäumten Metalllegierungen.

Wenn das zu prüfende Bauteil aus einem ferromagnetischen Werkstoff besteht, so kann man auf magnetische (z.B. Magnetpulverprüfung) und insbesondere auch mikromagnetische Verfahren (z.B. magnetisches Barkhausenrauschen) zurückgreifen. Diese bieten die Möglichkeit, sehr schnell online, integriert und automatisiert eine Aussage über das Prüfteil zu erhalten. Die Prüfzyklen liegen dabei im Bereich weniger Sekunden oder sogar teilweise deutlich unter einer Sekunde. Für diese Verfahren wurde am Fraunhoferinstitut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) das 3MA – System entwickelt, in dem mehrere Verfahren zusammengefasst sind.

Seitens des Interessenten² wurden mehrere Probenätze zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich jeweils um Kugelzapfen mit Gewinde (in Abb. 1 exemplarisch im Salzsprühnebeltest dargestellt) zum Einbau in Lenkgestänge in Kraftfahrzeugen. Die Teile waren aus einem niedriglegierten Vergütungsstahl (41CrS4) mit ca. 1%



Abb. 1 Kugelzapfen im Salzsprühnebeltest

² METAPLAS IONON Oberflächenveredelungstechnik GmbH

Chromanteil gefertigt und geringem Schwefelgehalt zur Verbesserung der Zerspanbarkeit.

Die Teile waren nitriert (Verschleißschutz) und oxidiert (Korrosionsschutz und tribologische Beanspruchung) nach dem von METAPLAS IONON patentierten IONIT OX – Verfahren (siehe 1.2.1).

Relevant war bei diesen Teilen die Frage, ob in dem Bereich unterhalb des Konus (Übergang zum Gewinde) eine Nitrierung stattgefunden hatte (rot hinterlegt in Abb. 2). Dieser Bereich war während des Prozesses mit einer Schraubkappe abgedeckt, so dass dort kein Stickstoff eindringen konnte.

Es traten aber immer wieder Fälle auf, in denen der Schutz nicht ausreichend war und der Bereich nitriert wurde. Es sollte untersucht werden, ob mit mikromagnetischen Prüfmethoden unter besonderer Berücksichtigung des 3MA – Verfahrens eine Möglichkeit bestand, eine schnelle Aussage über den Zustand der Teile zu erhalten. Wichtig war dabei, dass die Taktzeit der von einem Roboter durchgeführten Entstückung nicht maßgeblich erweitert werden musste.

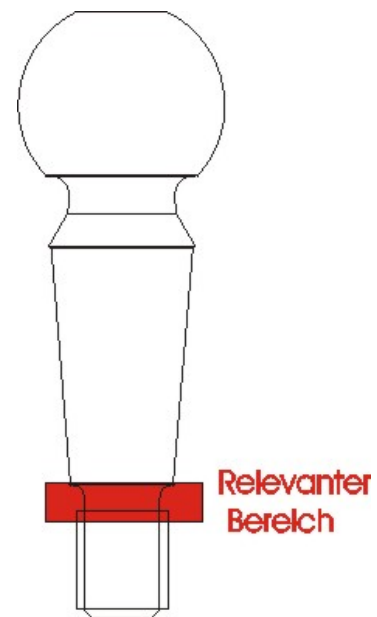


Abb. 2 Skizze eines Kugelzapfens mit konischem Mittelteil

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Gasnitrieren nach dem IONIT – OX - Verfahren

Der Verlauf von Temperatur und Druck während des IONIT – OX – Prozesses wird je nach gewünschtem Schichtaufbau gezielt eingestellt. Je nach Prozessgas, das zur Einstellung des Drucks verwendet wird, wird nach diesem Verfahren entweder nitriert (Prozessgas Ammoniak) oder nitrocarburiert (Prozessgase Ammoniak und Kohlendioxid).

Nach dem ersten Evakuieren wird der Druck durch das Prozessgas wieder etwa auf Atmosphärenniveau angehoben um den Stickstoff- bzw. Stickstoff – Kohlenstoffeintrag in die Werkstückoberfläche zu erreichen. Dieser Eintrag ist wesentlich höher als in späteren Prozessschritten und führt daher zur Bildung des Hauptteils des Nitrier- / Nitrocarburierschichtaufbaus.

Nach dem zweiten Evakuieren wird durch eine Glimmentladung aus neuerlich eingeleitetem Prozessgas ein Plasma erzeugt, das einen weiteren Eintrag an Wirkmedium in die Oberfläche bewirkt, aber darüber hinaus durch Festkörperzerstäubung zu einer Reinigung der Oberfläche führt und diese für die nachfolgende Oxidation aktiviert.

Die Oxidation wird durch Einleiten von Wasserdampf herbeigeführt. Durch Temperaturführung und aufgrund des Aufwachsens auf der kristallographisch begünstigenden Verbindungsschicht entsteht dabei eine ferrimagnetische Magnetitschicht (Fe_3O_4).

In Abb. 3 ist ein typischer Verlauf von Temperatur- und Druck dargestellt.

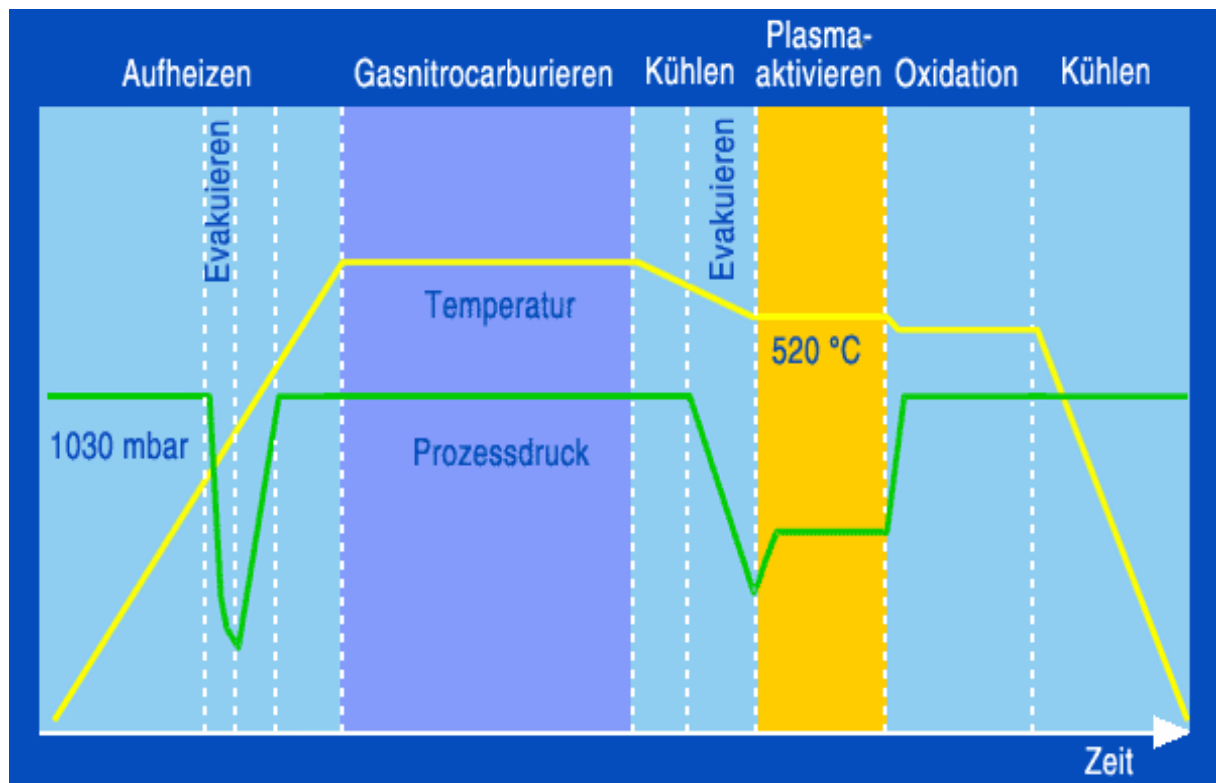


Abb. 3 Schema der Wärmebehandlung nach dem IONIT OX Verfahren

Die erzeugten Schichtsysteme bestehen an der Oberfläche aus einer Oxidschicht, die die Korrosionsbeständigkeit steigert und günstige Reibparameter aufweist (tribologische Beanspruchung), einer darunter liegenden Verbindungsschicht (VS), die aus ϵ - Nitrid (Fe_3N) und γ - Nitrid (Fe_4N) besteht, an die sich eine ins Grundgefüge übergehende Diffusionsschicht (DS) anschließt, die durch Ausscheidungen stöchiometrisch unterschiedlicher Nitride auszeichnet.

In Abb. 4 ist eine metallographische Aufnahme eines solchen Schichtverbundes zu sehen.

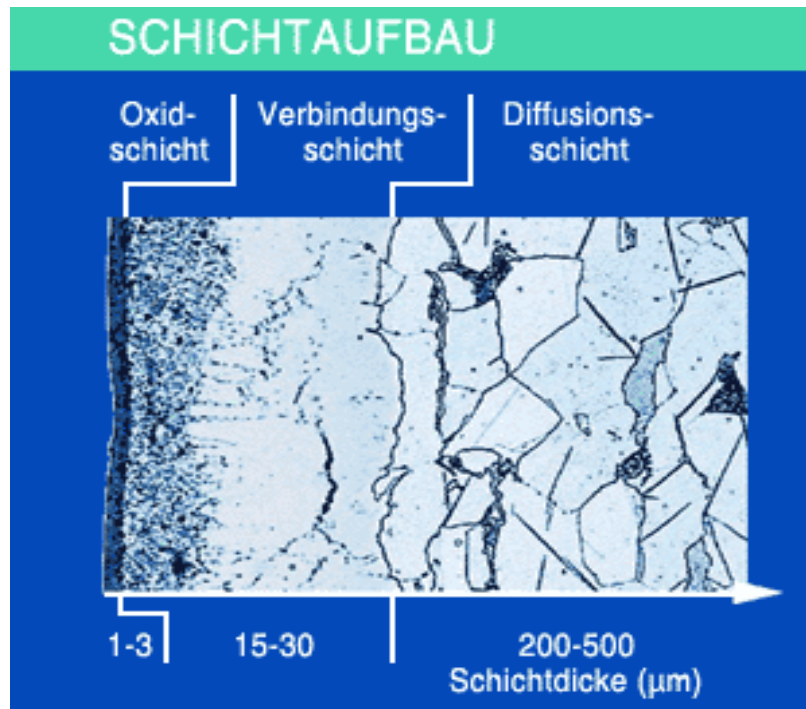


Abb. 4 Schichtaufbau der Nitrierschicht nach dem IONIT OX - Verfahren

1.2.2 Prüfung der Kugelzapfen

Bisher wurden die Kugelzapfen nach dem Nitrieren optisch begutachtet. Dabei war der Glanzgrad das entscheidende Merkmal. Er wurde durch die beim Nitrieren entstehende Verbindungsschicht stark beeinträchtigt und konnte so zur Unterscheidung von Gut- und Schlechteilen herangezogen werden. Ungünstig an diesem Prüfverfahren war, dass es zum einen nicht automatisiert werden konnte, zum anderen lieferte es bei einigen Teilen eine falsche Aussage wenn diese aus anderen Gründen als einer Verbindungsschicht (z.B. einer Oxidschicht) eine matte Oberfläche aufwiesen. Um falsche Aussortierungen zu erkennen wurde bisher im Anschluss an die optische Kontrolle an den aussortierten Teilen eine Tüpfelprobe³ angewandt, die jedoch ebenfalls nicht automatisierbar war und daher von Hand erfolgen musste.

All diese Prüfungen konnten jedoch nicht direkt die Aussage liefern, die vertraglich mit dem Kunden vereinbart war. Diese Anforderung besagte, dass die Härte 50 μm unter der Oberfläche nicht höher als die Kernhärte (an den Probeteilen wurde diese mit 241 HV gemessen) plus 50 HV sein durfte. Lediglich aufgrund von Erfahrungswerten konnte bisher davon ausgegangen werden, dass die ausgelieferten Teile den Anforderungen genügten.

³ Tüpfeltest / Tüpfelprobe: Aufbringen eines Tropfens einer 10%igen Kupferammoniumchloridlösung ($(\text{NH}_4)_2[\text{CuCl}_4]$) auf eine saubere, fettfreie Oberfläche. Ein Farbumschlag von blau nach rot zeigt einen Kontakt mit einem eisenhaltigen, metallischen Werkstoff. Dies bedeutet keine oder eine mangelhafte Verbindungsschicht auf nitrierten Bauteilen.

1.2.3 Prüfen von Nitrierschichten mit dem 3MA - Verfahren

In [Rüh1995] und [Alt1996] wurden bereits Ergebnisse von mikromagnetischen Untersuchungen an nitrierten Prüfteilen dargestellt. Die Ergebnisse der damaligen Untersuchungen zeigten, dass das Barkhausenrauschen Rückschlüsse auf die Schichtsituation zulässt. Dabei wurden jedoch nur Zeugenproben aus Industrieprozessen betrachtet, die standardisierte, einfache Geometrien besaßen, an denen an einer im Vergleich zum Sensor großen, ebenen Fläche geprüft werden konnte.

Weitere Veröffentlichungen befassen sich mit mikromagnetischen Untersuchungen an randschichtgehärteten Bauteilen ([Alt1987], [Alt1992], [Esp1990], [Ker1994], [Ker1999]) jedoch auch hier nur mit Untersuchungen an einfachen Prüfteilgeometrien.

Entsprechende Untersuchungen mit Ankopplung an geometrisch ungünstigen Stellen, insbesondere an Gewinden unter Berücksichtigung der geringen Kontaktfläche, wurden bisher nicht durchgeführt.

1.3 Verwendete Probensätze

1.3.1 Probensatz 1

Als erstes wurde von METAPLAS IONON ein Probensatz zur Verfügung gestellt, der aus 5 fertigbehandelte i.O. – Teilen (Kugelkopf poliert) und 5 n.i.O. – Teilen mit Verbindungsschicht (VS) sowie 1 n.i.O. – Teil nur mit Diffusionsschicht (DS) bestand (Abb. 5).

Abb. 5 Erster Probensatz. Bestehend aus: 5 i.O. Teilen (oben), 5 n.i.O. Teilen mit Verbindungsschicht (unten) und 1 n.i.O. Teil mit Diffusionsschicht (unten rechts)



Die n.i.O. – Teile waren nicht weiter behandelt worden und das nur mit Diffusionsschicht war mechanisch getrennt worden und teilweise eingebettet. An den Reststücken war an

der Oberfläche das Grundmaterial (nicht nitriert) frei zugänglich. Bis auf das n.i.O. – Teil nur mit Diffusionsschicht wiesen alle Teile dieselbe Geometrie auf.

1.3.2 Probensatz 2

Im weiteren Verlauf wurden seitens METAPLAS IONON ein Probensatz zugestellt, der 5 i.O. – Teile enthielt, die eine abweichende Geometrie aufwiesen, gegenüber denen des 1. Probensatzes, sowie 9 n.i.O. – Teile die jeweils eine noch andere Geometrie aufwiesen.

Abb. 6 Zweiter Probensatz. Bestehend aus: 5 i.O. Teilen (oben) und 9 n.i.O. Teilen verschiedener Geometrien (unten)



1.3.3 Probensatz 3

Auf Anfrage stellte METAPLAS IONON einen umfangreicheren Probensatz aus Teilen derselben Geometrie wie die i.O. – Teile des 1. Probensatzes zur Verfügung. Dieser umfasste 80 i.O. – Teile und 28 n.i.O. – Teile.

1.3.4 Probensatz 4

Zu Referenzzwecken wurden noch Teile angefordert, die den IONIT – OX – Prozess noch nicht durchlaufen hatten und dieselbe Geometrie aufweisen sollten, wie die i.O. – Teile des 1. Probensatzes. Es wurden zwei Teile dieses Zustands zur Prüfung herangezogen.

1.3.5 Probensatz 5

Die METAPLAS IONON stellte noch einen Satz Laborbehandelter Teile zur Verfügung. Diese wiesen eine abgestufte Behandlungszeit im Nitrierprozess auf. Der Satz umfasste je zwei Teile, die einmal unbehandelt waren, sowie jeweils einmal 15 min, 30 min, 60 min und 90 min nitriert.

2 Zielsetzung

Diese Arbeit soll die Möglichkeiten einer mikromagnetischen Detektion ungewollter Nitrierung an den Gewinden von Kugelpapfen erörtern. Das Problem tritt in der Fertigung von Kugelpapfen unregelmäßig auf, so dass der Hersteller eine zerstörungsfreie 100 %-Prüfung wünscht um betroffene Teile auszusortieren.

Da das bisher angebotene mikromagnetische Prüfgerät „3MA II“ des Fraunhofer IZFP aufgrund der Anschaffungskosten nicht konkurrenzfähig wäre, soll eine miniaturisierte Version zur Einsatzreife gebracht werden. Um den Preis zu reduzieren, wurde dabei auf zwei Analyseverfahren verzichtet. Das betreffende Gerät verfügt über eine Sensorik zur Messung des magnetischen Barkhausenrauschens und zur Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke (im Folgenden „Oberwellenanalyse“ genannt).

Um die Einsatzfähigkeit des Systems für das vorliegende Prüfproblem zu zeigen, sollten folgende Schritte unternommen werden:

1. Vorversuche zur Festlegung bestmöglicher Geräteeinstellungen
2. Versuche zur elektromagnetischen Charakterisierung der Werkstoffzustände
3. Anpassung des Sensors
4. Erstellen einer Kalibrierung für die vorliegende Aufgabenstellung

3 Grundlagen

3.1 Magnetische Hysterese

Als magnetische Hysterese (Abb. 7) bezeichnet man das nichtlineare und nicht reversible Verhalten der Magnetisierung eines Bauteils. In der Abbildung ist blau die so genannte Neukurve⁴ dargestellt. Der davon abweichende Verlauf der grün dargestellten Hysteresekurve zeigt, dass dabei irreversible Prozesse ablaufen.

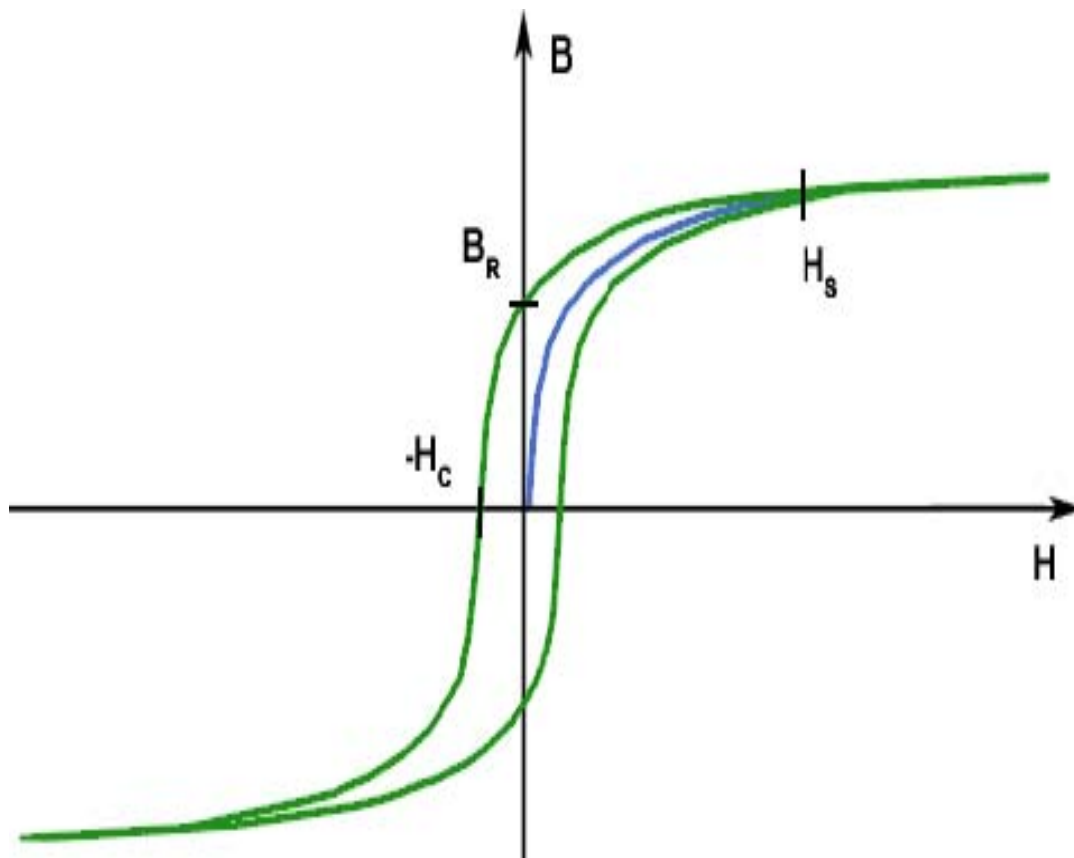


Abb. 7 Schematische Hysteresekurve eines ferromagnetischen Werkstoffes

Es wachsen dabei diejenigen Domänen [Kne1962], die zum äußeren Feld eine günstige Orientierung aufweisen ($\alpha \sim 0^\circ$ siehe Abb. 8) durch Blochwandverschiebung auf Kosten der Domänen, die ungünstiger ($\alpha \neq 0^\circ$) orientiert sind. Nachdem alle ungünstig orientierten Domänen verdrängt sind, kann eine weitere Magnetisierung nicht mehr durch Blochwandverschiebung stattfinden sondern nur noch indem die Ausrichtung der günstig orientierten Domänen von $\alpha \sim 0^\circ$ nach $\alpha = 0^\circ$ gedreht wird. Da für diese Drehpro-

⁴ Als Neukurve bezeichnet man den Kurvenverlauf eines zuvor nicht magnetisierten Bauteils bei der ersten Magnetisierung bis zur Sättigung.

zesse mehr Energie erforderlich ist als für die Verschiebeprozesse finden sie erst bei höheren Feldstärken statt.

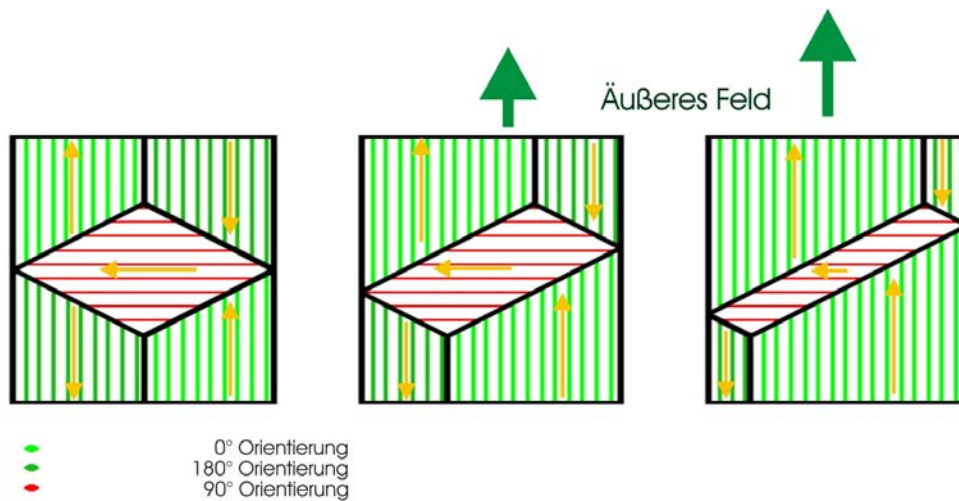


Abb. 8 Schema der Blochwandverschiebung: Vor der ersten Magnetisierung sind die Domänen statistisch orientiert (links). Wird ein äußeres Feld angelegt, dehnen sich die günstig orientierten Domänen aus (mitte). Diese Ausdehnung nimmt mit steigender Feldstärke zu (rechts).

Wie die Hystereseurve im Detail aussieht ist sehr stark vom Werkstoff und den Werkstoffzuständen eines Bauteils abhängig. Daher kann man durch Messung der Hystereseurve indirekt zahlreiche Werkstoffkennwerte ermitteln.

Zur Aufnahme der Hystereseurve ist jedoch eine umfassende Spule notwendig. Das ist in der Praxis für die zerstörungsfreie Prüfung, insbesondere komplexer Bauteilgeometrien, schwer umsetzbar. Daher ist die Messung der Hysterese außerhalb von Laboreinrichtungen kein geeignetes Prüfverfahren.

Sekundäre Effekte, die bei der Ummagnetisierung entstehen und ähnliche Aussagekraft besitzen, lassen sich hingegen teilweise auch mit aufsitzenden Sensoren aufnehmen und so durchaus zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung heranziehen. Beispiele hierfür sind die Messung des magnetischen Barkhausenrauschens (siehe 3.2), der Überlagerungspermeabilität sowie die Analyse der Oberwellen im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke (siehe 3.3).

3.2 Magnetisches Barkhausenrauschen

Erstmals wurde das magnetische Barkhausenrauschen 1917 von seinem Namensgeber Heinrich Barkhausen beschrieben. Es handelt sich hierbei um ein Phänomen, das durch die diskontinuierliche Bewegung der Blochwände in Ferromagnetika entsteht, wie es in Abb. 9 dargestellt ist.

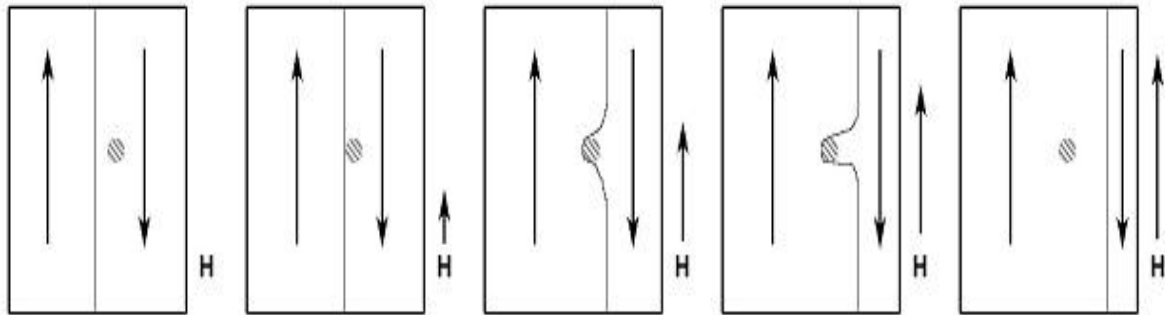


Abb. 9 Ablauf eines Barkhausensprungs über eine Störstelle (schraffiert)

Wird ein ferromagnetischer Werkstoff einem äußeren Feld ausgesetzt, so dehnen sich die zum äußeren Feld günstig orientierten Domänen durch Verschiebung der Blochwände aus. Störstellen im Werkstoff (z.B. Gitterdefekte, Ausscheidungen,...) behindern diese Verschiebung allerdings, so dass zu ihrer Überwindung das äußere Feld (H) immer wieder ansteigen muss. Erreicht die Feldstärke einen Grenzwert, dann springt die Blochwand über die Störstelle hinweg, und die Magnetisierung des Werkstoffs nimmt plötzlich zu.

Dieser sprunghafte Verlauf führt dazu, dass die Hysteresekurve der Magnetisierung über der Feldstärke bei mikroskopischer Betrachtung nicht glatt ist, sondern einen Rauschcharakter besitzt (Abb. 10).

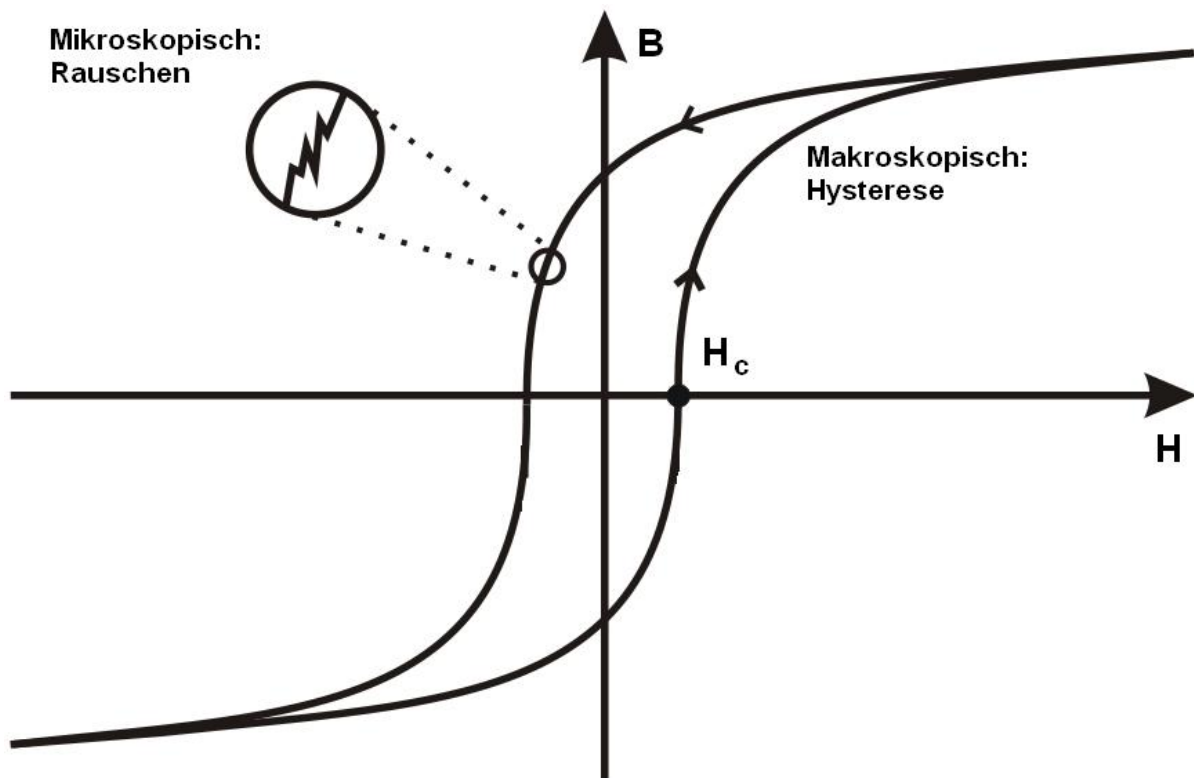


Abb. 10 Hysteresekurve mit Ausschnittvergrößerung zur Darstellung des Rauschsignals

Dieser Rauschcharakter ist im Bereich der Koerzitivfeldstärke (größte Steigung der Hysteresekurve) besonders ausgeprägt [Kne1962].

Das magnetische Barkhausenrauschen ist außer mit einer umfassenden Spule auch mittels einer Luftspule messbar, die, mit ihrer Achse senkrecht zur Prüffläche, von außen aufgesetzt werden kann. Unter Anwendung der Aufsetztechnik kann dieses Verfahren leicht zur Gestaltung eines Prüfsensors herangezogen werden, der die Signale des Streufeldes der Blochwandverschiebung aufnimmt. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muss das Rohsignal jedoch gefiltert werden. Da das Barkhausenrauschen sehr breitbandige Frequenzanteile besitzt, ist diese Filterung immer aufgabenbezogen zu wählen. Die Barkhausenrauschenanalyse kann zahlreiche Kennwerte liefern, von denen das 3MA-System folgende aufnimmt:

M_r	Amplitude der Barkhausenrauschkurve am Ort $H(t) = 0$
M_{mean}	Von der Barkhausenrauschkurve eingeschlossenen Fläche
M_{max}	Amplitude der Barkhausenrauschkurve am Ort des Maximums
H_{cm}	Feldstärke H_t am Ort des Maximums der Barkhausenrauschkurve
ΔH_{25}	Kurvenaufweitung der Barkhausenrauschkurve bei 25% der Höhe des Maximums
ΔH_{50}	Kurvenaufweitung der Barkhausenrauschkurve bei 50% der Höhe des Maximums
ΔH_{75}	Kurvenaufweitung der Barkhausenrauschkurve bei 75% der Höhe des Maximums

Tabelle 1: Vom 3MA-System standardmäßig aufgenommene Werte des Barkhausenrauschens

In Abb. 11 ist eine Barkhausenrauschkurve schematisch dargestellt. Sie wird erzeugt, indem die von der Luftspule aufgenommenen Signale verstärkt, gefiltert, gleichgerichtet und geglättet werden.

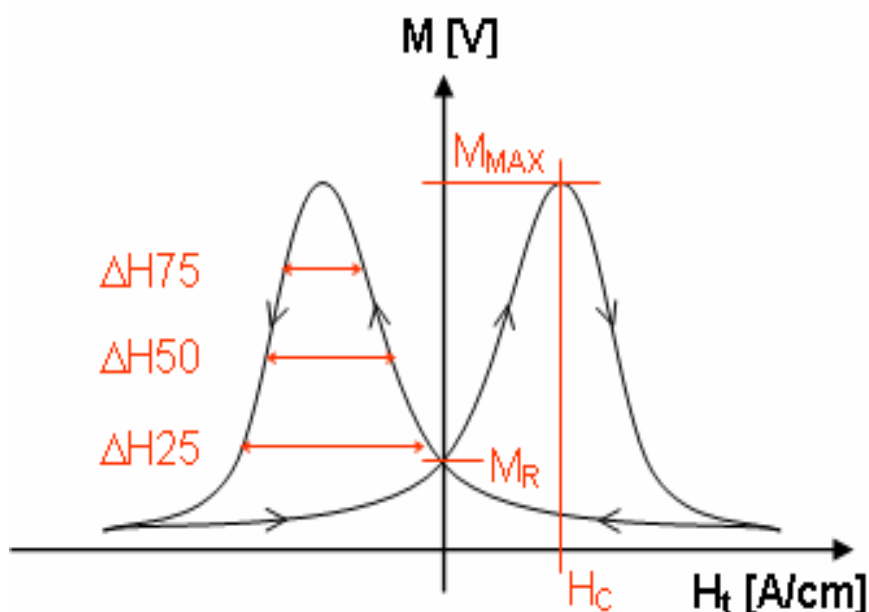


Abb. 11 Schematische Barkhausenrauschkurve mit den Kennwerten. Es fehlt nur der Wert M_{mean} , der eine statistische Größe darstellt.

Aus dieser Kurve werden die in Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte wie eingezeichnet abgeleitet. M_{mean} ist dabei der Mittelwert der Barkhausenrauschamplitude über eine Periode hinweg.

Veränderungen des Werkstoffzustandes (auch zeitliche Veränderungen) lassen sich mit diesem Verfahren gut detektieren, da sie zu veränderten Spannungszuständen im Material führen, die mit den Blochwänden interagieren und so simultan zu einem veränderten Bild der Barkhausenrauschkurve und somit zu anderen Kennwerten führen. Daher ließe sich dieses System auch zur Online-Überwachung von Anlagen und Bauteilen während des Betriebs einsetzen.

3.3 Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke

Wird ein ferromagnetischer Werkstoff in einem zeitlich veränderlichen äußeren Feld mit sinusförmige Erregerspannung magnetisiert, so zeigt das erregte Feld zwar die selbe Periode aber über der Zeit keinen analogen (sinusförmigen) Verlauf und meist eine Phasenverschiebung (Abb. 12).

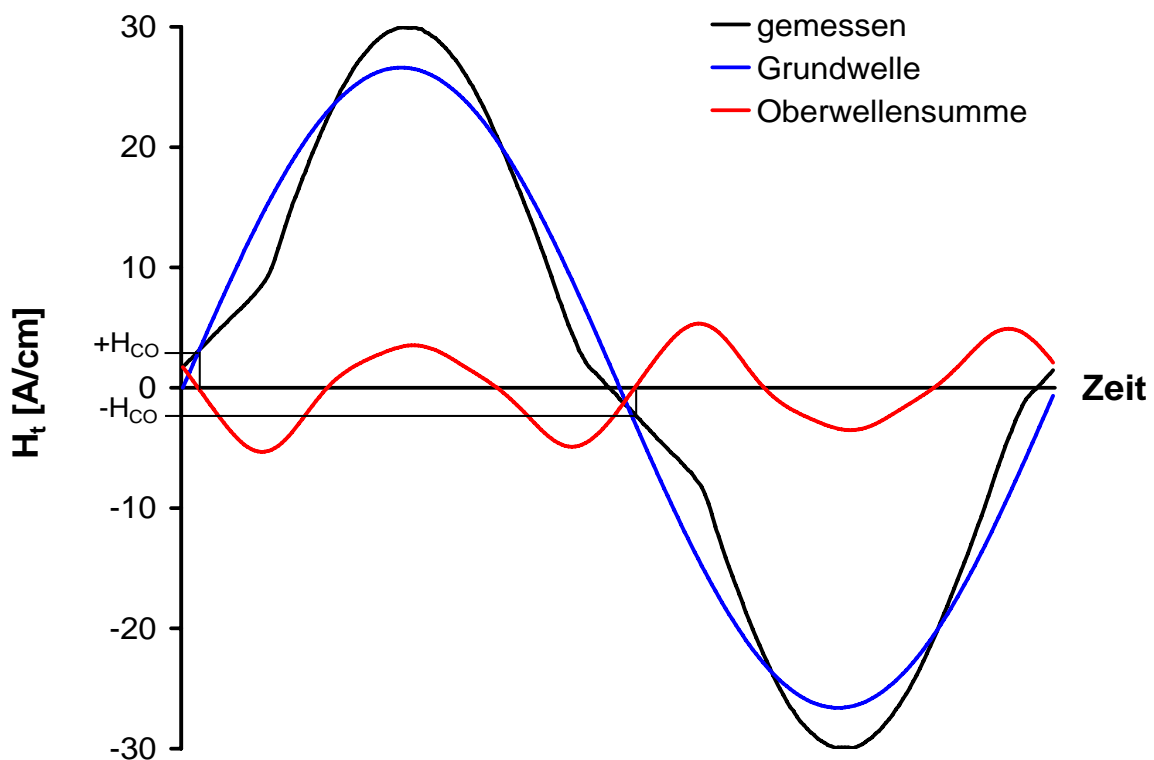


Abb. 12 Schematische Darstellung des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke und seiner Oberwellen. Das rote Signal wird zur Verarbeitung noch in die einzelnen Oberwellenanteile zerlegt

Die Abweichungen resultieren aus Oberwellenanteile, die durch den nichtlinearen magnetischen Widerstand des ferromagnetischen Werkstoffs und dessen Hysterese verursacht werden. Das gemessene Signal lässt sich durch eine Fourierreihe beschreiben, in der die Koeffizienten der geradzahlig indizierten Summanden aufgrund der Symmetrie der Hysterese null werden und nur ungeradzahlige Vielfache der Erregerfrequenz auftreten. Im Weiteren wird daher der Begriff harmonische Vielfache synonym für ungeradzahlige harmonische Vielfache gebraucht [Pit1990].

Um aussagekräftige Daten zu erhalten trennt man zuerst die Grundwelle vom Messsignal ab. Das erhaltene Gesamtsignal aller Oberwellen bietet bereits einige Informationen (z.B. UHS siehe Tabelle 2), um aber die Möglichkeiten des Verfahrens wirklich auszuschöpfen, muss das Gesamtsignal in seine Bestandteile zerlegt werden.

Dies geschieht mittels einer Fouriertransformation in die Frequenzebene. Man erhält so für jede harmonische Oberwelle einen Koeffizienten, der sich aus dem Betrag der Amplitude ($|A_n|$) und der Phasenverschiebung (ϕ_n) zusammensetzt. Die Indizes stehen hierbei jeweils für die harmonischen Vielfachen der Erregerfrequenz.

Die Signale für die Oberwellenanalyse werden mit einer Hall-Sonde aufgenommen, die, wie eine Luftspule zur Messung des Barkhausenrauschens, auf die Prüffläche aufgesetzt werden kann. Für die zerstörungsfreie Prüfung werden nur die harmonischen Vielfachen 3, 5 und 7 herangezogen, da bei den höheren die Amplitude als vernachlässigbar gering angenommen werden kann [Lau1994]. Folgende Kennwerte werden vom 3MA-System daraus ermittelt:

H_{co}	Koerzitivfeldstärke aus der Oberwellenanalyse
H_{ro}	Oberwellenanteil im Remanenzdurchlauf
K	Klirrfaktor $K = \sqrt{\frac{A_3^2 + A_5^2 + A_7^2}{A_1^2}}$
A_3	Amplitude der dritten Oberwelle
A_5	Amplitude der fünften Oberwelle
A_7	Amplitude der siebten Oberwelle
P_3	Phasenverschiebung der dritten Oberwelle
P_5	Phasenverschiebung der fünften Oberwelle
P_7	Phasenverschiebung der siebten Oberwelle
UHS	Upper Harmonic Sum = Summe aller Oberwellenamplituden

Tabelle 2 Vom 3MA-System standardmäßig aufgenommene Werte der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke

Erfahrungsgemäß liefert dieses Verfahren sehr gut reproduzierbare Werte und ist daher besonders zur Verwechslungs- und Fehlerprüfung geeignet.

3.4 3MA Verfahren

3.4.1 Hardware des 3MA-Systems

Um eine spezielle Werkstoffeigenschaft zu bewerten benötigt man mindestens eine Prüfgröße, die eine definierte Abhängigkeit zur betreffenden Werkstoffeigenschaft aufweisen muss. Unter Umständen müssen aber auch noch andere störende Einflussgrößen eliminiert werden. Um dies zu erreichen benötigt man umso mehr Prüfgrößen, je mehr Störgrößen vorhanden sind.

An diesem Punkt setzt das 3MA-System (

Abb. 13) an, das im Vergleich zu den zusammengefassten Einzelverfahren eine Vielzahl an Prüfgrößen ermittelt (nach derzeitigem Stand maximal 41).



**Abb. 13 links: aktuelles 3MA-Gerät in 19" Gehäuse mit Laptop zur Auswertung
rechts: Standardsensor des 3MA-Geräts mit beweglichem Sensorelement und überstehenden Polschuhen**

Um die maximale Anzahl an Prüfgrößen zu erreichen, sind folgende Verfahren nötig:

- Mehrfrequenzwirbelstrom
- Überlagerungspermeabilität
- Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke
- Magnetisches Barkhausenrauschen

Das derzeitige Standardgerät (3MA II) ist grundsätzlich in der Lage alle Verfahren anzuwenden und dabei in einem Frequenzbereich von 10 Hz bis 1000 Hz mit einer Amplitude von 1 A/cm bis 100 A/cm zu magnetisieren. Für die Prüfung mit Mehrfrequenzwirbelstrom stehen zwei Systeme zur Auswahl:

1. NF – Sensor mit einer Bandbreite von ca. 5 kHz bis 50 kHz
2. HF – Sensor mit einer Bandbreite von 50 kHz bis 10 MHz

Dabei können bis zu vier Frequenzen analysiert werden.

Die Barkhausenrauschenanalyse kann im Frequenzbereich von 5kHz bis 10MHz erfolgen.

3.4.2 Software des 3MA-Systems

Zur Nutzung des 3MA-Systems ist eine Steuersoftware (MMS: **M**odulares **M**ess-**S**ystem) erforderlich, die dank eines modularen Aufbaus sehr variabel an die jeweiligen Prüfsituationen angepasst werden kann. Eine typische Messsituation mit verschiedenen Modulen ist exemplarisch in Abb. 14 als Screenshot abgebildet.

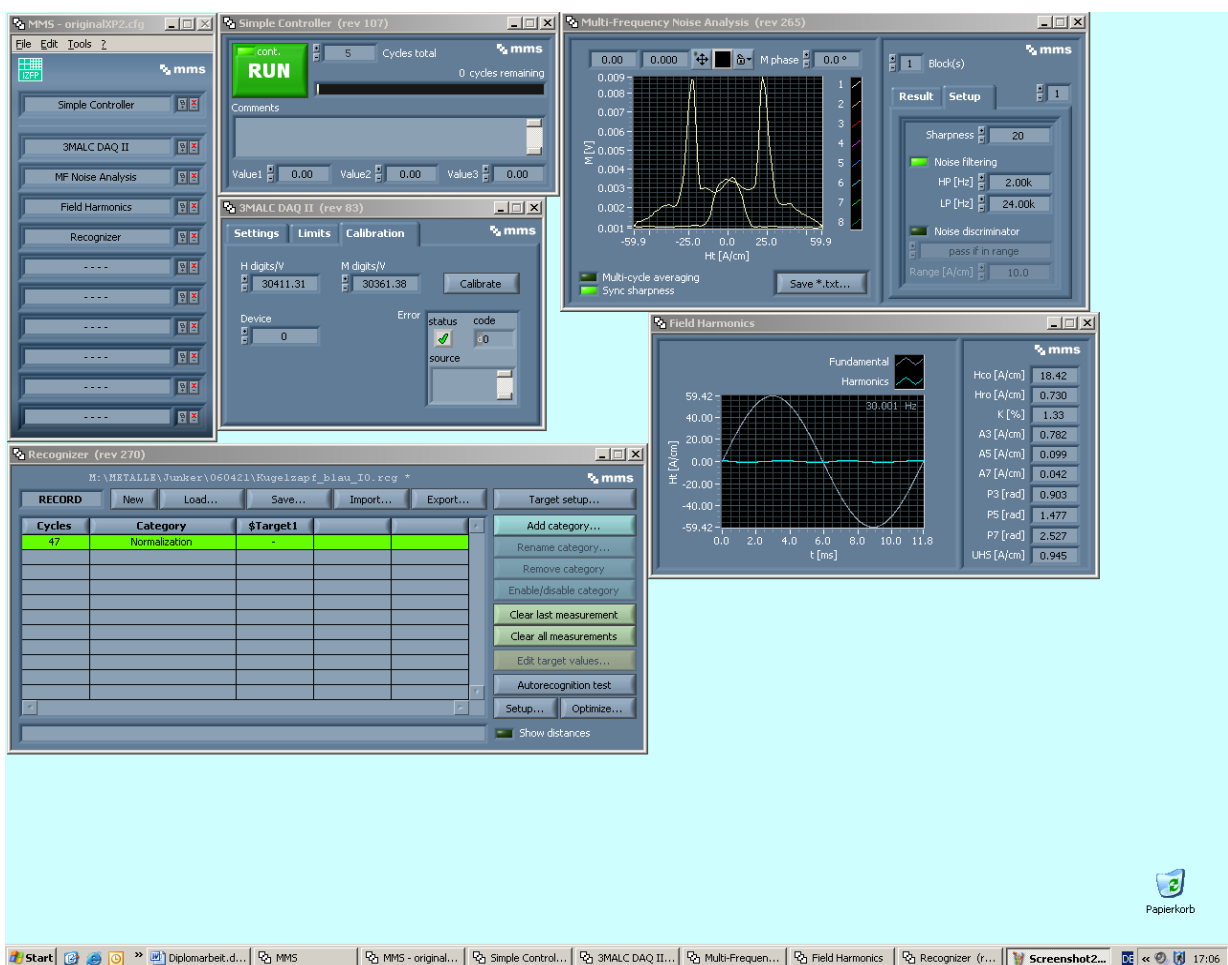


Abb. 14 Einige Module des MMS. Links oben ist die Master Control Unit. Darin können bis zu 11 andere Module eingefügt werden. Zu oberst muss immer ein Steuermodul (Cycle controller) eingefügt werden (hier Simple Controller mit grünem „RUN“ Button). Danach können wahlweise Datenerfassungs-, Datenauswertungs-, Datenaufzeichnungs- oder Analysemodule eingefügt werden, wobei darauf zu achten ist, dass der Ablauf je Zyklus linear ist.

Die einzelnen Module sind als unabhängige Fenster programmiert. Sie werden vom Hauptmodul (Master Control Unit, oben links) angesteuert, das einen zyklisch linearen

Programmfluss einhält. Ein Modul kann also nur auf die Daten zugreifen, die ein im Programmfluss vorgeschaltetes Modul bereitstellt. Die Zusammenstellung von Modulen in der Master Control Unit folgt grundsätzlich folgendem Aufbau:

1. 1 Modul Zyklensteuerung (z.B. Simple Controller)
2. 1 Modul Datenerfassung (z.B. 3MALC DAQ II)
3. 1 oder mehr Modul(e) Datenauswertung (z.B. MF Noise Analysis)
4. 1 oder mehr Modul(e) zur Datenaufzeichnung (optional; z.B. Recognizer)
5. 1 oder mehr Modul(e) zur Datenanalyse (optional; z.B. Logfile Inspector)
6. 1 oder mehr Modul(e) zur Datenausgabe (optional; z.B. Logfile Writer)

Die Software beinhaltet auch eine Mustererkennung mit integrierter automatischer Optimierung von Gewichtungsfaktoren mittels eines genetischen Algorithmus, als Elemente des Moduls „Recognizer“. Darin ist auch eine Funktion mit der Bezeichnung „Autorecognition – Test“ enthalten, die für jede Probe aus dem Kalibrierprobensatz ermittelt, welcher Zielgrößenwert für diese Probe bestimmt worden wäre, wenn sie nicht zu den Kalibrierproben gehört hätte. Die Entwicklung der grundlegenden Software ist in [Szi2001] ausführlich beschrieben, die des Moduls „Recognizer“ mit der Mustererkennung und Optimierung in [Tsc2004].

3.5 Miniaturisiertes 3MA Prüfgerät

Da jede Implementierung eines neuen Verfahrens das 3MA-System teurer macht, wurde ein System entwickelt, das nur die Verfahren magnetisches Barkhausenrauschen und Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke verwendet. Dieses System konnte sehr kompakt aufgebaut werden (Prototypabmessungen: 114 mm x 65 mm x 35 mm, Abb. 15) und wurde so konzipiert, dass es über eine USB-Schnittstelle mit einem handelsüblichen Windows – PC verbunden und eingesetzt werden konnte. Die Energieversorgung erfolgte über ein handelsübliches externes Netzteil, die Software ist ein Bestandteil von MMS und verfügt somit über dieselben Tools wie beim 3MA II – Gerät. Aufgrund der Hardwareeigenschaften konnte mit diesem Gerät im Gegensatz zum Standardgerät bei der Barkhausenrauschenanalyse nur ein Frequenzbereich von 1 kHz bis 24 kHz abgetastet werden bei einer Magnetisierungsfrequenz von 10 Hz bis 1000 Hz und einer Magnetisierungsamplitude von 1 A/cm bis 200 A/cm.

Die Polschuhe des Elektromagneten und die fest verbaute Sensoreinheit schlossen bündig mit dem Gehäuse ab (Abb. 15).

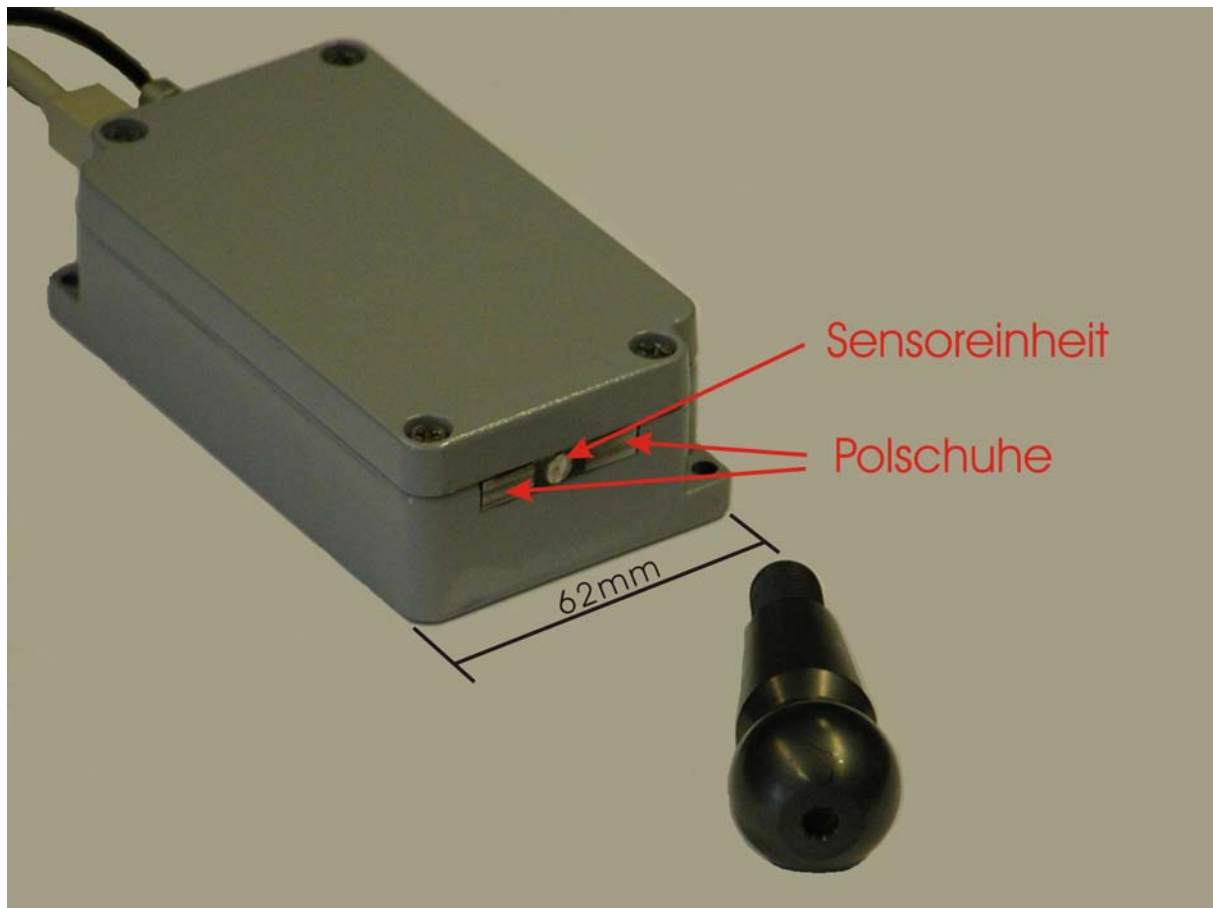


Abb. 15 Miniaturisiertes 3MA-System mit Kugelzapfen. Es ist zu erkennen, dass die Sensoreinheit zu allen Gehäusekanten mehrere Millimeter Abstand hat.

Die überstehenden Gehäusekanten waren bei jeder Ankopplung problematisch, da sie die Positionierung der Teile stark einschränkten. Dieses Problem sollte durch eine Anpassung der Gerätegeometrie behoben werden, bei der eine weitere Verringerung der Abmessungen angestrebt wurde.

3.6 Anpassung der Gerätegeometrie

Wie unter 3.5 erwähnt, waren insbesondere die relativ weit überstehenden Gehäusekanten des miniaturisierten 3MA-Systems hinderlich bezüglich der Ankopplung der Teile. Auch die Tatsache, dass die Ankopplungsrichtung der vorliegenden Teile vorgegeben war (siehe 4.1), schränkte den Versuchsaufbau stark ein. Vor allem aber die Tatsache, dass die Sensoreinheit relativ weit vom zu prüfenden Bereich entfernt war erschien ungünstig.

Die Handhabung der Teile war ebenfalls unvorteilhaft, da die Positionierung der Konuskante sehr sorgfältig erfolgen musste, damit sie wirklich auf dem Polschuh des Elektromagneten auflag (siehe 4.1). Diese Probleme führten zu der Entscheidung, dass ein ge-

ometrisch angepasster Sensor aufgebaut werden sollte, der allgemein mehr Möglichkeiten und bessere Handhabung bieten sollte, auch für eventuelle andere Teilegeometrien. In Anlehnung an einige bestehenden Sensoren des allgemeinen 3MA-Systems wurde eine bewegliche Sensoreinheit ins Auge gefasst. Um bei den vorliegenden Teilen quer zur Achse ankoppeln zu können, mussten die Polschuhe des Elektromagneten über das Gehäuse hinausragen, damit das konvexe Gewinde zwischen sie eintauchen konnte. Durch diese Modifikationen wurden bessere Anwendungseigenschaften erwartet. Das Resultat ist in Abb. 16 abgebildet.

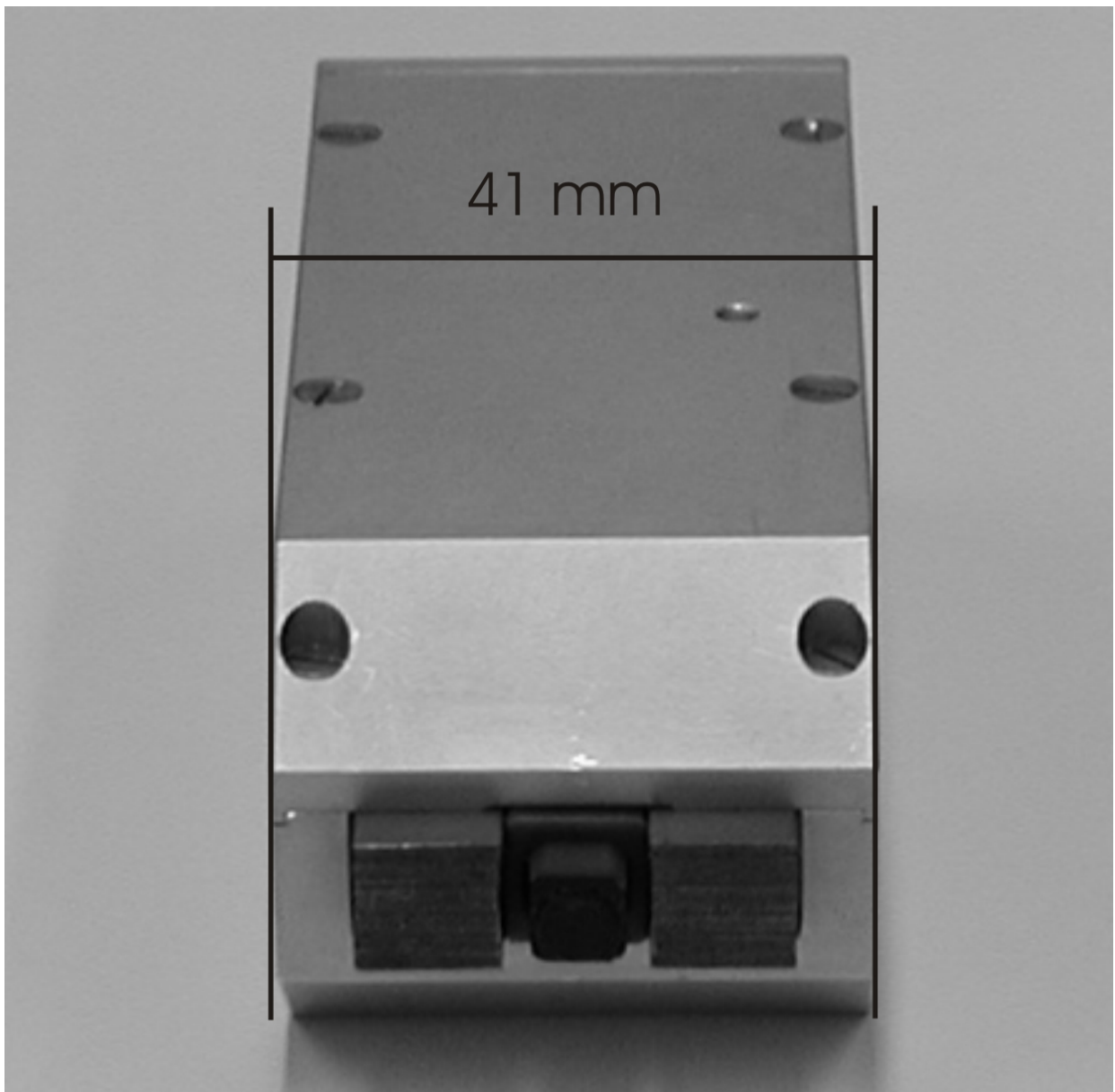


Abb. 16 Geometrisch angepasstes miniaturisiertes 3MA – Gerät. Die Polschuhe ragen über das Gehäuse hinaus. Die Gehäusekanten stellen keine Hindernisse bei der Ankopplung der Teile mehr dar.

Die erzielte Geräteform ähnelt den üblichen Sensoren des 3MA II – Geräts (

Abb. 13). Diese Form ist erfahrungsgemäß sehr universell und kann für eine Vielzahl von Prüfaufgaben eingesetzt werden. So konnte das neu entwickelte Gerät auch in weiteren Untersuchungen noch eingesetzt werden. Die Magnetisierfrequenz und -amplitude sowie die Analysefrequenzen des Barkhausenrauschens waren dieselben wie bei dem geometrisch nicht angepassten Sensor.

Die Abmessungen konnten ebenfalls reduziert werden (106mm x 41mm x 37mm), so dass eine bequemere Handhabung erreicht wurde.

4 Durchgeführte Arbeiten

Unter 3.5 und 3.6 wurde erläutert, dass eine Anpassung des Sensors durchgeführt werden sollte. Daher wurden die Messungen zu Beginn mit dem ersten Prototyp - Sensor durchgeführt, der in einem handelsüblichen Aluminiumdruckguss – Gehäuse verbaut war und daher geometrisch nicht angepasst. Aufgrund seiner Bauform bedingte dieser Sensor starke Einschränkungen bei der Ankopplung der Teile. Später wurden Messungen mit dem neu aufgebauten, geometrisch angepassten Sensor durchgeführt. Dieser war in einem speziell entworfenen Aluminiumgehäuse verbaut und in der Handhabung wesentlich flexibler.

4.1 Messungen ohne angepasste Sensorgeometrie

Der erste Prototyp des miniaturisierten 3MA – Geräts wurde in einem handelsüblichen Aluminiumdruckguss – Gehäuse verbaut. Die Abmessungen waren daher von Vornher ein festgelegt und nicht auf die Prüfsituation abgestimmt.

Die Ankopplung der Teile, die nur längs erfolgen konnte, erfolgte mit diesem Gerät von Hand, wobei eine Probenunterlage aufgebaut wurde, um eine reproduzierbare magnetische Ankopplung der Teile zu erzielen (Abb. 17).



Abb. 17 Miniaturisiertes 3MA-System mit Probe auf Probenunterlage zur Stabilisierung der Probenlage

In Abb. 18 und Abb. 19 ist dargestellt, dass beim Ankoppeln der Teile sehr darauf zu achten war, dass auch das Gewinde Kontakt mit dem Polschuh hatte.

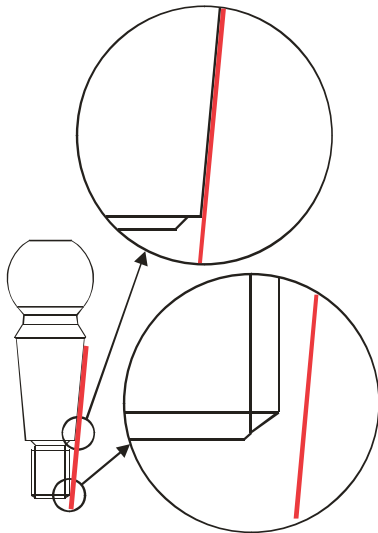


Abb. 18 Wenn der konische Teil der Probe einfach an das Sensorgehäuse (rot angedeutet) angelegt wurde (oberer Ausschnitt), lag das Gewinde nicht an, so dass dort ein beträchtlicher Luftspalt entstand (unterer Ausschnitt)

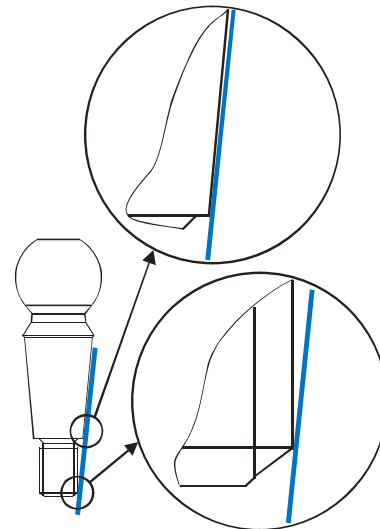


Abb. 19 Damit auch am Gewinde Kontakt bestand (unterer Ausschnitt), musste die Probe leicht gekippt werden, wodurch die Kontaktfläche am Konus jedoch sehr stark eingeschränkt wurde (oberer Ausschnitt)

In

Abb. 20 ist zu sehen, dass die Sensoreinheit, selbst bei sorgfältiger Positionierung der Kante des Konus möglichst nah am Rand der des Polschuhs, nicht in Kontakt mit dem zu prüfenden Bereich befand.

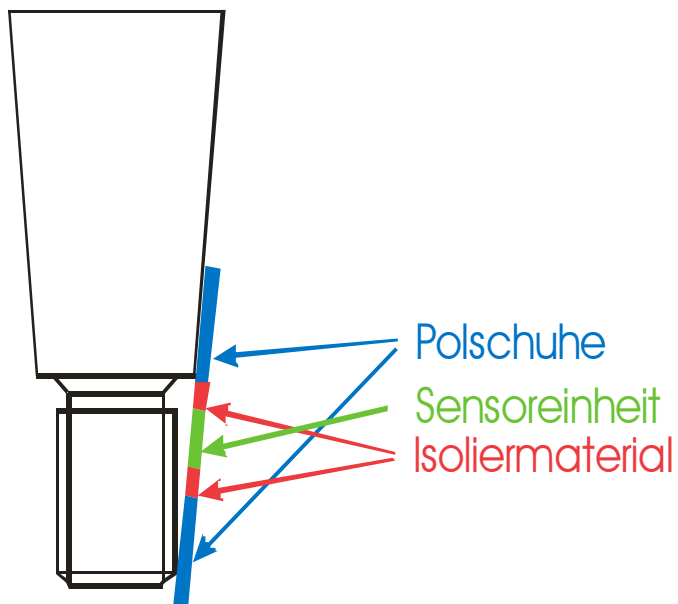


Abb. 20 Die Position der Sensoreinheit über der Probe war bei Aufliegen der Kante des Konus auf dem Polschuh nicht optimal über dem zu prüfenden Bereich.

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten wurde die Probenlage bei diesen Messungen optimiert. Das Kriterium war dabei eine möglichst symmetrische Barkhausenrausch – Profilkurve mit möglichst hohen Maxima. Aufgrund dieser Optimierung mussten alle

Teile zweifach gemessen werden, einmal zur Positionsoptimierung und einmal zur Aufnahme der Werte.

4.1.1 Vorversuche

In diesen Versuchen sollte überprüft werden, ob mit den Verfahren, die in diesem Sensor implementiert waren, überhaupt sinnvolle Messdaten an den betreffenden Teilen zu ermitteln waren. Zu diesem Zweck wurden Proben verschiedener Zustände und Geometrien untersucht.

Es wurde festgestellt, dass schon geringe Veränderungen der Probenposition starke Veränderungen des Messsignals bewirkten. Dies kann auf die Auswirkungen eines unter Umständen entstehenden Luftspalts zurückgeführt werden [Alt2006].

Mit einer Anregung von 30 Hz und 60 A/cm und einer Bandpassfilterung für die Barkhausenrausch – Profilkurven von 2 kHz bis 24 kHz (maximale Bandbreite) wurden die besten Ergebnisse erzielt, so dass diese Einstellungen für dieses Gerät als Standard für diese Prüfaufgabe festgelegt wurden. Die Barkhausenrausch - Profilkurven zu den Teilen des ersten Probensatzes mit dieser Einstellung sind in Abb. 21 dargestellt. Hier waren schon deutliche Unterschiede in der Charakteristik der Kurvenverläufe der unterschiedlichen Zustände zu erkennen.

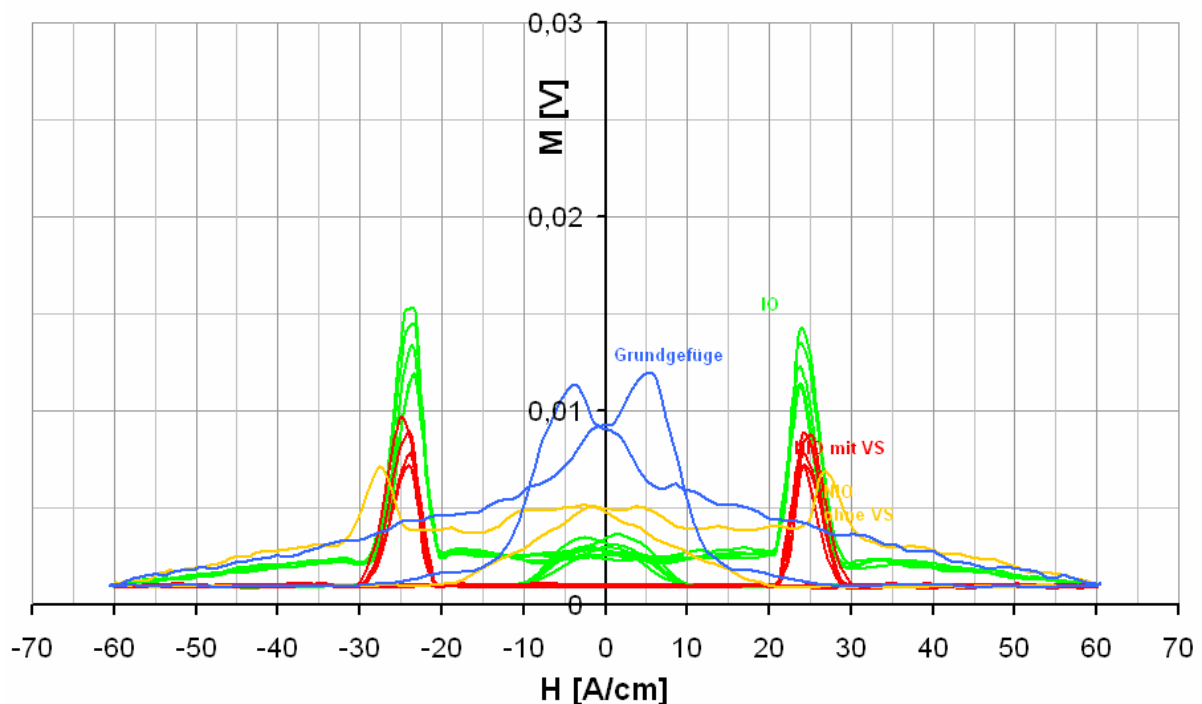


Abb. 21 Barkhausenrauschkurven des ersten Probensatzes. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den Verläufen der einzelnen Zustände zu erkennen.

Die am 2. Probensatz gemessenen Barkhausenrausch – Profilkurven finden sich in Abb. 22 (i.O. Teile) und Abb. 23 (n.i.O. Teile).

Die sehr großen Unterschiede in den Maxima bei den n.i.O. Teilen rührten von Ankopplungsproblemen aufgrund der stark unterschiedlichen Teilegeometrie her.

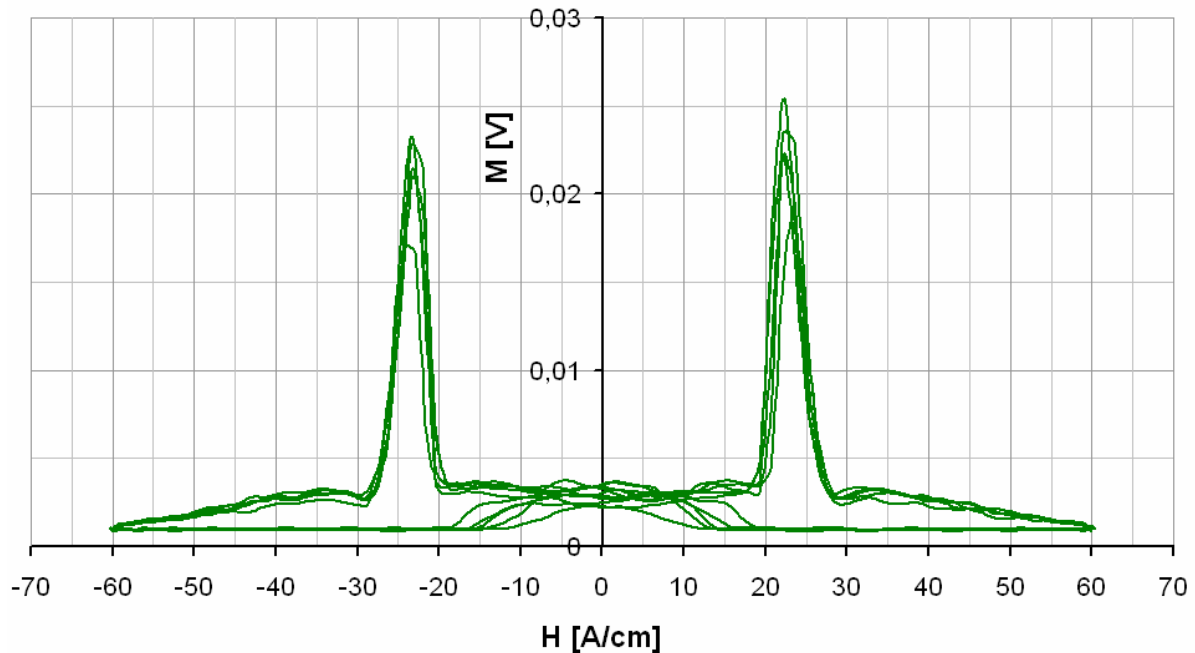


Abb. 22 Barkhausenrauschkurven der i.O. Teile des zweiten Probensatzes. Die Ähnlichkeit mit den entsprechenden Kurven des ersten Probensatzes ist deutlich erkennbar.

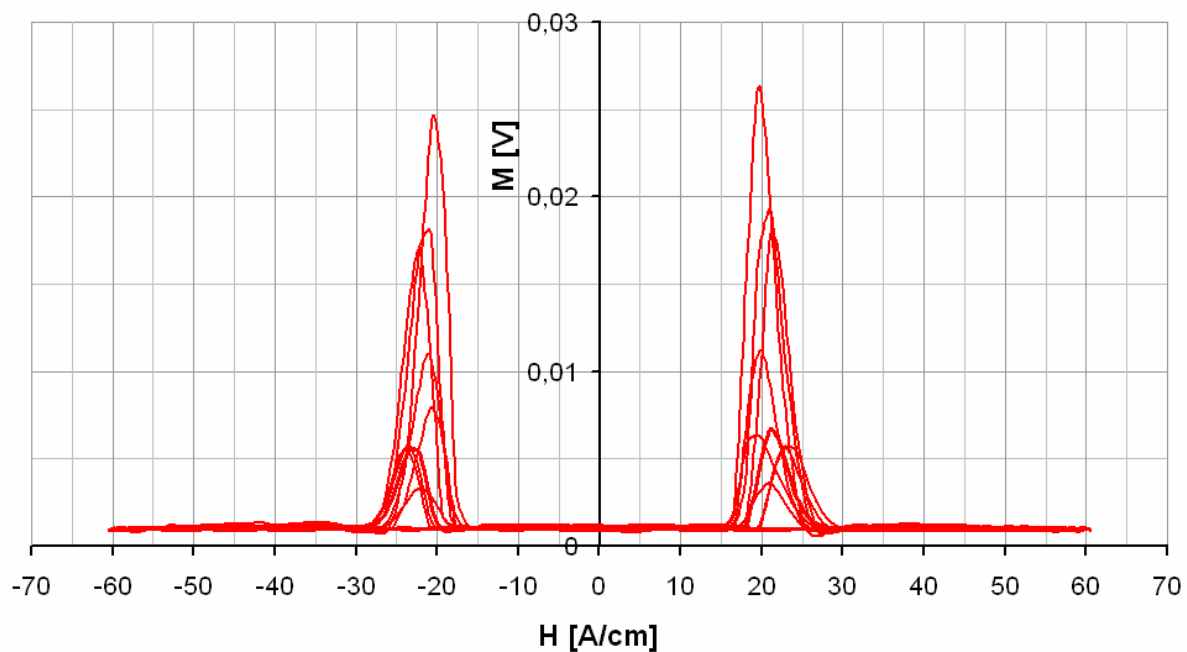


Abb. 23 Barkhausenrauschkurven der n.i.O. Teilen des zweiten Probensatzes. Gewisse Eigenschaften sind auch hier ähnlich denen der Kurven des ersten Probensatzes, vor allem der niedrige Wert für M bei $H=0A/cm$

Die Unterschiede in den Kurvenverläufen der n.i.O. – Teile gegenüber denen der i.O. – Teile, die trotz der starken Variation der Maxima der n.i.O. - Teile des zweiten Satzes erkennbar waren, ließen darauf schließen, dass eine Unterscheidung der Zustände mit dem bestehenden System möglich sein würde. Insbesondere der Unterschied des M-Wertes im Bereich $H = 0 \text{ A/cm}$ zwischen den i.O. Teilen und den n.i.O. Teilen trug zu dieser Überzeugung bei.

Dass bei den n.i.O. Teilen tendenziell ein niedrigeres M_{\max} auftritt als bei den i.O. Teilen stellte zunächst eine Überraschung dar, konnte jedoch dahingehend schlüssig erklärt werden, dass die Verbindungsschicht einen höheren magnetischen Widerstand hat als die Diffusionsschicht, wodurch sie für den magnetischen Fluss und die daraus resultierende Magnetisierung ein Hindernis darstellt, so dass dieser größtenteils durch die Magnetitschicht verläuft und der Grundwerkstoff daher eine geringere Anregung erfährt. Weiterhin erfährt das Rauschsignal bei der erneuten Durchdringung der Verbindungsschicht nochmals eine Reduktion der Amplitude, wovon insbesondere hochfrequente Signale betroffen sind, die erfahrungsgemäß den Hauptteil des statistischen Rauschsignals ausmachen.

Unter dieser Annahme wurde erwartet, dass auch M_{\max} eine Unterscheidung der Zustände ermöglichen würde.

4.1.2 Versuche mit nicht angepasstem Sensor

Am 3. Probensatz konnten aufgrund der größeren Anzahl sowohl an i.O. Teilen als auch an n.i.O. Teilen Messungen vorgenommen werden, die eine hinreichende statistische Absicherung ermöglichten um eine klare Aussage über die Anwendbarkeit des miniaturisierten 3MA – Geräts machen zu können.

Mit den festgelegten Einstellungen konnten aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden, die gut mit denen korrelierten, die während der Vorversuche an Teilen mit derselben Geometrie erzielt wurden.

Da die Barkhausenrausch – Profilkurven sich, anders als die Ergebnisse der Oberwellenanalyse, schon rein optisch vergleichen lassen, ohne dass die Kennwerte ermittelt wurden, wurden sie in Abb. 24 zum Vergleich dargestellt.

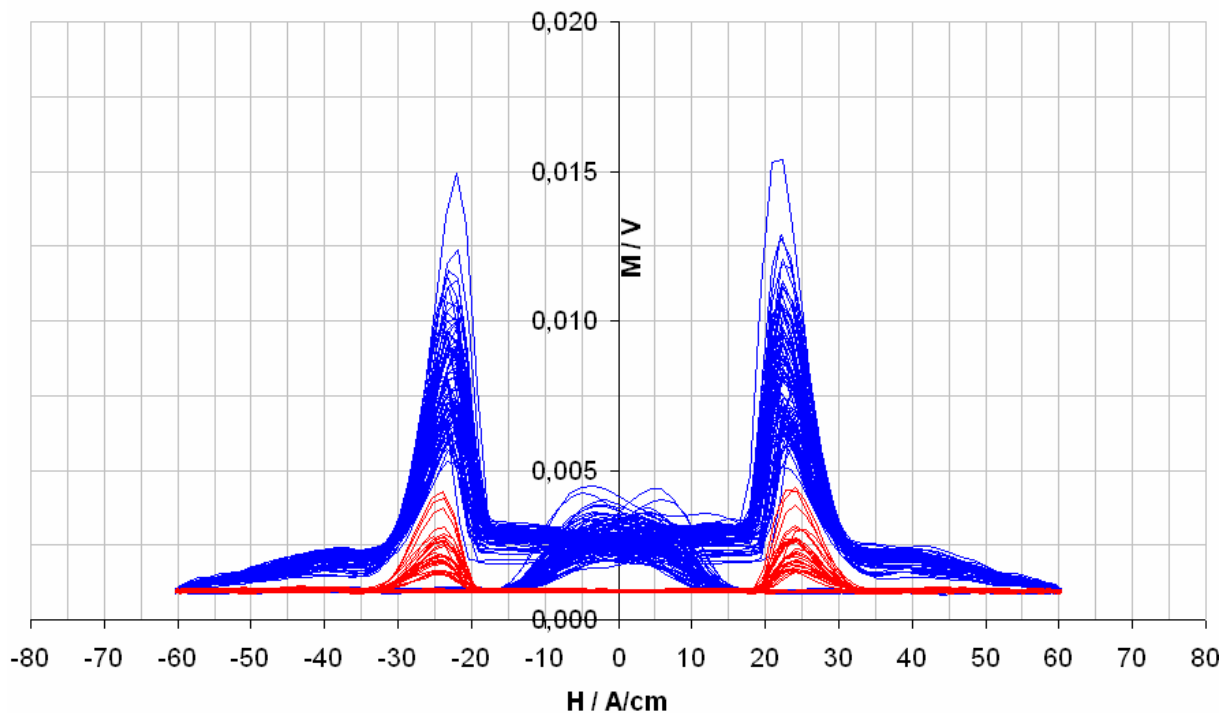


Abb. 24 Ergebnisse der Messungen mit dem nicht angepasstem Sensor mit einem Bandpassfilter von 2kHz bis 24kHz. Blau sind die Ergebnisse der i.O. - Teile, rot die der n.i.O. - Teile. Es fallen die deutlichen Unterschiede in der Amplitude der Maxima und der Amplitude bei Feldstärke $H=0A/cm$ auf.

Schon anhand der klaren Trennung der Kurven unterschiedlicher Zustände in dieser Darstellung war absehbar, dass eine deutliche Unterscheidung der i.O. - und n.i.O. Teile möglich sein würde. Die Grafik zeigt für die vorliegenden Teile sogar die Möglichkeit, mit einem einfachen Grenzwert (z.B. $M_{max} = 0,005 V$) die Zustände zu unterscheiden (alle n.i.O. - Teile liegen darunter, alle i.O. - Teile darüber).

Für die Einordnung eines unbekanntes Teils wäre die Trennung mit einem Grenzwert allerdings riskant gewesen, da innerhalb der einzelnen Zustände eine beträchtliche Streuung auftrat und es daher nicht ausgeschlossen werden konnte, dass ein beliebiges Teil mit diesem Kriterium nicht hätte kategorisiert werden können. In Abb. 25 und Abb. 26 sind die Kennwerte der Kurven der einzelnen Teile dargestellt.

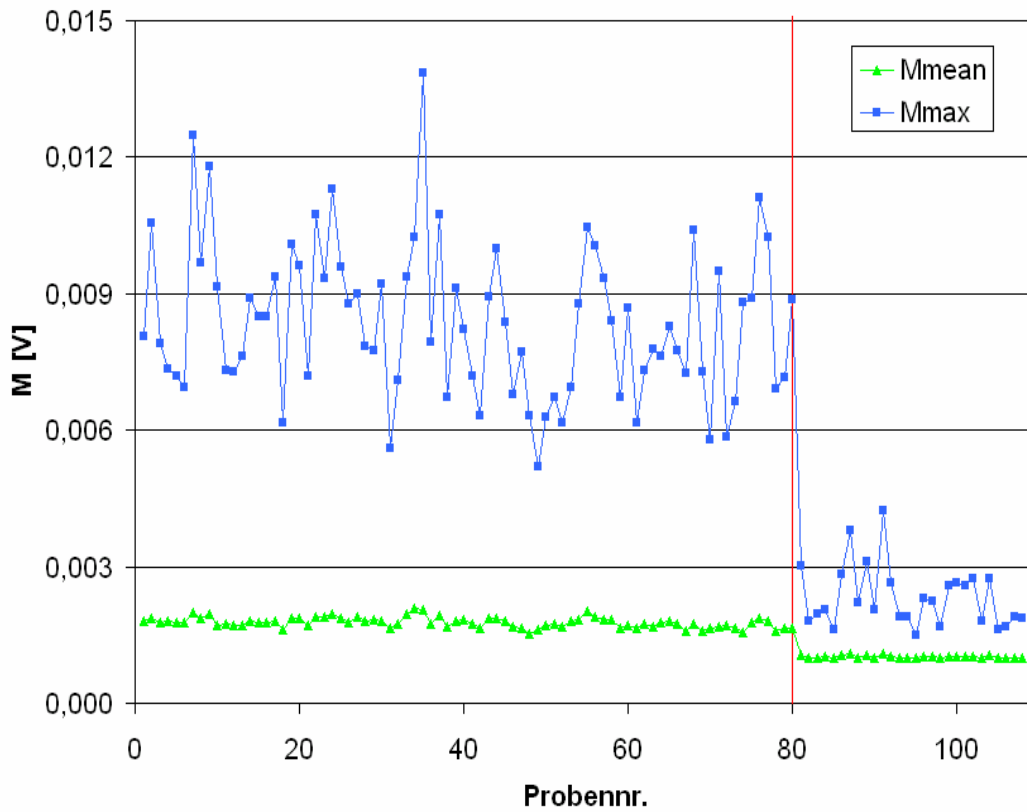


Abb. 25 M_{\max} und M_{mean} der Teile. Rechts der roten Linie sind die n.i.O. - Teile dargestellt.

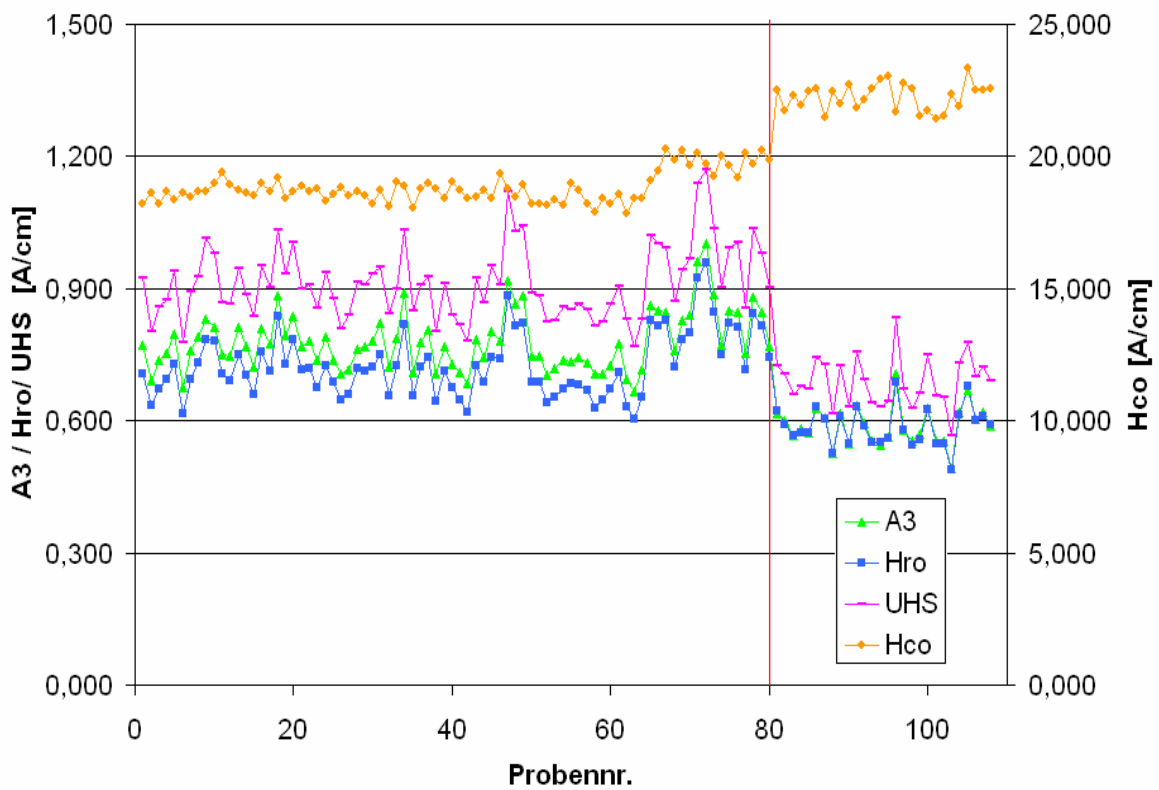


Abb. 26 A_3 , H_{ro} , UHS und H_{co} der Teile. Rechts der roten Linie sind die n.i.O. - Teile dargestellt.

Um eine sichere Identifizierung der Teile zu gewährleisten wurden die Ergebnisse mit der Mustererkennung des MMS weiter analysiert und optimiert. Die Mustererkennung führt eine Ähnlichkeitsbetrachtung auf Basis der Prüfgrößen des Barkhausenrauschens und der Oberwellenanalyse durch und kann anhand der Ähnlichkeiten einen approximierten Zielgrößenwert berechnen.

In Abb. 27 sind die von der Mustererkennung durch den Autorecognition – Test berechneten Werte des Teilezustands in Abhängigkeit von den tatsächlichen Zuständen (0 für n.i.O. und 1 für i.O.) gezeigt, bevor mit der automatischen Optimierung versucht wurde, die Ergebnisse zu verbessern.

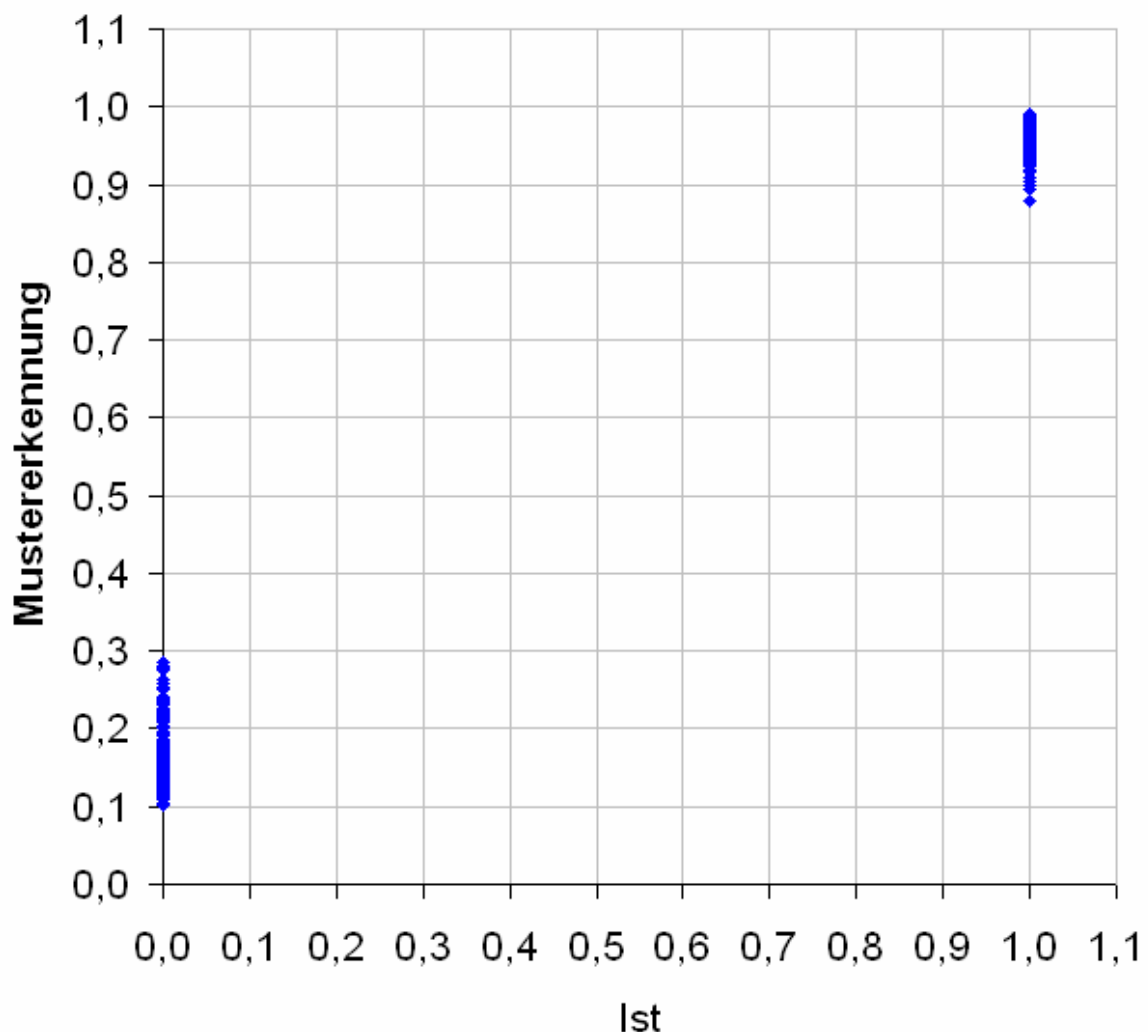


Abb. 27 Verteilung der berechneten Zustände gegen die tatsächlichen aufgetragen (ohne Optimierung) 0 steht für n.i.O., 1 für i.O.

Darin war eine beträchtliche Streuung der erwarteten Werte zu sehen, die durch die Optimierung eliminiert werden konnte (Abb. 28), so dass die Werte exakt aufeinander fielen.

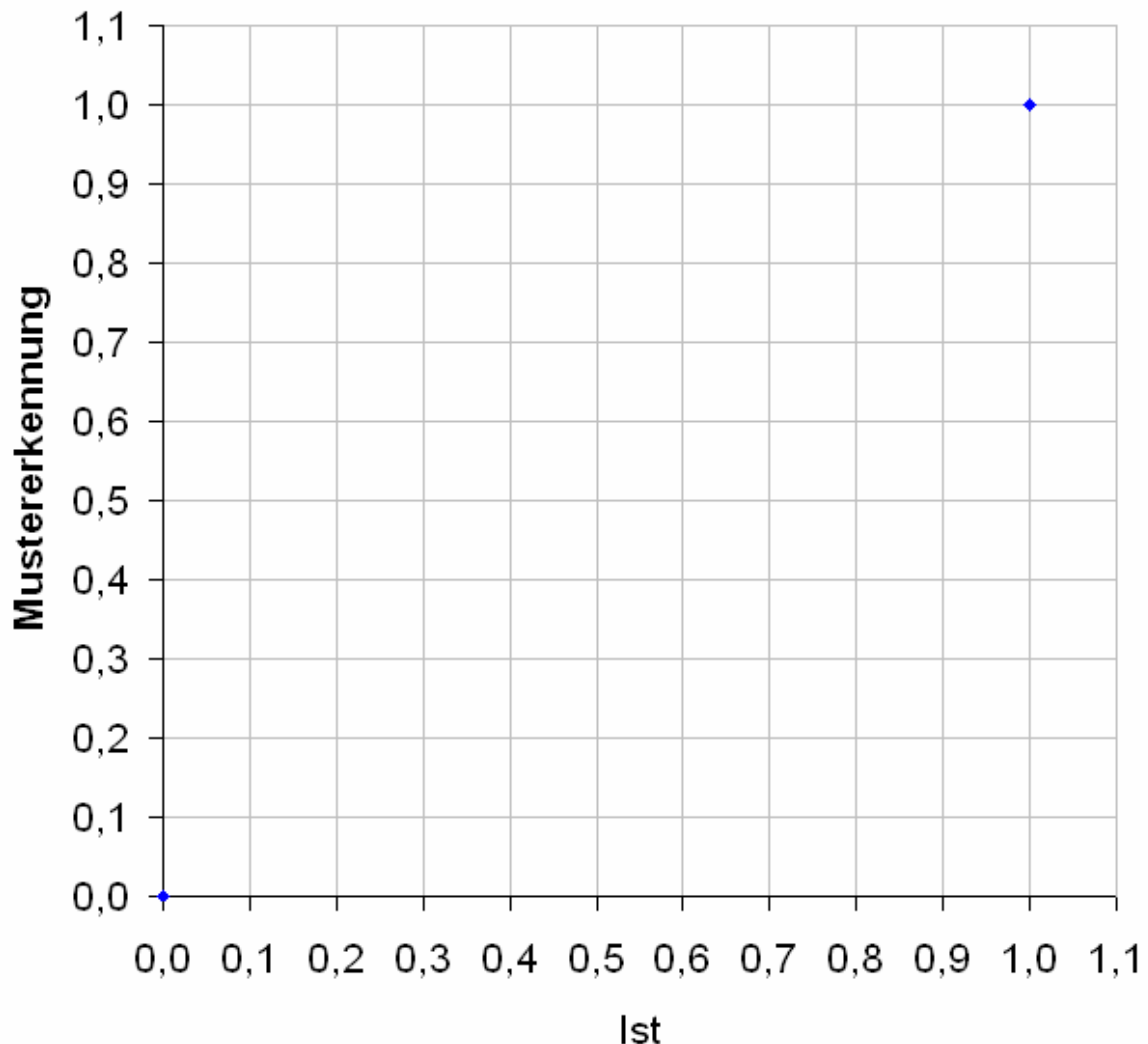


Abb. 28 Nach der Optimierung ist keine Verteilung mehr zu erkennen. Die Gewichtung hat eine 100%ige Erkennbarkeit bewirkt.

In diesem Fall konnte die Optimierung den Fehler (RMSE **R**oot **M**ean **S**quare **E**rror) tatsächlich von RMSE = 9,24 % auf RMSE = 0 % reduzieren. Mit dieser Optimierung könnte die Mustererkennung die Teile der einzelnen Zustände eindeutig trennen.

Die Optimierung führte Gewichtungsfaktoren g_i mit $0 < g_i \leq 1$ für jeden einzelnen Messwert ein [Tsc2004]. In Tabelle 3 wurde wiedergegeben, welche Gewichtungsfaktoren der genetische Algorithmus für die Messwerte lieferte, um den Fehler auf RMSE = 0 % zu reduzieren.

Gewichte des Barkhausenrauschens		Gewichte der Oberwellenanalyse	
Messwert	g_i	Messwert	g_i
M_r	0,662	H_{co}	0,832
M_{mean}	0,925	H_{r0}	1,000
M_{max}	1,000	K	0,326
H_{cm}	0,0879	A_3	1,000
ΔH_{25}	0,158	A_5	0,818
ΔH_{50}	1,000	A_7	0,706
ΔH_{75}	0,273	P_3	0,217
		P_5	0,511
		P_7	1,000
		UHS	0,965

Tabelle 3 Durch automatische Optimierung ermittelte Gewichtungsfaktoren g_i

Damit die Mustererkennung die Ergebnisse einordnen konnte, musste ihr noch vorgegeben werden, in wie weit eine Zielgröße vom Mittelwert der Kalibrierproben des betreffenden Zustands abweichen darf, damit sie noch als zu dem Zustand zugehörig erkannt wurde [Tsc2004]. Für diese Einstellung wurde der Standardwert beibehalten.

4.2 Messungen mit angepasster Sensorgeometrie

Wie unter 3.6 dargelegt, wurde entschieden, einen an die Teilegeometrie angepassten Sensor aufzubauen. Die Ziele waren dabei, dass

- auch eine radiale Ankopplung der Teile ermöglicht werden sollte.
- die Sensoreinheit näher an den Prüfbereich gebracht werden sollte.
- Dem Teil mehr Ankopplungsfläche geboten werden sollte.
- die Baugröße weiter reduziert werden sollte.
- eine angepasste Gehäuseform entworfen werden sollte.

Des Weiteren sollte ein definierter Spalt zwischen den Polschuhen und dem Teil erzeugt werden um den Effekt von Ankopplungsfehlern zu vermindern [Alt2006]. Dieser Spalt wurde in Form einer verschleißfesten Klebefolie mit einer Stärke von 50 μm realisiert.

4.2.1 Gestaltung der Sensoreinheit

Die Sensoreinheit sollte linear verschiebbar gelagert werden, um sich der Teilegeometrie anpassen zu können. Dazu wurde ein zweiteiliges Design entworfen, das einen Sensorkopf und eine Hülse umfasste (Abb. 29). Der Sensorkopf sollte in der Hülse geführt und durch eine unmagnetische Feder nach vorn gedrückt werden. Zylinderkopfschrauben waren zur Begrenzung des Federwegs vorgesehen.

Die Länge des Federwegs wurde so gewählt, dass nach dem Einbau zwischen den Schenkeln des Elektromagneten der Sensorkopf geringfügig über die Polschuhe des Magneten herausragte, aber so weit einfedern konnte, dass auch konvexe Teilegeometrien mit ausreichender Ankopplung an die Polschuhe geprüft werden konnten.

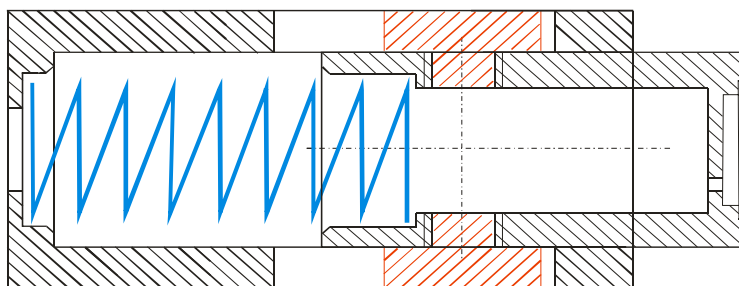


Abb. 29 Schnittdarstellung der Sensorhülse mit verbautem Sensorkopf. Die Feder ist blau eingezeichnet, rot sind die Schrauben dargestellt, die den Federweg des Sensorkopfs begrenzen

4.2.2 Gestaltung des Elektromagneten

Der Elektromagnet sollte in seinen Eigenschaften dem Vorläufer möglichst ähnlich sein, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Daher wurde für die Wicklungen Draht dersel-

ben Abmessung verwendet und auch die Zahl der Windungen identisch vorgesehen. Lediglich die Gestaltung des Kerns wurde abgewandelt um eine Annäherung an das allgemeine 3MA-System („3MA-Sensor 1030“ 10 mm x 10 mm Polschuhe, Gesamtbreite 30 mm) zu erreichen.

Die tatsächlichen Eigenschaften der beiden Elektromagnete sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

	Magnet des Prototyps	Magnet des angepassten Sensors
Betrag der Impedanz Z über der Frequenz		
Phasenwinkel Φ über der Frequenz		

Tabelle 4 Gegenüberstellung der Eigenschaften der Elektromagneten

Die Eigenschaften wichen zwar noch voneinander ab, es wurde aber trotzdem beschlossen, den Magneten so zu verwenden.

Geometrisch sollte der Elektromagnet so angeordnet werden, dass die Polschuhe ca. 3 mm über das Gehäuse herausragen, damit dieses nicht die Federbewegung des Sensorkopfes behindert, der in Ruhestellung ca. 4 mm herausragen sollte.

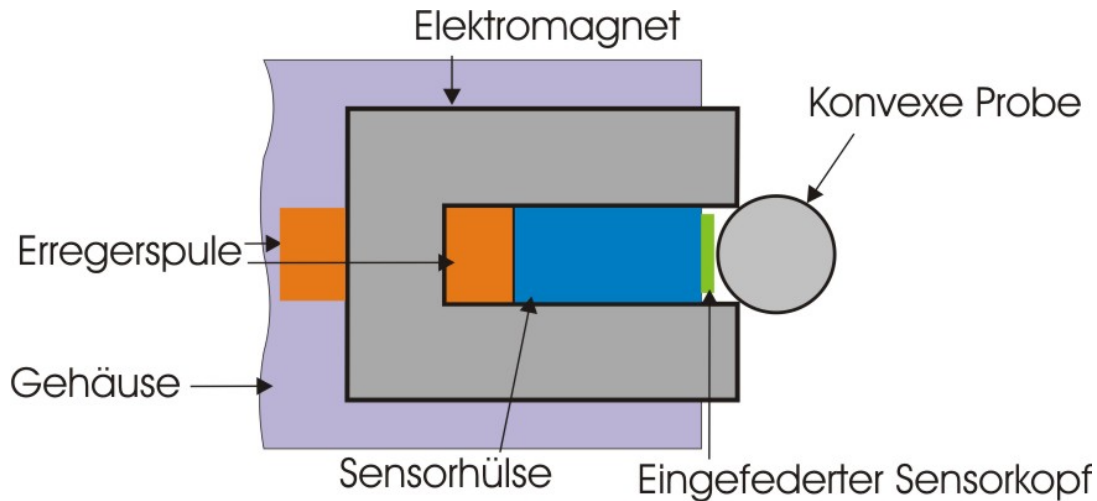


Abb. 30 Prinzipdarstellung des eingefederten Sensorkopfes bei konvexer Probe (nicht maßstäblich)

Außerdem sollten die Polschuhe an den inneren Kanten mit einer leichten Fase versehen werden, um den Teilen mehr Ankopplungsfläche zu bieten. Dabei musste jedoch darauf geachtet werden, dass durch die Fase die Schenkelweite nicht zu sehr erweitert wurde, da sonst ein konvexes Teil bei vollständig eingefedertem Sensorkopf trotzdem einseitig keinen Kontakt mit dem Elektromagneten bekäme.

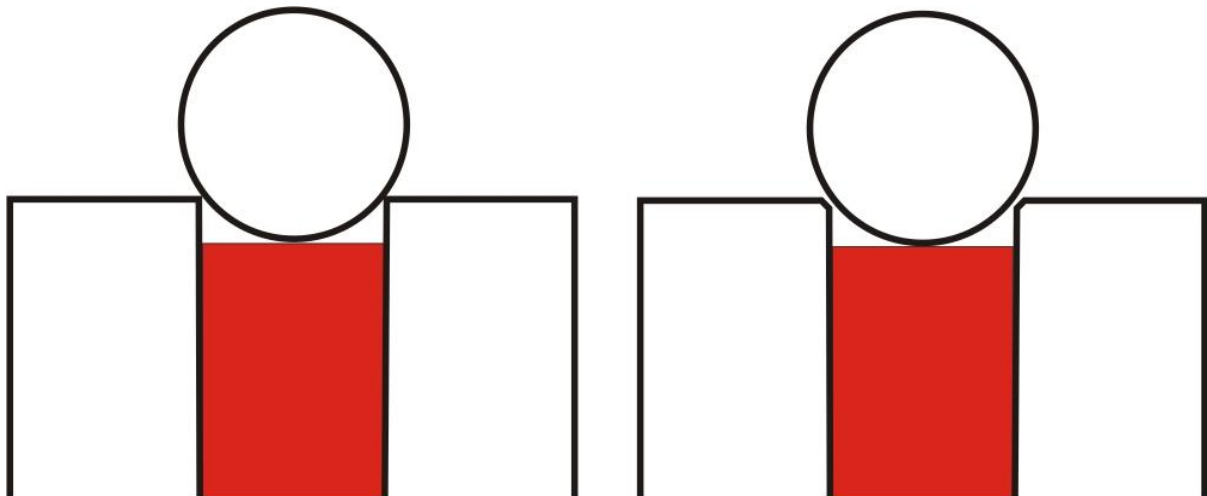


Abb. 31 Skizze der Polschuhe des Elektromagneten (rot ist die Sensoreinheit dargestellt). Links mit unbearbeiteten Kanten, rechts mit Fase an den Innenkanten. Dabei ist an der Fase schon ein definierter Luftspalt dargestellt

4.2.3 Versuche mit angepasster Sensorgeometrie

Mit dem angepassten Sensor konnten aufgrund der Möglichkeit zur Ankopplung quer zur Bauteilachse Versuche durchgeführt werden, die ohne Anpassung nicht möglich waren. Zuerst wurde derselbe Probensatz wie unter 4.1.2 verwendet, an dem Messungen mit Querankopplung erfolgten.

Dazu wurde eine provisorische Probenhalterung gebaut (Abb. 32), die über eine Sensorführung verfügte. Damit sollten möglichst reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden.

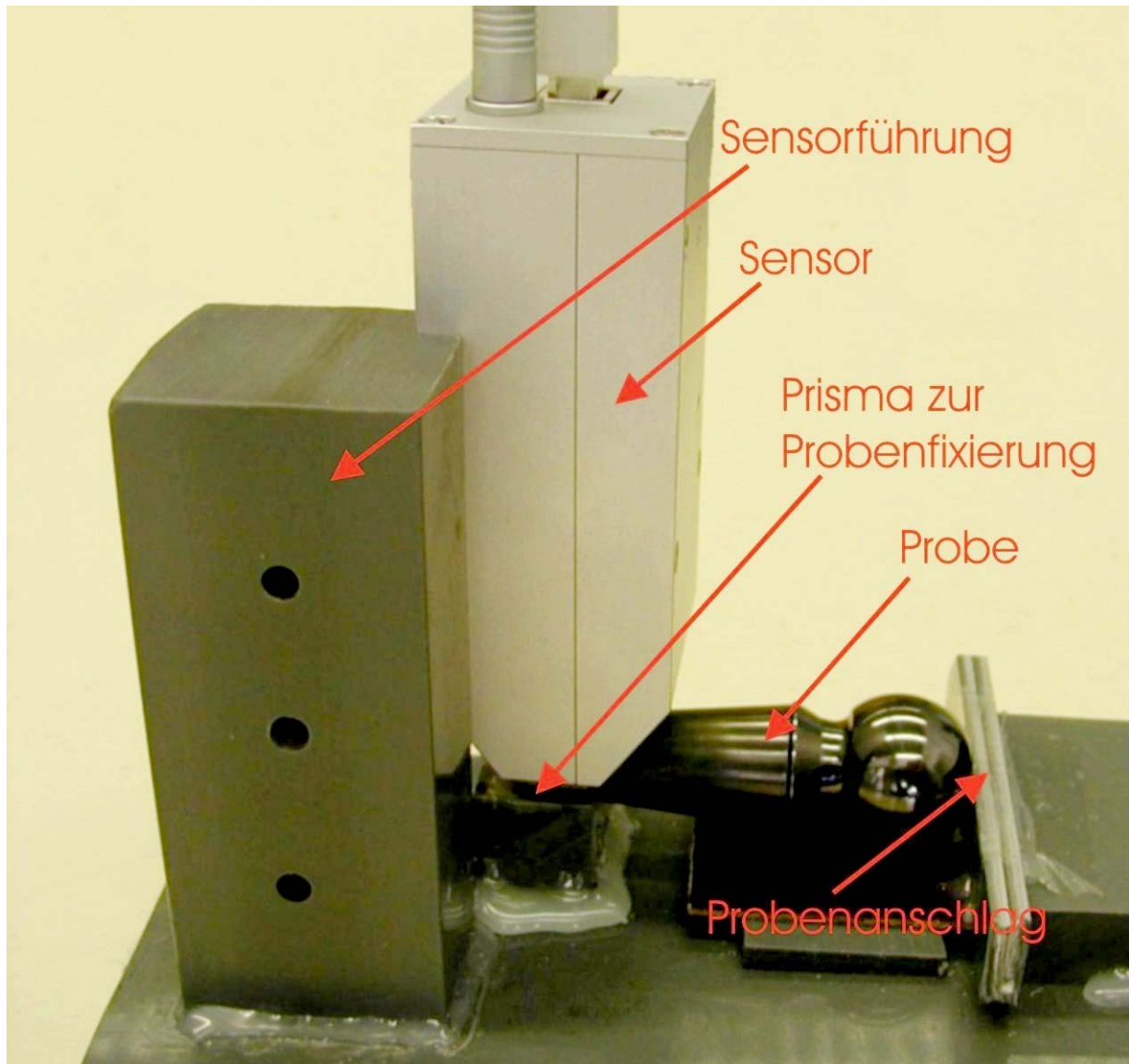


Abb. 32 Provisorische Probenhalterung für den geometrisch angepassten Sensor. Die Probe wurde durch einen Anschlag und ein Prisma fixiert, der Sensor an einer L - förmigen Aussparung geführt. Dadurch sollte eine möglichst gleich bleibende Ankoppelsituation erreicht werden.

Die Ergebnisse dazu sind unter 4.2.3.1 dargestellt. Zum Vergleich wurden noch Versuche an Teilen derselben Geometrie wie der des 3. Probensatzes durchgeführt, die noch im Rohzustand, also nicht dem IONIT – OX – Prozess ausgesetzt waren und somit weder nitriert.

Im Anschluss daran wurden Teile untersucht, die im Labor unterschiedlich lange nitriert worden waren (siehe 4.2.3.3). Ziel dieser Versuche war es einen Zusammenhang zwi-

schen den abgestuften Probensätzen und den gemessenen magnetischen Eigenschaften herzustellen.

Da der angepasste Sensor über eine andere Charakteristik verfügte als der unangepasste, mussten neue Prüfparameter erstellt werden. Aufgrund am Institut vorliegender Erfahrungswerte wurde eine Einstellung von 200 Hz Erregerfrequenz mit 100 A/cm Amplitude gewählt. Die Gründe waren, dass möglichst im hohen Frequenzbereich (hoher Anteil an statistischem Rauschen) mit hoher Magnetisierungsamplitude (zur Überbrückung des Luftspalts) gemessen werden sollte. Begrenzend musste die Erwärmung des Verstärkers und der Spule des Elektromagneten beachtet werden. Unter Berücksichtigung dieser Prämissen wurden, nachdem an dem 3. Probensatz festgestellt wurde, dass niedrigere Einstellungen der Erregerfrequenz und der Amplitude keine auswertbaren Ergebnisse lieferten, diese Einstellungen festgelegt.

4.2.3.1 Versuche an Serienteilen

Am 3. Probensatz wurden mit den oben beschriebenen Einstellungen Versuche durchgeführt, bei denen der Elektromagnet quer zur Achse angekoppelt wurde. Diese Anordnung wurde gewählt, um den Prüfbereich möglichst auf die interessierende Stelle zu begrenzen.

Versuche in Längsrichtung wurden nicht mehr durchgeführt, da bei diesen auf dem Konus in jedem Fall Bereiche mit Verbindungsschicht angeregt wurden. Dieser mögliche Störeinfluss sollte durch die Querankopplung vermieden werden.

Die Ergebnisse des Barkhausenrauschens dieser Versuche sind in Abb. 33 dargestellt.

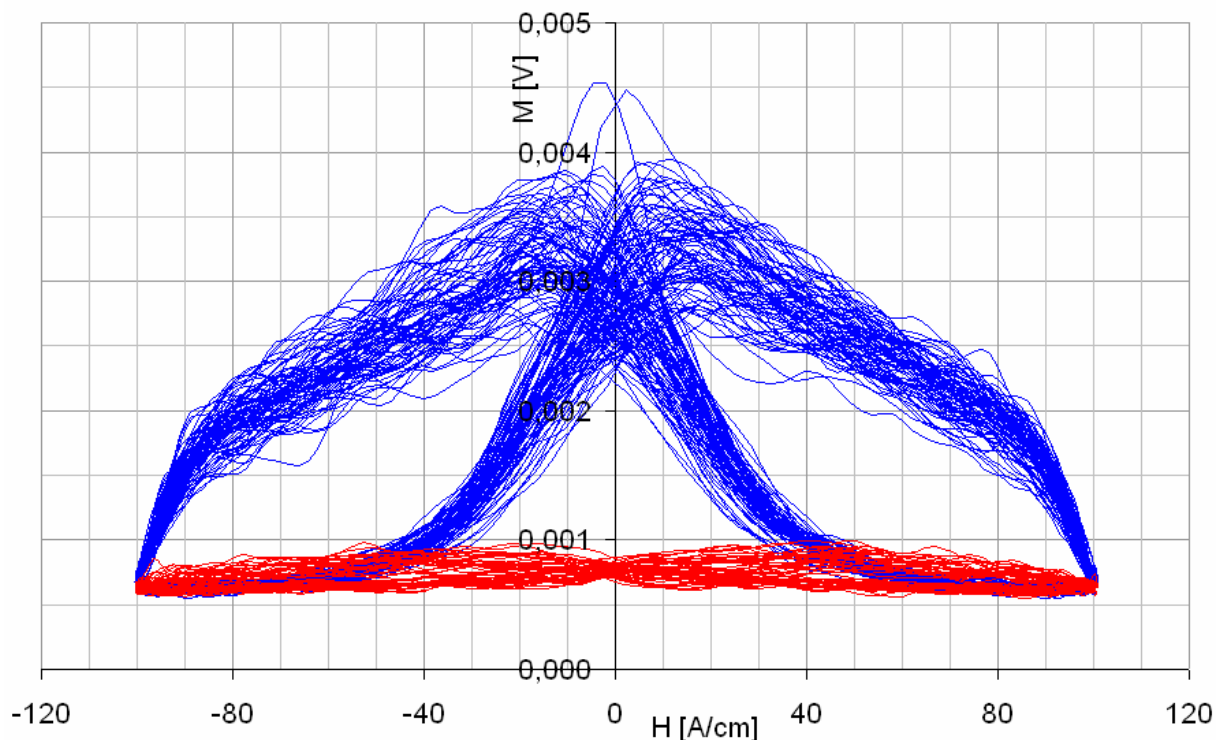


Abb. 33 Ergebnisse der Messungen mit dem geometrisch angepasstem Sensor mit einem Bandpassfilter von 10kHz bis 24kHz. Blau sind die Ergebnisse aller 80 i.O. - Teile, rot die aller 28 n.i.O. - Teile.

Die Kurven dieser Versuche sind mit einer Bandpassfilterung dargestellt, deren Hochpassfilter bei 10 kHz und der Tiefpassfilter unverändert bei 24 kHz lagen. Diese Hochpassfilterung war notwendig, da sonst Artefakte des Erregersignals in den Barkhausenrauschkurven aufgetreten wären. Diese Artefakte sind Teil der Oberwellen, z.B. A_{21} die bei einer Hochpassfilterung 2 kHz und einer Anregung mit 100 Hz als Signal mit 2,1 kHz in die Barkhausenrausch – Analyse mit einfließt. Weiterhin wurde eine Kurve mit der bekannten Filterung 2 kHz bis 24 kHz aufgenommen, sowie Kurven mit den Bandpassfilterungen 15 kHz bis 24 kHz und 20 kHz bis 24 kHz. Erwartungsgemäß lagen die Amplituden der Rauschbewertung umso tiefer, je schmaler der Frequenzbereich des Bandpassfilters war.

Verschiedene Kennwerte dieser Kurven, die diese Abhängigkeit zeigten sind in Abb. 34 und Abb. 35 dargestellt. Sie zeigen alle, ebenso wie die in Abb. 36 dargestellten Werte der Oberwellenanalyse eine deutliche Unterscheidung der i.O. – Teile und der n.i.O. – Teile.

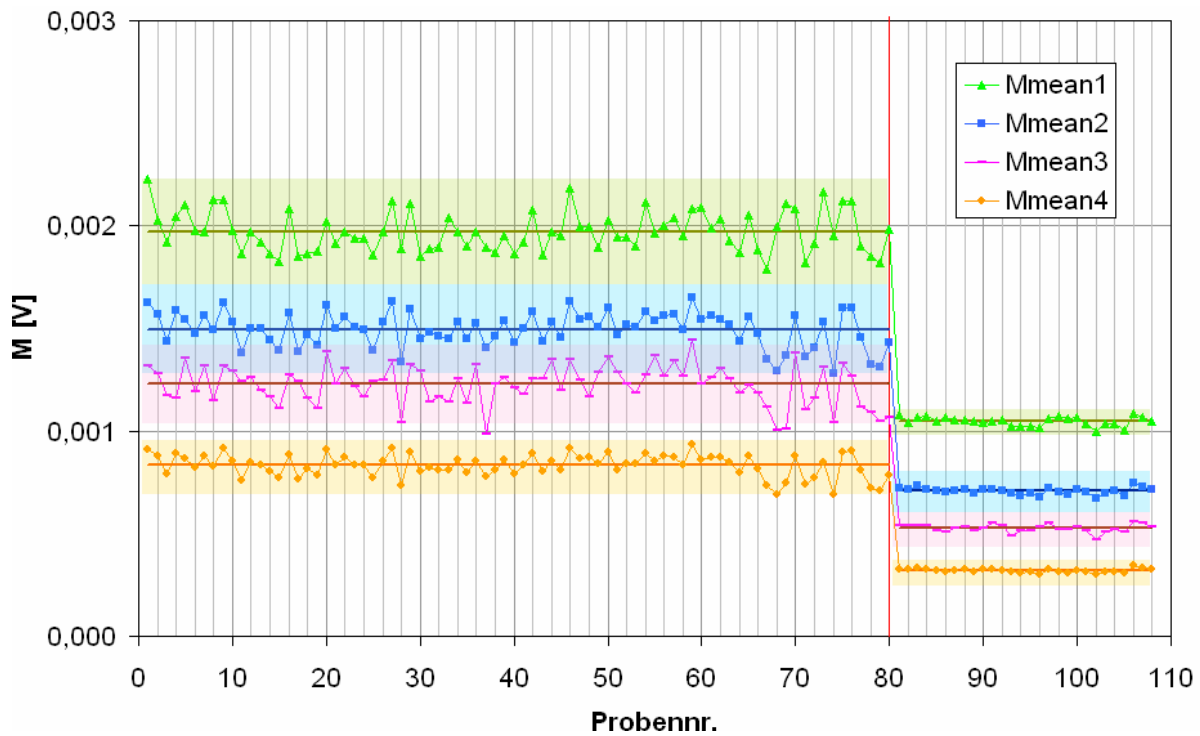


Abb. 34 M_{mean} der Teile mit unterschiedlicher Filterung. M_{mean1} : 2 kHz – 24 kHz M_{mean2} : 10 kHz – 24 kHz M_{mean3} : 15 kHz – 24 kHz M_{mean4} : 20 kHz – 24 kHz Rechts der roten Linie liegen die Werte der n.i.O. – Proben. Die dunklen Linien stellen den jeweiligen Mittelwert dar, die farbig hinterlegten Bereiche stellen den Mittelwert der 2σ – Bereiche der einzelnen Teile dar

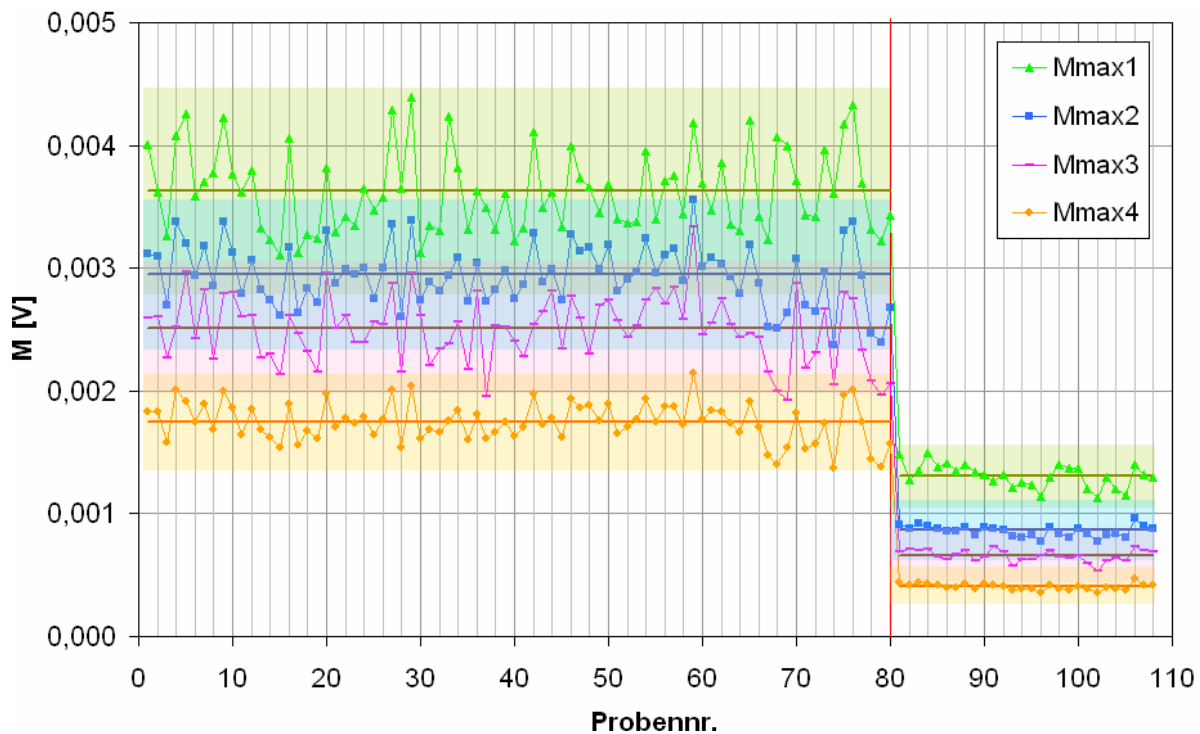


Abb. 35 M_{max} der Proben mit unterschiedlicher Filterung. M_{max1} 2 kHz – 24 kHz, M_{max2} 10 kHz – 24 kHz, M_{max3} 15 kHz – 24 kHz, M_{max4} 20 kHz – 24 kHz. Rechts der roten Linie liegen die Werte der n.i.O. – Proben. Die dunklen Linien stellen den jeweiligen Mittelwert dar, die farbig hinterlegten Bereiche stellen den Mittelwert der 2σ – Bereiche der einzelnen Proben dar

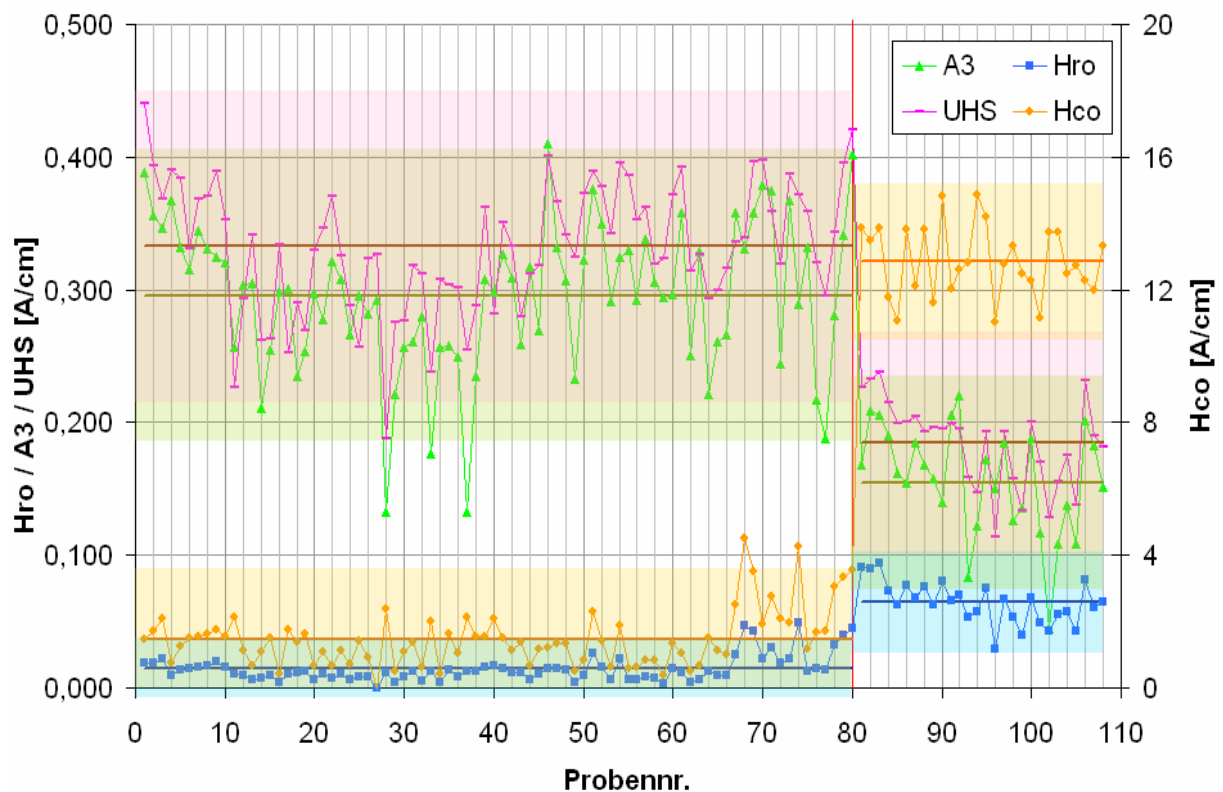


Abb. 36 A_3 , H_{ro} , UHS und H_{co} der Teile. Rechts der roten Linie liegen die Werte der n.i.O. – Proben. Die dunklen Linien stellen den jeweiligen Mittelwert dar, die farbig hinterlegten Bereiche stellen den Mittelwert der 2σ – Bereiche der einzelnen Teile dar

Mit den Ergebnissen aus diesen Versuchen konnte die Mustererkennung der MMS – Software die Zustände der Teile im Autorecognition – Test bereits ohne Optimierung mit einem Fehler von $RMSE = 0,01 \%$ erkennen. Da bei einem derart geringen Fehler optisch keine Streuung zu erkennen ist, wurde auf eine Darstellung verzichtet. Sie wäre nicht von Abb. 28 zu unterscheiden.

Durch die automatische Optimierung konnte der Fehler noch vollständig eliminiert werden, so dass auch hier ein Fehlerwert von $RMSE = 0 \%$ erreicht wurde.

Die Mustererkennung hatte in diesem Fall wesentlich mehr Werte, die bewertet werden mussten, da die Kennwerte des Barkhausenrauschens für jede Filterung bestimmt wurden und damit vierfach vorlagen.

Die von der automatischen Optimierung ermittelten Gewichtungen sind in Tabelle 5 dargestellt, wobei die Indizes der Werte des Barkhausenrauschens für die unterschiedlichen Bandpassfilterungen stehen.

Gewichte des Barkhausenrauschens		Gewichte der Oberwellenanalyse	
Messwert	g_i	Messwert	g_i
Mr_1	1,000	Hco	0,804
$Mmean_1$	1,000	Hro	0,806
$Mmax_1$	0,840	K	1,000
Hcm_1	0,959	A3	1,000
DH25 ₁	0,766	A5	1,000
DH50 ₁	0,524	A7	1,000
DH75 ₁	0,472	P3	0,894
Mr_2	0,649	P5	1,000
$Mmean_2$	1,000	P7	1,000
$Mmax_2$	1,000	UHS	1,000
Hcm_2	0,960		
DH25 ₂	1,000		
DH50 ₂	1,000		
DH75 ₂	1,000		
Mr_3	0,533		
$Mmax_3$	1,000		
Hcm_3	0,422		
DH25 ₃	1,000		
DH50 ₃	0,668		
DH75 ₃	1,000		
Mr_4	0,775		
$Mmean_4$	1,000		
$Mmax_4$	0,873		
Hcm_4	1,000		
DH25 ₄	0,785		
DH50 ₄	0,773		
DH75 ₄	0,848		

Tabelle 5 Gewichtungsfaktoren g_i durch automatische Optimierung ermittelt

Wie schon bei der Auswertung der Ergebnisse mit Längsankopplung wurde auch hier der Standardwert für die maximale Abweichung beibehalten. Aufgrund der Tatsache, dass der Startfehler schon sehr niedrig war, weichen die Gewichtungen nicht so stark vom Startwert $g_{\text{start}} = 1$ ab, wie bei den Versuchen mit Längsankopplung.

4.2.3.2 Versuche an unbehandelten Teilen

Zu Vergleichszwecken wurden im Anschluss noch Untersuchungen an Teilen derselben Geometrie wie der des Probensatzes unter 4.1.2 und 4.2.3.1 vorgenommen, die jedoch vollständig unbehandelt waren und somit weder eine Aufkonzentration mit Stickstoff erfahren haben, noch durch die Prozesstemperatur beeinflusst worden sein konnten. Ziel dieser Versuche war es, abgestufte Ergebnisse zu erhalten und die beiden Zustände i.O. und n.i.O. in Relation zum unbehandelten Zustand setzen zu können. In diesen Versuchen wurde festgestellt, dass die unbehandelten Teile noch weit höhere Werte für beispielsweise M_{\max} erreichten, als selbst die i.O. – Teile. In Abb. 37 ist der Kurvenverlauf zweier unbehandelter Teile dargestellt (grün) und zum Vergleich dazu die Kurve der i.O. – Teile mit dem höchsten M_{\max} (blau).

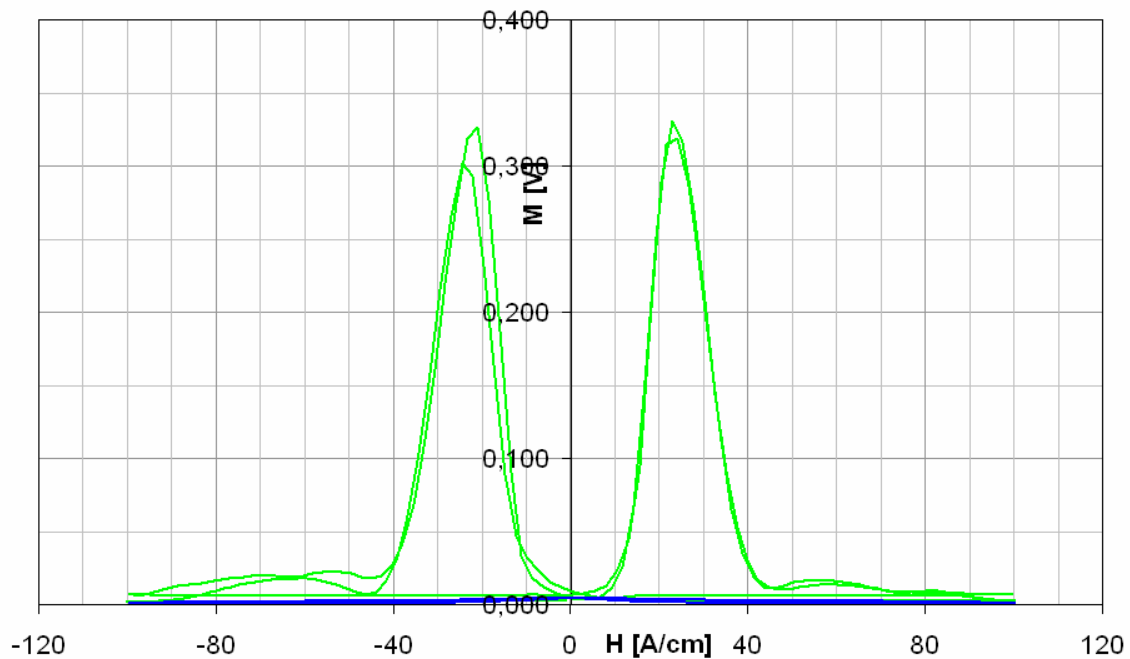


Abb. 37 Barkhausenrauschkurven der unbehandelten Kugelzapfen (grün) im Vergleich zu einer i.O. – Kurve (blau) mit einem Bandpassfilter von 10 kHz bis 24 kHz.

Auf eine Darstellung eines n.i.O. – Teils wurde verzichtet, da sie von dem i.O. – Teil bei der Skalierung dieser Darstellung nicht zu unterscheiden gewesen wäre. Der deutlichste Unterschied war die Differenz in den M_{\max} – Beträgen. In Abb. 37 kann man erkennen, dass sie sich in einem Frequenzbereich von 10 kHz bis 24 kHz über mehr als eine vollständige Zehnerpotenz erstreckte. Weitere Werte, in denen sich die Unterschiede widerspiegelten sind in Abb. 38 dargestellt.

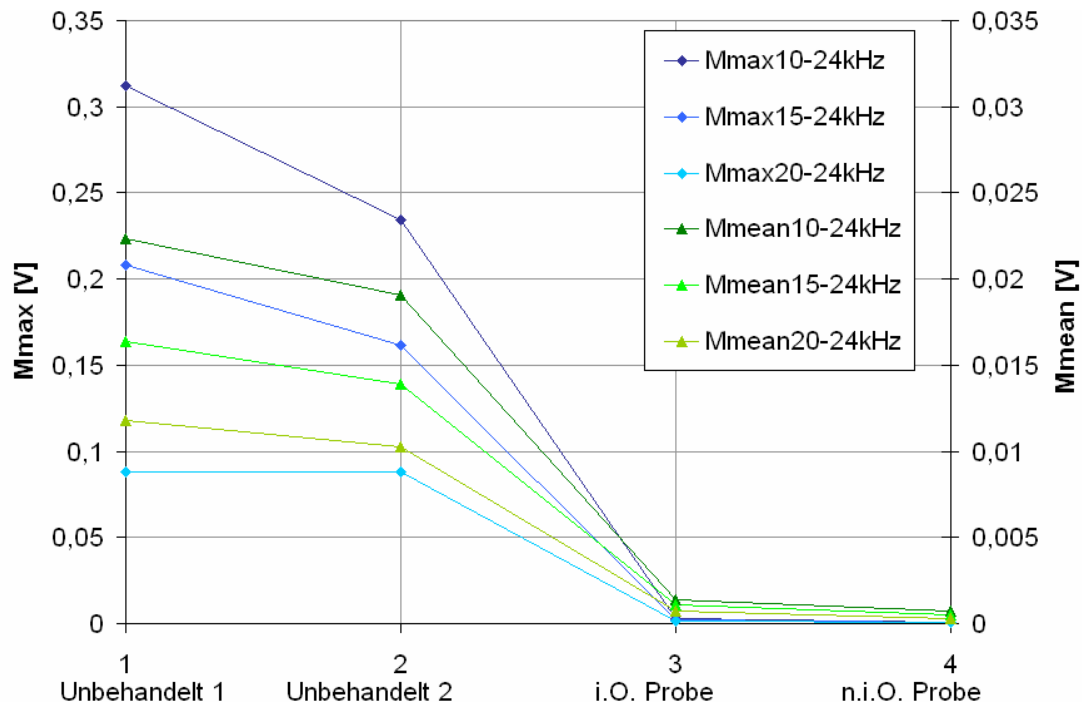


Abb. 38 Unterschiede der Werte des Barkhausenrauschens zwischen unbehandelten Kugelzapfen, i.O. – Teilen und n.i.O. – Teilen.

Der Verlauf der Prüfgrößen der Oberwellenanalyse wies außer bei der Amplitude der 3. Oberwelle keinen so eindeutigen Trend auf wie der der Barkhausenrausch – Auswertung (Abb. 39).

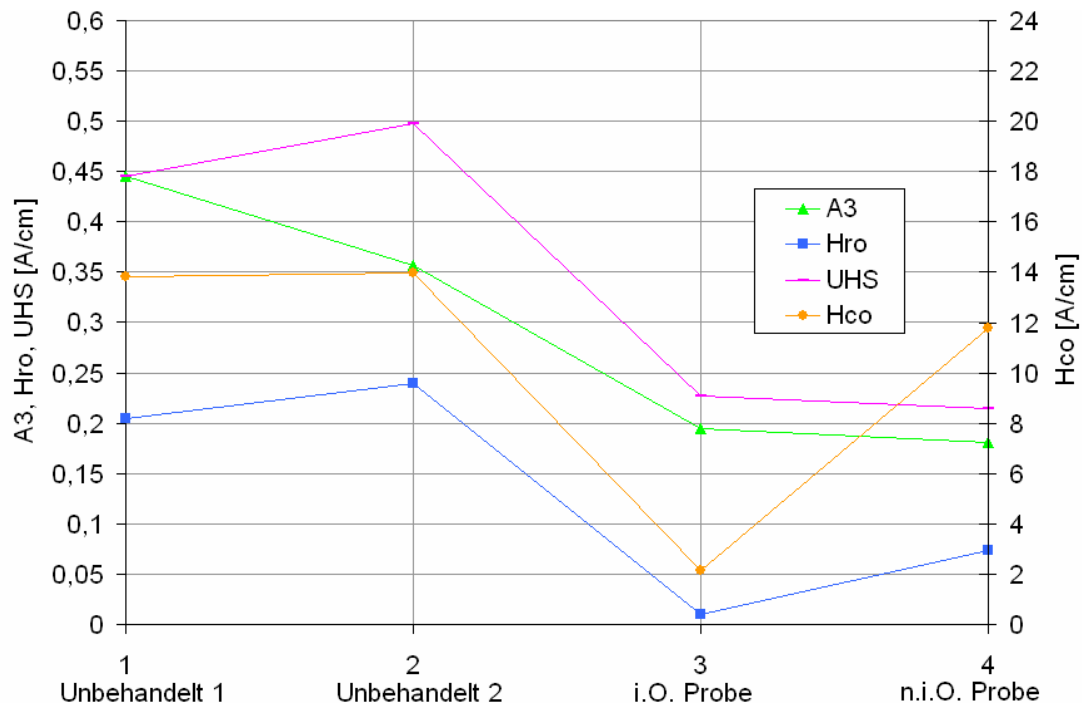


Abb. 39 Unterschiede der Werte der Oberwellenanalyse zwischen unbehandelten Kugelzapfen, i.O. – Teilen und n.i.O. – Teilen.

Die Gründe hierfür werden Kapitel „5 Interpretation und Auswertung“ näher betrachtet.

Angesichts der Unterschiede, die sich in den Werten des Barkhausenrauschens zeigten wurde darauf verzichtet unter Einbeziehung der unbehandelten Teile eine weitere Optimierung und einen weiteren Autorecognition – Test durchzuführen, da davon ausgegangen werden konnte, dass auch diese Teile eindeutig erkannt worden wären.

4.2.3.3 Versuche an Laborteilen

Um den Einfluss der Diffusionsschicht weiter zu untersuchen stand ein Satz von laborbehandelten Teile zur Verfügung. Dies waren je zwei Teile gleicher Behandlung, in den Zuständen unbehandelt, 15 min nitriert, 30 min nitriert, 60 min nitriert und 90 min nitriert. Die Behandlungszeiten waren so gewählt, dass keine Verbindungsschicht entstehen sollte. Die Erfassung unterschiedlicher Diffusionsschichten war deshalb von Interesse, weil durch die Nitridausscheidungen schon in dieser Zone eine beträchtliche Härte- und Festigkeitssteigerung bewirkt werden konnte, die dazu geführt hätte, dass das geforderte Kriterium nicht mehr erfüllt worden wäre.

Exemplarisch sind Barkhausenrauschkurven von jedem Teilezustand, die an diesem Probenatz aufgenommen werden konnten, in Abb. 40 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass eine zunehmende Diffusionsschichtdicke zu einer abnehmenden Amplitude der Barkhausenrausch – Profilkurven führt.

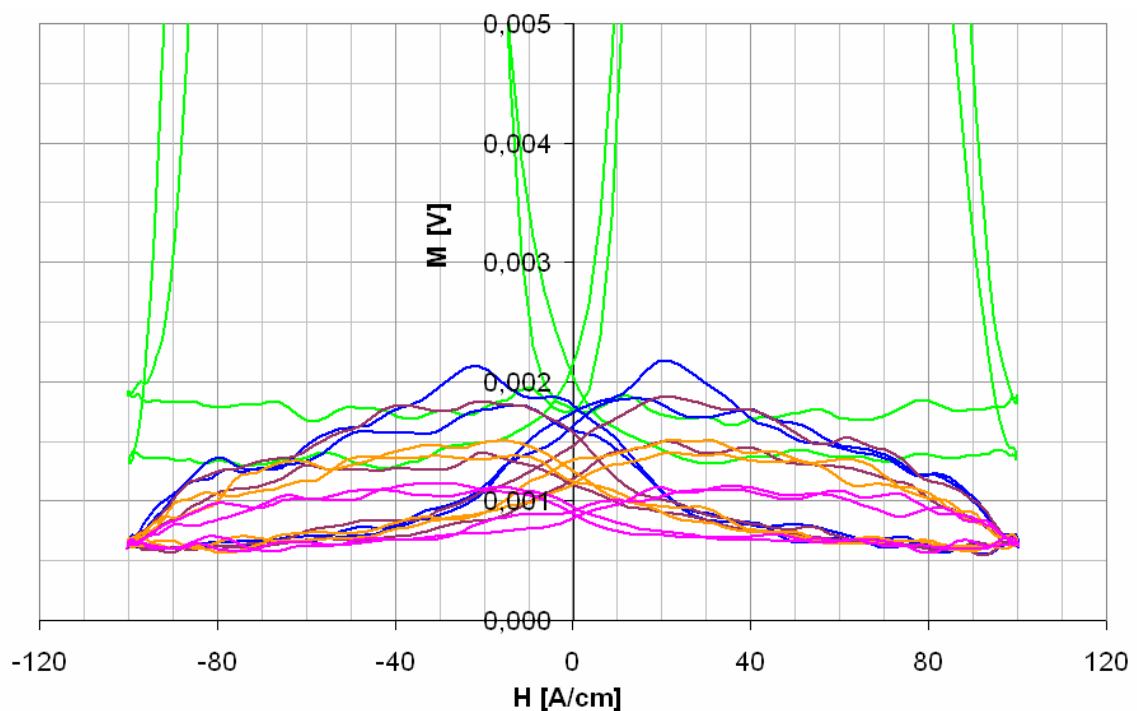


Abb. 40 Darstellung der Barkhausenrauschkurven der laborbehandelten Teile mit einer Bandpassfilterung von 10 kHz bis 24 kHz. Das Maximum der unbehandelten Teile (grün) liegt mehr als eine Zehnerpotenz höher als die Maxima der nitrierten Teile (15 min blau, 30 min braun, 60 min orange, 90 min violett) und ist daher hier nicht voll dargestellt.

Es zeigte sich hier, dass bereits eine kurzzeitige Nitrierbehandlung einen enormen Einfluss hatte. In Abb. 41, Abb. 42 und Abb. 43 sind einige Kennwerte über den Nitrierzeiten dargestellt.

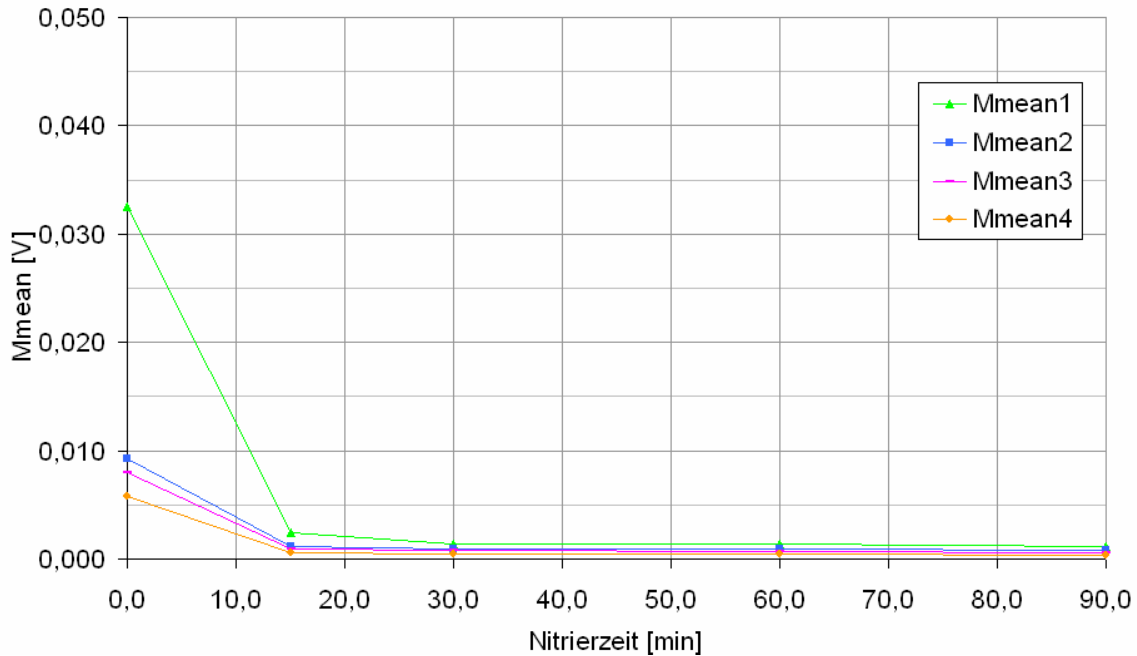


Abb. 41 Die gemittelten M_{mean} – Werte zeigten in allen Frequenzbereichen eine fallende Tendenz mit zunehmender Nitrierzeit (Filterungen: $M_{\text{max}1}$ 2 kHz – 24 kHz, $M_{\text{max}2}$ 10 kHz – 24 kHz, $M_{\text{max}3}$ 15 kHz – 24 kHz, $M_{\text{max}4}$ 20 kHz – 24 kHz).

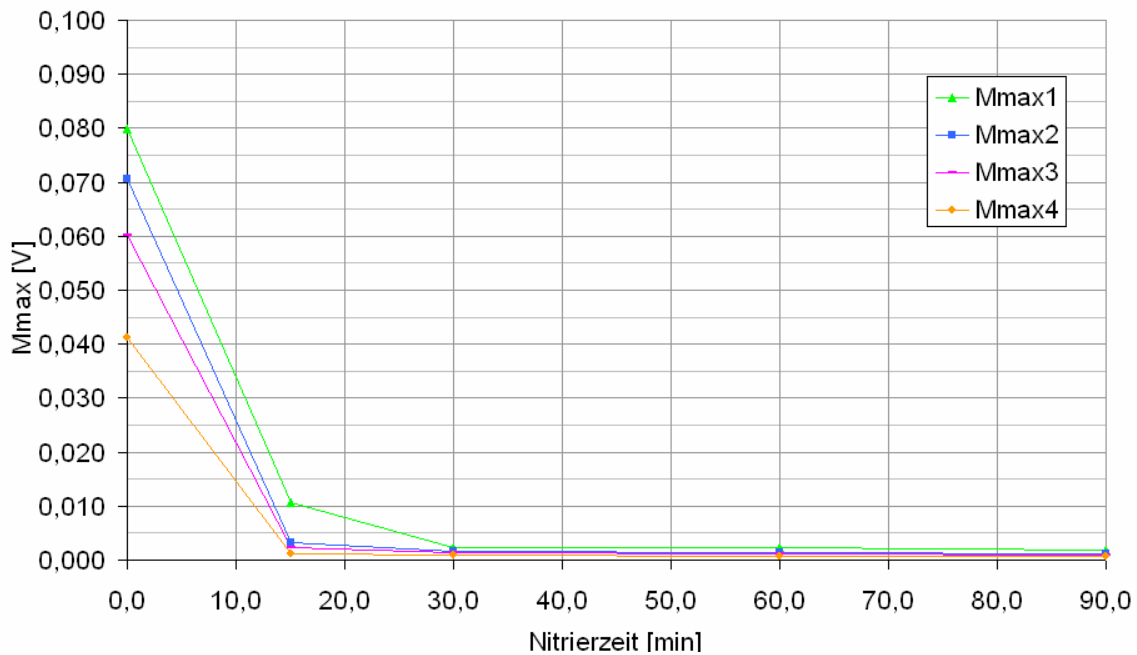


Abb. 42 Die gemittelten M_{max} – Werte verhielten sich analog zu den M_{mean} – Werten (Filterungen: $M_{\text{max}1}$ 2 kHz – 24 kHz, $M_{\text{max}2}$ 10 kHz – 24 kHz, $M_{\text{max}3}$ 15 kHz – 24 kHz, $M_{\text{max}4}$ 20 kHz – 24 kHz).

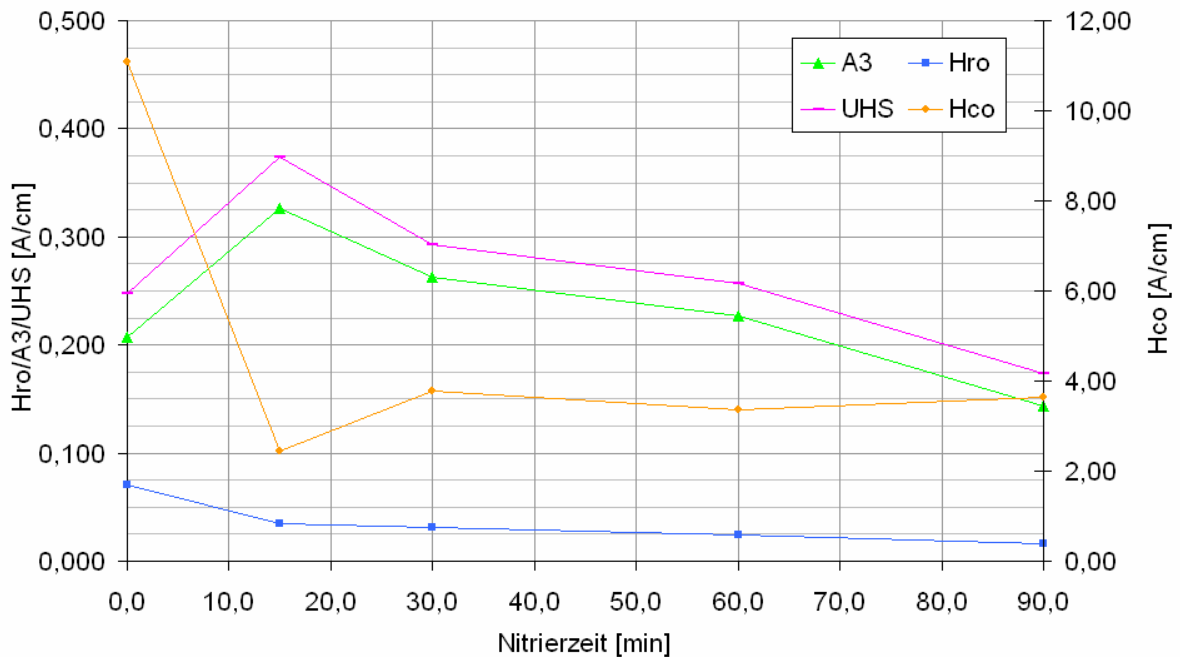


Abb. 43 Bei den gemittelten Werten der Oberwellenanalyse zeigte sich wieder, dass die unbehandelten Teile mit den behandelten keine einheitliche Tendenz aufwiesen.

Die deutliche Abstufung der Verläufe der Barkhausenrausch – Prüfgrößen unterschiedlicher Behandlungszeiten deutete darauf hin, dass auch hier eine Unterscheidung der einzelnen Teilezustände möglich sein würde. Bei den Verläufen der Prüfgrößen der Oberwellenanalyse zeigte sich auch hier wieder weitgehend, dass die Ergebnisse der unbehandelten Teile vom Trend der behandelten abwichen. Zu den Ursachen sei auch hier auf das Kapitel „5 Interpretation und Auswertung“ verwiesen. Ohne Optimierung der Gewichte konnte die Mustererkennung hier allerdings keine eindeutige Trennung der Zustände erreichen. Die Messungen an einer Position eines unbehandelten Teils konnten nicht eingeordnet werden. Ein solches Ergebnis würde im Einsatz dazu führen, dass das Teil als nicht erkannt aussortiert würde.

Es wurde erwartet, dass die Optimierung eine deutliche Verbesserung erbringen würde. Der Startwert des Fehlers war hier $RMSE = 40,1\%$ und konnte auf $RMSE = 0,77\%$ reduziert werden.

Die Unterscheidung der Teile war damit nicht so deutlich wie bei den i.O. / n.i.O. – Teilen, aber dennoch konnte eine Trennung der Zustände erreicht werden. Die Ergebnisse des Autorecognition – Test nach der Optimierung sind in Abb. 44 und Abb. 45 dargestellt.

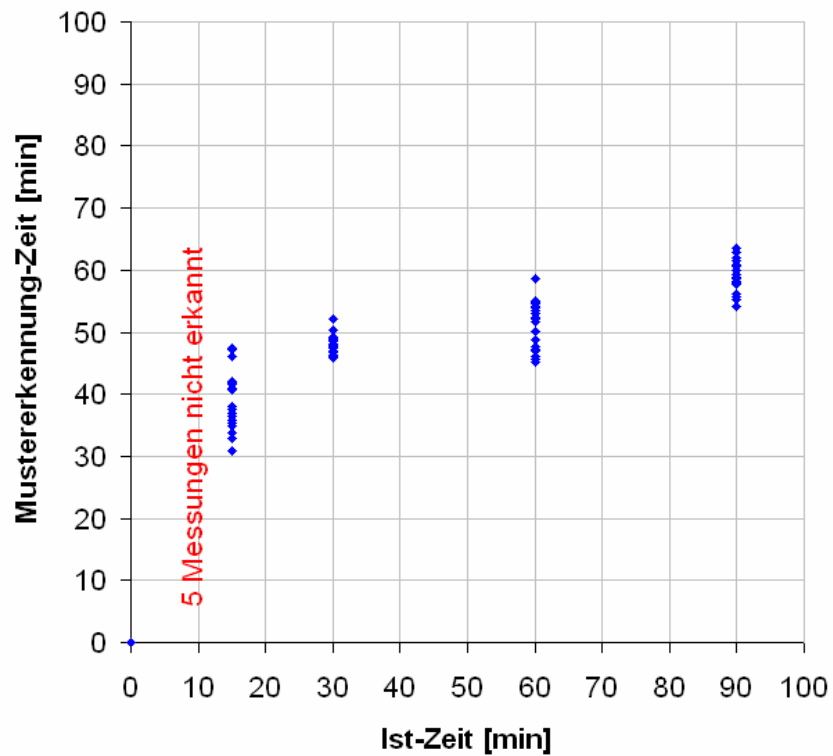


Abb. 44 Erwartete Zeit über der tatsächlichen mit einem Fehler von $RMSE = 40,1\%$. Die Mustererkennung konnte einige Werte der unbehandelten Teile (0min) nicht erkennen.

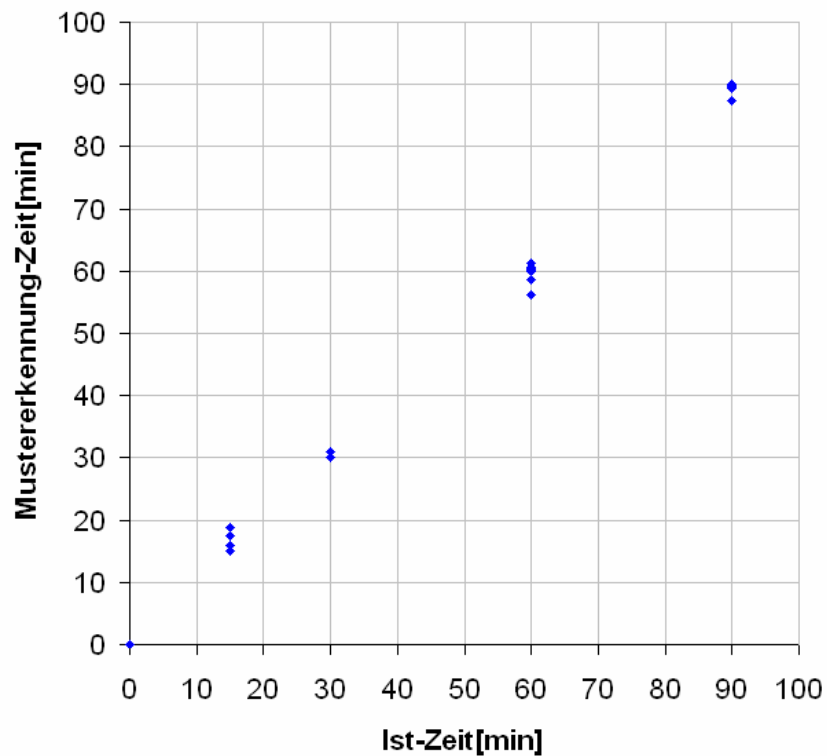


Abb. 45 Erwartete Zeit über der tatsächlichen mit einem Fehler von $RMSE = 0,77\%$. Nach der Optimierung konnten alle Teile erkannt und sogar deutlich getrennt werden.

Die Gewichtungsfaktoren für diese Optimierung sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Gewichte des Barkhausenrauschens		Gewichte der Oberwellenanalyse	
Messwert	g_i	Messwert	g_i
Mr1	0,001	Hco	0,619
Mmean1	0,695	Hro	0,042
Mmax1	0,001	K	0,036
Hcm1	0,267	A3	0,063
DH251	0,001	A5	0,001
DH501	0,198	A7	0,001
DH751	0,439	P3	0,362
Mr2	1,000	P5	0,001
Mmean2	0,713	P7	0,148
Mmax2	0,001	UHS	0,173
Hcm2	0,001		
DH252	0,158		
DH502	0,184		
DH752	0,184		
Mr3	1,000		
Mmean3	0,001		
Mmax3	0,001		
Hcm3	0,001		
DH253	0,242		
DH503	0,001		
DH753	0,429		
Mr4	0,632		
Mmean4	0,175		
Mmax4	0,003		
Hcm4	0,001		
DH254	0,001		
DH504	0,163		
DH751	0,053		

Tabelle 6 Gewichtungsfaktoren durch automatische Optimierung ermittelt.

Auffällig war hierbei, dass die Gewichte für die Werte der Oberwellenanalyse im Vergleich zu den anderen Probensätzen niedrig ausfielen, was nach Abb. 43 zu erwarten war.

5 Interpretation und Auswertung der Ergebnisse

Die stark unterschiedliche Ausbildung der Barkhausenrausch – Profilkurven im Vergleich zwischen Längs- und Querankopplung lässt sich durch die Anwendung eines definierten Luftspaltes bei der Querankopplung erklären. Die stark ausgeprägten Peaks im Falle der Längsankopplung rühren von relativ niederfrequenten Ereignissen her, die als hochfrequente Oberwellenanteile an den Stellen der Hystereseurve auftreten, wo sich die Steigung sehr stark ändert (hohe Werte der 2. Ableitung). Die gestreckte Form der Hysterese des Luftspaltes ($\mu_r \sim 1$), die mit der Hysterese des Werkstoffs überlagert wird und zu einer Scherung derselben führt, bewirkt eine Entschärfung der Kniebereiche, wodurch dann auch die Signalaktivität im niederfrequenten Bereich sinkt und die Peaks reduziert werden (Abb. 46), bis sie nicht mehr vom Grundrauschen zu unterscheiden sind.

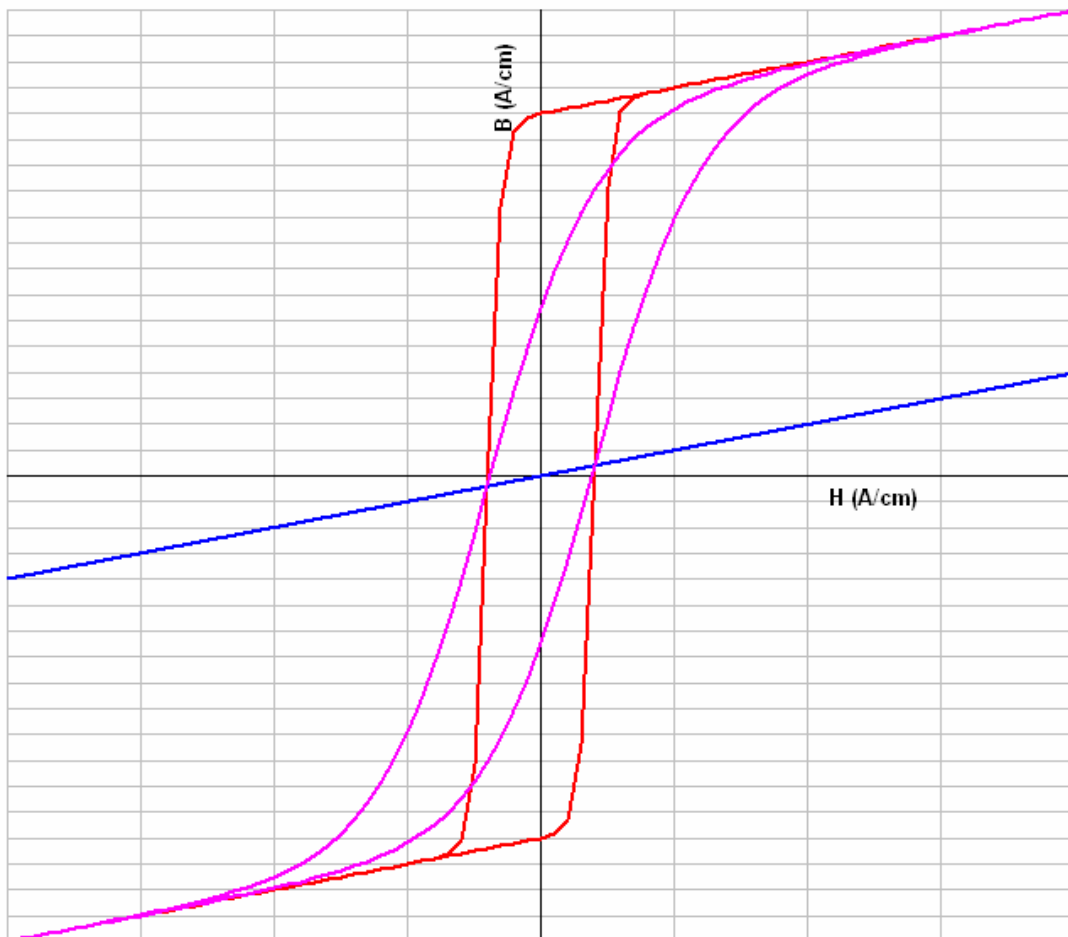


Abb. 46 Systematik der Scherung der Hysterese: Überlagerung der Hysterese des Luftspaltes (blau) mit derjenigen des Werkstoffs (rot) zu einer Gesamthysterese (violett).

Die Scherung ergibt sich daraus, dass der magnetische Widerstand des Systems durch den Luftspalt stark erhöht wird, wodurch eine höhere Feldstärke für denselben magnetischen Fluss, und die daraus resultierende Magnetisierung, nötig ist.

In beiden Ankopplungsfällen konnte die Mustererkennung eine klare Trennung der Teilezustände liefern, wobei im Falle der Längsankopplung der Startwert des Fehlers wesentlich größer war (RMSE = 9,24 %) als im Falle der Querankopplung mit Luftspalt (RMSE = 0,01 %). Nach der Optimierung war der Fehler jeweils auf RMSE = 0 % reduziert worden.

Die Unterscheidbarkeit der Teilezustände ist als Folge der Schichtbildung bei der Nitrierung zu sehen. Die geringeren Rauschamplituden der n.i.O. – Teile können dadurch erklärt werden, dass sowohl das Erregersignal als auch das Antwortsignal des Werkstoffs durch die Verbindungsschicht besonders stark gedämpft werden. Diese Amplitudenreduktion ist umso stärker, je dicker die Verbindungsschicht ist. M_{\max} ist von diesem Effekt stark betroffen, eignet sich aber aufgrund der hohen statistischen Streuung, insbesondere an den i.O. – Teile, nicht besser zur Unterscheidung als die anderen Kennwerte.

Anhand der Ergebnisse der Versuche an den unbehandelten Teilen kann man sehen, dass diese sich deutlich auch von den i.O. – Teilen abheben. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass auch die i.O. – Teilen schon eine geringe Diffusionsschicht aufweisen können. Ein weiterer möglicher Grund könnten Werkstoffveränderungen aufgrund von Temperatureinflüssen sein (Prozesstemperatur >500 °C, Haltezeit > 400 min), was aber im Zuge dieser Arbeit nicht näher untersucht werden konnte.

Die Annahme, dass die Diffusionsschicht mit zunehmender Dicke ebenfalls eine zunehmende Reduzierung der Amplitude bewirkt wurde anhand des Barkhausenrauschens der Laborteile in Abschnitt 4.2.3.3 erhärtet. Ein Teil der Reduktion der Amplitude an den n.i.O. – Teilen ist also nicht auf die Verbindungsschicht, sondern auf die Diffusionsschicht zurückzuführen.

Die Signale der Oberwellenanalyse sind hinsichtlich der i.O. / n.i.O. – Teile analog zu denen des Barkhausenrauschens zu sehen. Auch hier fand eine Beeinflussung statt, die zu einer Veränderung der Kennwerte führte (Abb. 26 und Abb. 36). Allerdings werden bei der Oberwellenanalyse auch die Auswirkungen auf die Phasenverschiebung erfasst, die ohne ausführliche Untersuchung nicht genau zu bestimmen sind.

Die deutlich Abweichung der unbehandelten Teile von der Tendenz der i.O. / n.i.O. – Teile konnte damit erklärt werden, dass die Oberwellenanalyse sehr empfindlich auf Un-

terschiede in den Eigenspannungen der Prüflinge reagiert. Da durch das Nitrieren nach [WAL2000] Druckeigenspannungen erzeugt wurden, wurden Zugeigenspannungen, die aus vorherigen Arbeitsschritten (insbesondere der Gewindefertigung) stammten, durch die erste Bildung einer oberflächennahen Diffusionsschicht kompensiert. Diese Eigenspannungskompensation führte zu einer starken Änderung des magnetischen Verhaltens, die sich besonders in den Werten der Oberwellenanalyse niederschlug. Mit zunehmender Nitrierzeit bauten sich dann wieder stärkere (Druck-) Eigenspannungen auf, so dass die Werte sich wieder denen des unbehandelten Zustands annäherten bzw. sie überschritten.

An den laborbehandelten Teilen konnte, abgesehen von den unbehandelten, eine klare Entwicklung der Kennwerte beider Verfahren mit der Nitrierzeit nachgewiesen werden. Die Daten reichen hinsichtlich der Fragestellung zur Bestimmung der Nitrierhärte tiefe noch nicht aus um eine Kalibrierung des Systems zu ermöglichen, mit weiteren Probenätzen, die eine definierte Nitrierhärte tiefe und eine engere Abstufung aufweisen, sollte es aber möglich sein, auch das Kriterium der Härte 50 μm unter der Oberfläche, die nicht höher als 50HV über der Kernhärte sein durfte, nachzuweisen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit mikromagnetischen Verfahrensabsätzen, Nitrierungen an Gewinden nachzuweisen. Dabei war keine Beschränkung auf Bauteile mit ausgeprägter Verbindungsschicht nötig, sondern auch Teile, die nur eine Diffusionsschicht aufwiesen konnten erkannt und qualitativ hinsichtlich der Schichtdicke unterschieden werden. Hierfür reichten die Verfahren der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke und des magnetischen Barkhausenrauschens vollkommen aus, so dass auf weitere Verfahren, wie etwa die Analyse der Überlagerungspermeabilität oder Wirbelstromprüfung verzichtet werden konnte.

Mit einem hinreichend definierten Kalibrierprobensatz wird es wahrscheinlich auch noch möglich sein, die Dicke der Diffusionsschicht quantitativ zu bestimmen. Dafür wären mehr Proben je Zustand und enger abgestufte Probenzustände nötig, um eine hinreichende statistische Absicherung zu garantieren.

7 Literatur

- [Alt1987] Altpeter, I. et. al. *Bestimmung der Einsatz- und Randhärte tiefe mit mikromagnetischen Methoden*, in *Zerstörungsfreie Materialprüfung*, Berichtsband 10, Teil 2, Berlin, DGZfP (1987), S. 836-843
- [Alt1990] Altpeter, I. *Spannungsmessung und Zementitgehaltbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer Messgrößen*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation (1990)
- [Alt1992] Altpeter, I. et. al. *Bestimmung der Einhärtungstiefe an Bauteilen aus der Serienfertigung mittels mikromagnetischer Verfahrensansätze*, in *FKM Forschungsheft 170* (1992)
- [Alt1993] Altpeter, I. *Werkstoffcharakterisierung mit magnetischen Methoden*, Kolloquium über Materialcharakterisierung mit zerstörungsfreien Methoden; 30.09.-01.10.1992, Magdeburg (1993)
- [Alt1996] Altpeter, I. et. al. *Zerstörungsfreie Prüfung von Nitrierschichten*, Härtereitechnische Mitteilungen 51 (1996) S. 386 – 389
- [Alt2006] Altpeter, I. et. al. *Optimierung und Bewertung elektromagnetischer Prüfverfahren zum Nachweis von Werkstoffveränderungen in Kraftwerkskomponenten, verursacht durch betriebsbedingte Kupferausscheidungen*, Abschlussbericht, Reaktorsicherheitsforschung – Vorhabensnummer 150 1269, Berichts-Nr. 060119-TW (2006)
- [DOB2000] Dobmann, G. *Micro-Magnetic, Multiple-Parameter, Microstructure and Stress Analysis – 3MA – For Non-Destructive Material Properties Determination and Ageing Prediction*, AMES-NDT-Workshop 22.09.-24.09.1999, Salzburg (2000)
- [Esp1990] Espinosa-Knoche, A. *Zerstörungsfreie Einhärtungstiefen-Bestimmung an zylinderförmigen Proben und Bauteilen aus der Serienfertigung*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit (1990)
- [Gro1996] Grosch, J. (Hrsg.) *Berichtsband Nitrieren und Nitrocarburieren*, AWT-VWT-Tagung 24.04.-26.04.1996, Weimar (1996)

- [Ker1994] Kern, R. et. al. *Zerstörungsfreie Bestimmung der Einhärtungstiefe nach dem Randschichthärten mit mikromagnetischen Prüfverfahren*, Härtereitechnische Mitteilungen 49 (1994) S. 222 – 230
- [Ker1999] Kern, R. et. al. *Zerstörungsfreie Prüfung von randschichtgehärteten Bauteilen unter Einsatz mikromagnetischer Multiparameter-Methoden*, in Randschichthärten und dessen Integration in die Fertigungslinie, Karlovy Vary, 25.11-26.11.1999, Prag (1999)
- [Kne1962] Kneller, E. *Ferromagnetismus*, Springer Verlag (1962)
- [Lau1994] Laub, U. *Nachweis von Weißeinstrahlung an Gussbauteilen*, Materialprüfung 36 (1994), Heft 10, S. 400-404
- [Lei2002] Leinenbach, C. *Bestimmung von mechanisch-technologischen Kenngrößen an Grobblech mit elektromagnetischen Messgrößen*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit (2002)
- [Lie2005] Liedtke, D. *Merkblatt 447 „Wärmebehandlung von Stahl – Nitrieren und Nitrocarburieren“*, Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, 2005
- [MET2006] Sulzer Metco, <http://www.sulzermetco.com/eprise/SulzerMetco/Sites/Metaplas/Main.htm>, Bergisch Gladbach (2006)
- [Pit1990] Pitsch, H. *Die Entwicklung und Erprobung der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als neues Modul des 3MA-Ansatzes*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation (1989)
- [Rös1998] Rösner, H. *Zerstörungsfreie Randschichtcharakterisierung kleiner rotations-symmetrischer Teile mittels mikromagnetischer Prüfverfahren*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit (1998)
- [Rüh1995] Rühle, S. *Zerstörungsfreie Prüfung der Nitrierhärte und der Oberflächenhärte an gas- und ionitrierten Bauteilen mit mikromagnetischen Verfahrensansätzen*, Magdeburg, Otto von Guericke Universität, Diplomarbeit (1995)
- [Szi2001] Szielasko, K. *Aufbau eines modularen Messsystems auf Softwarebasis zur zerstörungsfreien Charakterisierung des Versprödungszustandes von kupferhaltigen Stählen*, Diplomarbeit, Saarbrücken, HTW des Saarlandes (2001)

- [Szi2001] Szielasko, K. et. al. *Barkhausenrausch- und Wirbelstrom-Mikroskopie zur orts aufgelösten Charakterisierung von dünnen Schichten*, in DGZfP - Berichtsband 89-CD, DGZfP - Jahrestagung 2004, 17.-19.05.2004
- [Tsc2004] Tschuncky, R. *Entwicklung eines Mustererkennungs- und Klassifikationsmoduls für die indirekte Charakterisierung von Werkstoffeigenschaften*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit (2004)
- [WAL2000] Waldeck, M. *In situ-Hochtemperatur-Mössbauer-Spektroskopie und Bandstruktur-Rechnungen an Eisennitriden und gemischtvalenten Verbindungen*, Mainz, Johannes Gutenberg Universität Mainz, Dissertation (2000)
- [WOL2004] Wolter, B. *Zerstörungsfrei messen*, Automobil-Entwicklung Mai 2004, S.58