

**Sensor- und geräteunabhängige
Kalibrierung elektromagnetischer
zerstörungsfreier Prüfverfahren
zur praxisorientierten
Werkstoffcharakterisierung**



**UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES**

DISSERTATION

Zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Ing. Ralf Tschuncky

Saarbrücken 2011

| | |
|---------------------------|---|
| Tag des Kolloquiums: | 16.05.2011 |
| Dekan: | Prof. Dr. W.F. Maier |
| Berichterstatter: | Prof. Dr. M. Kröning Prof. Dr.-Ing. D. Bähre |
| Vorsitz: | Prof. Dr.-Ing. M. Stommel |
| Akademischer Mitarbeiter: | Dr.-Ing. F. Aubertin |

VORWORT

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP).

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Michael Kröning für die Begutachtung und Betreuung meiner Doktorarbeit, sowie für die Möglichkeit diese am IZFP durchführen zu können, bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens meiner Doktorarbeit danken.

Frau Dr.-Ing. Iris Altpeter möchte ich für die vielen Fachdiskussionen bezüglich der zerstörungsfreien elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und ihre Unterstützung bei jeglichen Forschungsvorhaben sowie bei meiner Doktorarbeit danken.

Herrn Dr. Gerd Dobmann danke ich für die fachlichen Diskussionen, in denen ich stets von seinem enormen Wissen und seinem langjährigen Erfahrungsschatz lernen konnte.

Abschließend möchte ich allen Mitarbeitern des IZFP und im Speziellen den Mitarbeitern der Abteilung KK1 für die Zusammenarbeit danken.

KURZ-ZUSAMMENFASSUNG

Die quantitative zerstörungsfreie Bestimmung von Werkstoffkenngrößen basiert wie bei vielen elektromagnetischen Prüftechnologien auch bei dem am Fraunhofer IZFP entwickelten elektromagnetischen 3MA-Prüfsystem auf einer Kalibrierung. Da bei der Kalibrierung elektromagnetischer, zerstörungsfreier Prüfverfahren ungewollt und kaum vermeidbar nicht nur Abhängigkeiten von den Kalibrierprobensätzen sondern auch von der verwendeten Sensorik und Prüfelektronik mit aufgenommen werden, können nach einem Austausch einer dieser Komponenten Fehler bei der Werkstoffcharakterisierung auftreten. Deshalb befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Ermittlung, Untersuchung und Umsetzung praxisnaher Lösungswege zur sensor- und geräteunabhängigen bzw. übertragbaren Kalibrierung von elektromagnetischen, zerstörungsfreien Prüfverfahren am Beispiel der 3MA-Prüftechnik.

Es konnten im Rahmen dieser Arbeit drei Lösungswege ermittelt werden. Anschließend wurden die Lösungswege in die Software des IZFP integriert und an Applikationen aus der industriellen Praxis und Forschung validiert. Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Geometrieunabhängigkeit bzw. Übertragbarkeit von 3MA-Kalibrierungen durchgeführt. Hier konnten Prüfgrößen gefunden werden, durch die eine an ebenen Proben ermittelte Kalibrierung auch an Proben mit gekrümmten Messstellen anwendbar ist. Darüber hinaus konnte durch eine Anpassung der Kalibrierung an den ebenen Proben auf Proben mit entweder konkaver oder konvexer Messstelle übertragen werden.

SHORT-ABSTRACT

Like many other electromagnetic testing technologies, the quantitative determination of the material parameters with the 3MA testing system developed at Fraunhofer IZFP requires calibration procedures on appropriate sets of calibration samples. Since the calibrated parameter settings of electromagnetic nondestructive testing methods depend on both test sample properties and instrument (sensor characteristics and electronics). Any change of instrument may cause measurement errors. Therefore, this thesis deals with the determination, analysis and implementation of calibration procedures for electromagnetic nondestructive testing methods that will allow replacement of sensors and electronics of 3MA testing equipment.

Three approaches are considered. All approaches were integrated into the modular measurement systems (mms) developed at IZFP and validated for applications of industrial relevance. We could establish calibration procedures that allowed the replacement of components of the measurement system. Additionally, we could use calibration data of the component geometry. For example, we could identify measurement quantities that allow the application of calibration data of flat specimen a specimen with convex or concave measuring geometries. Furthermore, the polynomial approximation of the measurement quantity space (one of the approaches) for flat specimen could be transferred to specimen with convex and concave measuring points.

KURZFASSUNG

Die zerstörungsfreie Werkstoffcharakterisierung erlangt wegen der in der Industrie stetig steigenden Materialanforderungen immer größere Bedeutung, da sich durch sie Produktionsabläufe überwachen, steuern und sichern lassen, ohne das produzierte Werkstück zerstören zu müssen. Die elektromagnetischen zerstörungsfreien Prüfverfahren bieten hierbei zum Beispiel eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Werkstoffcharakterisierung an ferromagnetischen Materialien. Die quantitative Bestimmung von Werkstoffkenngrößen basiert wie bei vielen elektromagnetischen Prüftechnologien auch bei dem am Fraunhofer IZFP entwickelten 3MA-Prüfsystem (Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) auf einer Kalibrierung. Die Kalibrierungen werden auf der Basis von Regressions- und Mustererkennungsmethoden mit Hilfe von bezüglich der Zielgröße abgestuften Kalibrierprobensätzen erstellt. Da bei der Kalibrierung elektromagnetischer, zerstörungsfreier Prüfverfahren ungewollt und kaum vermeidbar nicht nur Abhängigkeiten von den Kalibrierprobensätzen sondern auch von der verwendeten Sensorik und Prüfelektronik mit aufgenommen werden, können nach einem Austausch einer dieser Komponenten Fehler bei der Werkstoffcharakterisierung auftreten. Deshalb befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Ermittlung, Untersuchung und Umsetzung praxisnaher Lösungswege zur sensor- und geräteunabhängigen beziehungsweise übertragbaren Kalibrierung von elektromagnetischen, zerstörungsfreien Prüfverfahren am Beispiel der 3MA-Prüftechnik.

Es konnten im Rahmen dieser Arbeit folgende Lösungswege ermittelt werden: Verwendung von Differenz-Prüfgrößen, polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes und Optimierung durch genetische Algorithmen. Anschließend wurden alle Lösungswege in das am IZFP entwickelte Modulare Messsystem (mms) integriert und an Applikationen aus der industriellen Praxis und Forschung validiert. Die Verwendung von Differenz-Prüfgrößen und die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes zeigten hierbei die besten Ergebnisse. Mit Hilfe dieser beiden Ansätze konnte eine Vorgehensweise entwickelt werden, die eine Anpassung von Kalibrierungen nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch ermöglicht. Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Geometrieunabhängigkeit beziehungsweise Übertragbarkeit von elektromagnetischen Kalibrierungen des 3MA-Prüfsystems durchgeführt. Hier konnten Prüfgrößen gefunden werden, durch die eine an ebenen Proben ermittelte Kalibrierung auch an Proben mit konkaven und konvexen Messstellen anwendbar ist. Darüber hinaus konnte die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes zur Anpassung der Kalibrierung an den ebenen Proben auf Proben mit entweder konkaver oder konvexer Messstelle übertragen werden. Sowohl die Kalibrierung ohne als auch die Kalibrierungen mit Anpassung lieferten an den gekrümmten und ebenen Proben Genauigkeiten äquivalent zur Kalibrierung für ausschließlich ebene Proben.

ABSTRACT

Constantly increasing material requirements of the industry regarding nondestructive material characterization continue to gain significance because production processes can be monitored and controlled without any influence on product properties. Electromagnetic nondestructive testing methods, for example, offer opportunities for characterization of ferromagnetic materials. Like many other electromagnetic testing technologies, the quantitative determination of the material parameters with the 3MA (Micro-magnetic Multi-parameter Micro-structure- and Stress-Analysis) testing system developed at Fraunhofer IZFP requires calibration procedures on appropriate sets of calibration samples based on regression and pattern recognition methods. Since the calibrated parameter settings of electromagnetic nondestructive testing methods depend on both test sample properties and instrument (sensor characteristics and electronics). Any change of instrument may cause measurement errors. Therefore, this thesis deals with the determination, analysis and implementation of calibration procedures for electromagnetic nondestructive testing methods that will allow replacement of sensors and electronics of 3MA testing equipment.

The following approaches are considered: the use of differential measurement quantities, the polynomial approximation of measurement quantity space and optimization by genetic algorithms. All approaches were integrated into the modular measurement systems (mms) developed at IZFP and validated for applications of industrial relevance. The use of differential measurement quantities and polynomial approximation of the measurement quantity space have shown best results. We could establish calibration procedures that allowed the replacement of components of the measurement system. Additionally, we could use calibration data of the component geometry. For example, we could identify measurement quantities that allow the application of calibration data of flat specimen a specimen with convex or concave measuring geometries. Furthermore, the polynomial approximation of the measurement quantity space for flat specimen could be transferred to specimen with convex and concave measuring points.

FORMELZEICHEN, ABKÜRZUNGEN, NOMENKLATUR

| | | |
|----------------|---|------------------------|
| H | magnetische Feldstärke | [A/m] |
| B | magnetische Flussdichte | [Vs/m ² =T] |
| μ | Permeabilität, $\mu = \mu_0 \mu_r$; $\mu = \frac{dB}{dH}$ | [Vs/Am] |
| μ_0 | Permeabilität des Vakuums, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ | [Vs/Am] |
| μ_r | Permeabilität des Mediums | |
| σ | spezifische elektrische Leitfähigkeit | [1/(Ω m)] |
| Z | elektrische Impedanz | [Ω] |
| σ | Standardabweichung, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \hat{x})^2}$ | |
| R | Korrelationskoeffizient | |
| R ² | Bestimmtheitsmaß | |
| T | Toleranz, $T = 1 - R^2$ | |
| MSE | Mittlerer quadratischer Fehler (engl.: mean square error), $MSE = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k (\hat{f}_t - f_t)^2$ | |
| RMSE | Standardfehler (engl.: root mean square error), $RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k (\hat{f}_t - f_t)^2}$ | |
| PG | elektromagnetische Prüfgröße | |
| ZG | Zielgröße (mechanisch-technologische Kenngröße) | |
| KDB | Kalibrierdatenbank | |
| NaN | Keine Zahlenangabe möglich (engl.: not a number) | |
| undef | Anteil der nicht zu charakterisierenden Messungen | [%] |
| RA | Restaustenitgehalt | [%] |

| | |
|----------------|--------------------------------|
| ebene Proben | Proben mit ebener Messstelle |
| konkave Proben | Proben mit konkaver Messstelle |
| konvexe Proben | Proben mit konvexer Messstelle |

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 14 |
| 2 | Motivation / Ziele | 15 |
| 3 | Stand der Technik | 20 |
| 3.1 | Grundlagen des Ferromagnetismus | 20 |
| 3.1.1 | Magnetische Hysterese | 22 |
| 3.2 | Zerstörungsfreie elektromagnetische Prüfverfahren | 24 |
| 3.2.1 | Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke | 24 |
| 3.2.2 | Magnetische Barkhausen-Rausch-Analyse | 26 |
| 3.2.3 | Überlagerungspermeabilität | 28 |
| 3.2.4 | Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse | 29 |
| 3.3 | Das 3MA-Prüfsystem | 31 |
| 3.3.1 | Sensorik der elektromagnetischen 3MA-Prüfung | 35 |
| 3.3.2 | Kalibrierung des elektromagnetischen 3MA-Prüfsystems | 38 |
| 3.3.2.1 | <i>Prüfgrößenraumanalyse – Orthogonalität des Prüfgrößenraumes</i> | 39 |
| 3.3.2.2 | <i>Regressionsanalyse</i> | 43 |
| 3.3.2.2.1 | <i>Lineare Regressionsanalyse</i> | 44 |
| 3.3.2.2.2 | <i>Schrittweise Vorwärts-Regression</i> | 45 |
| 3.3.2.2.3 | <i>Annahmen der Regressionsanalyse</i> | 46 |
| 3.3.2.3 | <i>Mustererkennung</i> | 47 |
| 3.3.2.3.1 | <i>Normierung der Prüfgrößen</i> | 47 |
| 3.3.2.3.2 | <i>Bildung der Normierungsfaktoren</i> | 47 |
| 3.3.2.3.3 | <i>Nearest Neighbor-Suche</i> | 48 |
| 3.3.2.3.4 | <i>Nearest Neighbor-Algorithmus</i> | 49 |
| 3.3.2.3.5 | <i>Ergebnisbildung aus den nächsten Nachbarn</i> | 50 |
| 3.3.3 | Prüferfahrung bei Anwendung des 3MA-Prüfsystems | 53 |
| 3.3.3.1 | <i>Einflüsse von Werkstoffparametern auf die 3MA-Prüfgrößen</i> | 53 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.3.3.2 | <i>Untersuchungen zum Einfluss eines Prüfsystemkomponenten- austausches auf die Kalibrierung</i> | 56 |
| 3.3.3.3 | <i>Untersuchungen zum Einfluss eines Prüfsystemkomponenten- austausches auf die elektromagnetischen Prüfgrößen</i> | 72 |
| 3.3.3.3.1 | <i>Einfluss eines Sensoraustausches auf die Prüfgrößen</i> | 72 |
| 3.3.3.3.2 | <i>Einfluss eines Geräte austausches auf die Prüfgrößen</i> | 77 |
| 3.3.3.4 | <i>Schlussfolgerungen aus den Einflussuntersuchungen</i> | 82 |
| 4 | Lösungswege zur Einflussminimierung bei Prüfsystem- komponentenaustausch | 85 |
| 4.1 | Voruntersuchungen zum Einfluss der Prüfgrößenwerte auf die Zielgrößenbestimmung | 86 |
| 4.2 | Anpassung durch Verwendung von Differenz-Prüfgrößen | 91 |
| 4.3 | Anpassung durch polynomiale Approximation | 95 |
| 4.3.1 | Probenauswahl ausgehend vom Prüfgrößenraum | 95 |
| 4.3.2 | Probenauswahl ausgehend vom Zielgrößenbereich | 96 |
| 4.3.3 | Polynomiale Approximation zur Prüfgrößenraumanpassung | 97 |
| 4.3.3.1 | <i>Prüfgrößeneinschränkung / Prüfgrößenwichtung</i> | 103 |
| 4.4 | Anpassung über eine Optimierung durch genetische Algorithmen | 106 |
| 4.4.1 | Gewichtsoptimierung durch genetische Algorithmen | 108 |
| 4.4.2 | Erprobung der Gewichtsoptimierung | 108 |
| 4.4.3 | Fehlerbewertung der Gewichtsoptimierung | 109 |
| 4.4.4 | Populationsanpassung der Gewichtsoptimierung | 109 |
| 4.4.5 | Erzeugen des neuen Elements im Gen-Pool | 110 |
| 5 | Umsetzung der Lösungswege | 111 |
| 5.1 | Anpassung mittels Differenzprüfgrößen | 111 |
| 5.2 | Anpassung mittels polynomialer Approximation | 123 |
| 5.3 | Anpassung mittels genetischer Algorithmen | 140 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.4 | Übertragbarkeit der Lösungswege auf die Geometrieunabhängigkeit der Kalibrierung | 145 |
| 5.5 | Bewertung der Lösungswege | 154 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 160 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 163 |

1 Einleitung

Die Prüfung von Werkstoffen, die Charakterisierung ihrer Eigenschaften sowie die Beschreibung ihrer Zusammensetzung und Struktur erlangt einen immer wichtigeren Stellenwert in der industriellen Produktion. Nur durch eine zuverlässige und gesicherte Werkstoffprüfung kann bei der Fertigung von Werkstoffen die Qualität fertiger Erzeugnisse sichergestellt werden. Viele dieser Werkstoffprüfungen basieren in der Regel darauf, dass im Fertigungsprozess definierte Materialproben hergestellt oder aus Bauteilen zerstörend entnommen beziehungsweise die Bauteile selbst zerstört werden müssen. Es existieren aber auch Werkstoffprüfungen, die ohne Zerstörung des zu prüfenden Bauteils beziehungsweise ohne zerstörende Probenentnahme aus dem Bauteil auskommen. Diese zerstörungsfreien Prüfverfahren erlangen gegenüber den klassischen zerstörenden Prüfverfahren durch die immer anspruchsvolleren Anforderungen an Materialien beziehungsweise den daraus gefertigten Werkstücken und den dadurch hervorgerufenen erhöhten Kosten immer größere Bedeutung. Mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren lassen sich Produktionsabläufe überwachen, steuern und sichern ohne das produzierte Werkstück zerstören zu müssen und ohne die Produktionsabläufe zu verlangsamen. Steigende Präzisions- und Belastbarkeitsanforderungen an die produzierten Bauteile und der damit verbundene große Aufwand für die Qualitätssicherung der Produktion machen die enorme Bedeutung und das Potenzial von zerstörungsfreien Prüfverfahren deutlich.

Eines der ältesten und naheliegendsten zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die Sichtprüfung eines Bauteiles durch ausführliche und intensive Betrachtung des Prüflings auf äußerlich erkennbare Fehler. Um die im Material verborgenen Strukturen und Eigenschaften der Werkstoffe mit zerstörungsfreien Verfahren erfassen zu können, werden in der Regel Verfahren auf Basis der Wechselwirkung unterschiedlicher Energieformen mit dem Material verwendet, beispielsweise die Absorption, Reflexion, Ausbreitung und Streuung von Strahlen und Wellen oder der Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern. Eines der zerstörungsfreien Prüfverfahren, das auf die Wechselwirkung des Bauteils mit elektromagnetischen Feldern beruht, ist die 3MA-Prüftechnologie (Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse). Die 3MA-Prüftechnologie ist am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) entwickelt worden und kombiniert vier elektromagnetische Prüfverfahren in einem Prüfsystem (siehe Kapitel 3.3). Sie basiert wie viele quantitative zerstörungsfreie Prüfverfahren auf einer Kalibrierung [EmgAu2008, Först2005], die mit Hilfe von Kalibrierproben generiert wird (siehe Kapitel 3.3.2). Die Kalibrierung wird durch Messungen an Kalibrierproben mit bekannten Referenzwerten aufgebaut.

2 Motivation / Ziele

Wie aus dem Akronym 3MA deutlich wird, handelt es sich bei diesem elektromagnetischen zerstörungsfreien Prüfverfahren um einen Multiparameteransatz. Dieser Multiparameteransatz wird benötigt, um aus den Messungen an den Kalibrierproben möglichst gute Kalibrieransätze filtern zu können. Um dieses Mehrparameterproblem lösen zu können, werden in den elektromagnetischen Prüfgeräten des IZFPs Kalibrieransätze auf der Basis von Regressions- und Mustererkennungsmethoden (siehe Kapitel 3.3.2) verwendet. Mit Hilfe dieser Methoden wird anhand von zerstörungsfrei aufgenommenen Prüfgrößenwerten der Wert von mechanisch-technologischen Kenngrößen (Zielgrößen) ermittelt. Zusätzlich wird durch derartige Methoden versucht, Störeinflüsse wie zum Beispiel Unsicherheiten in den zerstörungsfreien Prüfgrößen bei der Lösung dieses inversen (Zielgrößenbestimmungs-) Problems [Inver2002, Taran2005, Heinz1996] zu minimieren. Durch dieses Vorgehen werden selbst schwache Korrelationen in den Prüfgrößen gefunden und zur Zielgrößenbestimmung verwendet. Da hierfür stets mehrere Prüfgrößen in Kombination verwendet werden (Multiparameteransatz), sind vereinzelte Prüfgrößenschwankungen kompensierbar, wenn ebenfalls gegenläufigen Abweichungen in anderen Prüfgrößen vorhanden sind. Allgemein sind derartige inverse Probleme aus messphysikalischer Sicht nur schwer zu lösen und benötigen oftmals zusätzliche Modelle, um gelöst zu werden [Inver2002, Taran2005, Heinz1996]. So ist zum Beispiel bei medizinischen Computertomografien und Ultraschalluntersuchungen ein ausgeprägtes Wissen und Verständnis über den Aufbau und die einzelnen Schichten des menschlichen Körpers Voraussetzung zur korrekten Auslegung derartiger tomografischer Messungen [Natte2001, Wübbe2001]. Ähnlich verhält es sich bei Fragestellungen aus dem Bauwesen [KurzJ2006], der Mikrowellenprüftechnik [Pinch2007, PincR2007] und aus dem geophysikalischen Bereich. Dort treten unter anderem im Bereich der Seismologie inverse Probleme auf, wenn man zum Beispiel aus den gemessenen Signalen eines Erdbebens Eigenschaften des Erdinneren ableiten möchte [AkiRi1980, Biond2003, Biond2006]. Dem messphysikalischen inversen Problem bei der zerstörungsfreien 3MA-Prüfung ist zusätzlich noch eine technische Problematik bei Prüfsystemkomponentendefekt, -verschleiß, -austausch oder bei der Parallelisierung der Prüfaufgabe auf mehrere Standorte überlagert. Erfahrungsgemäß hängt eine Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems nicht nur von den Kalibrierproben und deren Werkstoffeigenschaften ab. Es können ebenfalls ungewollt und kaum vermeidbar Abhängigkeiten in die Kalibrierung einfließen, die von dem verwendeten Prüfsystem herrühren (siehe Kapitel 3.3.3.1 und 3.3.3.3) [Sziel2009]. Dieser geräte- beziehungsweise sensorspezifische Einfluss auf die Kalibrierung lässt sich auf ebenfalls kaum vermeidbare Bauteil-, Einbau-, Auslegungs- und Abgleichtoleranzen zurückführen. In [Sziel2009] wurde unter anderem versucht, die Toleranzen der Hardwarekomponenten durch Verwendung von neuen Komponenten und Software-Konzepten bei der Entwicklung eines Prüfgerätes zu berücksichtigen. Aus dieser

Arbeit entstand 2009 das am IZFP entwickelte MikroMach-Prüfsystem (Mikromagnetische Materialcharakterisierung), welches einer niedrigerfrequenten, miniaturisierten Variante des 3MA-Prüfsystems entspricht. Das MikroMach-Prüfsystem vereint im Unterschied zu dem 3MA-Prüfsystem Sensor und Prüfgerät in einem Gehäuse. Aber auch an diesem mit neuester Technik ausgestatteten Prüfsystem können kleinste Veränderungen (Verschleiß, Defekt, usw.) aufgrund der Komplexität der Prüfaufgabe und des Mehrparameterproblems zu einer Verschlechterung der Prüfergebnisse bei Verwendung des Kalibrierdatensatzes führen.

In **Anwendung 1: Oberflächenhärtebestimmung an Härtevergleichsplatten** werden die Abhängigkeiten, die in einer Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems vorhanden sein können, verdeutlicht. Diese 3MA-Kalibrierung wurde durch Messungen an sogenannten Härtevergleichsplatten aufgebaut. Bei den Härtevergleichsplatten handelt es sich um dreieckige Flachproben mit einer Kantenlänge von jeweils 70 mm und einer Dicke von 6 mm (siehe Abb. 1 rechts). Zum Aufbau der Kalibrierung wurden mit einem 3MA-Standard-Sensor (V) und einem 3MA-Prüfgerät Messungen an neun Härtevergleichsplatten mit bekannten Oberflächenhärtewerten aufgenommen. Anschließend wurde aus der so gewonnenen Datenbasis bestehend aus den elektromagnetischen Prüfgrößen und den korrespondierenden Oberflächenhärtewerten eine Kalibrierung aufgebaut. Hierfür wurde mit Hilfe einer Regressionsanalyse aus der Datenbasis ein Polynom gebildet (siehe Kapitel 3.3.2.2). Dieses Polynom erfasst den Prüfgrößen-Zielgrößen-Zusammenhang und ermöglicht somit eine Oberflächenhärteprüfung an Härtevergleichsplatten. Nach der Ermittlung des Kalibrierpolynoms wurden die elektromagnetischen Messungen des zur Kalibrierung verwendeten 3MA-Standard-Sensors und die Messungen mehrerer anderer 3MA-Standard-Sensoren an den Härtevergleichsplatten auf dieses Polynom angewandt. Die Datenaufnahme mit den Sensoren wurde identisch zu der Kalibrierdatenaufnahme ausgeführt. In Abb. 1 (links) sind die Ergebnisse, die das Kalibrierpolynom bei Anwendung auf mehrere Sensoren zeigt, dargestellt.

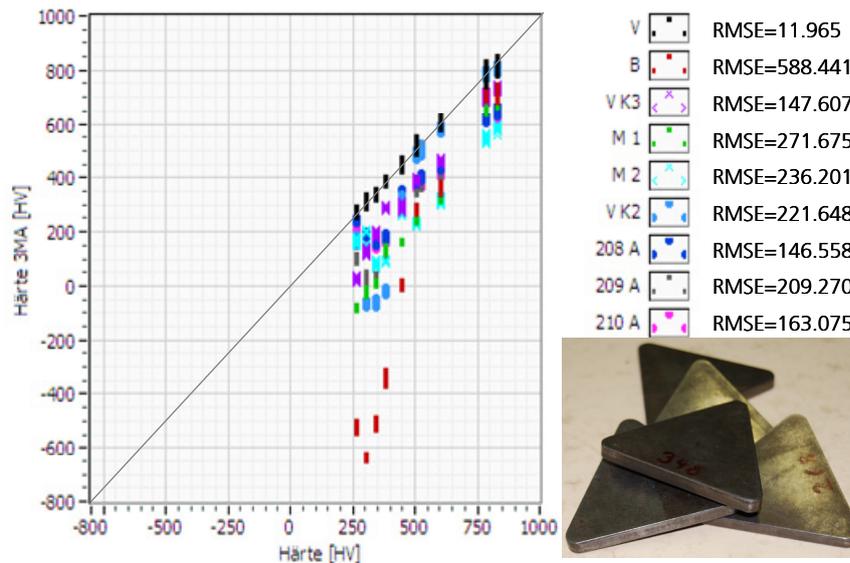


Abb. 1: Links: Ergebnis der Anwendung eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen des 3MA-Standard-Sensors V auf acht weitere 3MA-Standard-Sensoren; rechts: Härtevergleichsplatten

Der Sensor (V), der zur Kalibrierung verwendet wurde, zeigt eine sehr gute Korrelation bezüglich der auf der X-Achse (Abszisse) aufgetragenen, mittels der Härteprüfung nach Vickers ermittelten Referenzwerte und den auf der Y-Achse (Ordinate) aufgetragenen zerstörungsfrei ermittelten Oberflächenhärtewerten. Es zeigt sich aber auch, dass starke Abweichungen bezüglich der Güte der Kalibrierung durch die Anwendung auf andere Sensoren aufgetreten sind. So werden von mehreren 3MA-Standard-Sensoren beispielsweise für einige Härtevergleichsplatten unrealistische, negative Härtewerte ermittelt, wenn das Kalibrierpolynom eines anderen Sensors zur Kalibrierung verwendet wird.

Dies verdeutlicht, dass die elektromagnetische Prüfung sowohl ein exzellentes Potential zur zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung aufweist, aber auch, dass gerade im Hinblick auf die Parallelisierung und Übertragung der Kalibrierung von einem auf den anderen Sensor noch Forschungsbedarf herrscht. Denn die zerstörungsfreie elektromagnetische Werkstoffcharakterisierung und -prüfung muss nicht nur zuverlässig, sondern auch ohne großen Aufwand anwendbar, übertragbar und parallelisierbar sein. So sollten keine Wartezeiten in der Produktion durch Neukalibrierung bei Sensor- oder Prüfgeräteaustausch und Parallelisierung der Prüfaufgabe auf mehrere Standorte stattfinden, sondern es sollte maximal eine kurze, simple und einfache Prozedur erfolgen, die den Sensor- oder Prüfgerätewechsel ermöglicht. Deswegen ist die Austauschbarkeit der Prüfsystemkomponenten beziehungsweise die Unabhängigkeit oder Übertragbarkeit der Kalibrierung von Prüfsystemkomponenten eine wichtige qualitätssichernde Voraussetzung für die weitere Verbreitung, Akzeptanz und den Erfolg der zerstörungsfreien elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und -prüfung in der Industrie (und Forschung). Basierend darauf ergibt sich die Notwendigkeit für eine praxisorientierte, zerstörungsfreie, sensor- und geräteunabhängige beziehungsweise anpassbare

Kalibrierung von elektromagnetischen Prüfverfahren zur Werkstoffcharakterisierung am Beispiel der 3MA-Prüftechnologie.

Diese Kalibrierung muss sowohl das messphysikalische inverse (Zielgrößenbestimmungs-) Problem als auch das überlagerte technische Problem bei Prüfsystemkomponentenaustausch lösen können. Somit werden folgende Anforderungen an diese Kalibrierung gestellt:

- Die Kalibrierung soll im Bereich der geforderten Genauigkeit korrekte Ergebnisse liefern
- Die Kalibrierung soll stabil sein
- Die Kalibrierung soll dauerhaft einsetzbar sein
- Die Kalibrierung soll übertragbar sein, falls Defekte an der Sensorik oder an dem Prüfgerät selbst auftreten und es zu einem Austausch kommt
- Die Kalibrierung soll von einem Prüfsystem auf weitere, äquivalente Prüfsysteme übertragbar sein, falls die Prüfaufgabe an mehreren Produktionsorten beziehungsweise Produktionslinien angewandt werden soll (Parallelisierung)

Diese Anforderungen machen die Ansprüche an ein praxisnah eingesetztes quantitatives, zerstörungsfreies, elektromagnetisches Prüfsystem deutlich. Ein derartiges Prüfsystem sollte die Möglichkeit besitzen, seine Kalibrierung von der verwendeten Sensorik und dem verwendeten Prüfgerät unabhängig oder übertragbar zu machen. Denn ohne diese Möglichkeit würde zum Beispiel ein defektes Prüfgerät beziehungsweise defekter Sensor dafür sorgen, dass die Produktion oder der Laborbetrieb für den Zeitraum der Neuanfertigung der Kalibrierung still stehen oder in diesem Zeitraum ohne eine zerstörungsfreie Qualitätssicherung auskommen müsste. Der damit verbundene zeitliche und finanzielle Aufwand beziehungsweise das damit verbundene Risiko für die Qualitätssicherung stellt ein Hindernis für die quantitative, industrielle Anwendung der zerstörungsfreien elektromagnetischen Prüfverfahren dar.

Eine Unabhängigkeit kann zum einen erreicht werden, indem die Hardware der Geräte und Sensoren austauschbar wird und zum anderen, indem Anpassungsmöglichkeiten geschaffen werden, die praxisnah anwendbar sind. Der Weg über die Austauschbarkeit der Hardware ist in der Regel mit einem großen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. In [Sziel2009] konnte jedoch gezeigt werden, dass auch mit preiswerten Bauteilen ein elektromagnetisches, zerstörungsfreies Prüfsystem aufgebaut werden kann, dessen Abgleich der Elektronik softwareseitig erfolgt. Dadurch, dass der Abgleich der elektronischen Komponenten nicht mehr hardwareseitig durch mechanisch verstellbare Bauteile (zum Beispiel Potentiometer) oder durch toleranzbehaftete Bauteile (zum Beispiel Widerstände) usw. geschieht, wird der Einfluss der Geräteelektronik in diesem Fall minimiert. Der Einfluss der Sensorik hingegen kann nicht durch derartige Maßnahmen minimiert werden. Bei den Sensoren führen kaum vermeidbare

Fertigungs-, Einbau-, und Materialtoleranzen zu den sensorspezifischen Abhängigkeiten in den Kalibrierungen.

Das Ziel dieser Arbeit ist also das Ermitteln, Untersuchen und Umsetzen praxisnaher Anpassungsmöglichkeiten zur sensor- und geräteunabhängigen beziehungsweise -übertragbaren Kalibrierung des zerstörungsfreien elektromagnetischen 3MA-Prüfverfahrens. Die Umsetzung soll durch eine Integration der Anpassungsmöglichkeiten in das modulare Messsystem (mms) geschehen [Sziel2001]. Der Austausch soll durch eine in der Praxis einsetzbare Prozedur umgesetzt und ohne eine vollständige Neukalibrierung des Prüfsystems mit dem ausgetauschten Sensor beziehungsweise Prüfgerät realisiert werden. Zu einer solchen Anpassung müssen die Unterschiede zwischen dem alten und neuen Sensor- beziehungsweise das Prüfgeräteverhalten ermittelt werden. Ein Sensor- oder Prüfgeräteverhalten kann jedoch nicht ermittelt werden, ohne mit dem Sensor oder Prüfgerät Messungen auszuführen. Dieser Sachverhalt führt zwingend zu der Schlussfolgerung, dass eine Sensor- beziehungsweise Prüfgeräteanpassung nur durch vergleichende Messdatenaufnahme zwischen den beiden auszutauschenden Komponenten geschehen kann.

3 Stand der Technik

Für die Anpassung beziehungsweise Übertragung von Kalibrierungen auf der Basis von zerstörungsfreien elektromagnetischen Prüfverfahren ist ein Verständnis für die physikalischen Grundlagen, die verwendeten Prüfverfahren, das verwendete Prüfsystem und die zugrundeliegenden Kalibriermethoden eine wichtige Voraussetzung. In dem folgenden Kapitel werden aus diesem Grund die ferromagnetischen Phänomene und der Stand der Technik bezüglich der verwendeten Prüf- und Kalibrierverfahren sowie bezüglich des 3MA-Prüfsystems näher betrachtet.

3.1 Grundlagen des Ferromagnetismus

Die Voraussetzung für die Anwendung elektromagnetischer beziehungsweise mikromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren ist ein ferromagnetisches Verhalten des zu prüfenden Materials. Solche ferromagnetischen Materialien weisen eine charakteristische Domänenstruktur auf (siehe Abb. 2), wie zum Beispiel die Elemente Eisen, Nickel und Kobalt. Hierbei stellen die Domänen in sich spontan bis zur Sättigung magnetisierte Bereiche dar, die durch sogenannte Bloch-Wände voneinander getrennt sind. Diese Bereiche sind auch als Weiß'sche Bezirke bekannt [Weiss1907]. Ihre Größenordnung liegt zwischen 1 und 4 μm im Durchmesser. Die zugehörigen Bloch-Wände haben eine Ausdehnung von ca. 50 bis 100 nm. Für Eisenwerkstoffe unterscheidet man als Modelvorstellung zwei Arten von Bloch-Wänden. Die 90°-Bloch-Wände, bei denen die Magnetisierungsvektoren zweier benachbarter Domänen parallel ausgerichtet sind, und die 180°-Bloch-Wände, deren zugehörige Nachbardomänen antiparallel ausgerichtet sind (siehe Abb. 2). Die 180°-Bloch-Wände sind im Gegensatz zu den 90°-Bloch-Wänden leichter beweglich, da sie Eigenspannungsfelder mit kurzer Reichweite besitzen.

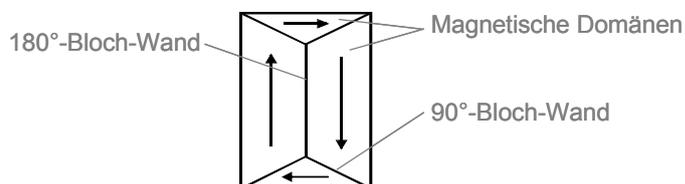


Abb. 2: Ferromagnetische Domänenstruktur in Eisenwerkstoffen

Die Ausrichtung der Magnetisierungsvektoren der Domänen ist über eine ferromagnetische Probe im unmagnetisierten Zustand statistisch so verteilt, dass sich deren Gesamtwirkung vollständig neutralisiert. Eine Erklärung für die spontanen Magnetisierungen der Domänen bietet die Quantenphysik. Die Verantwortung für die spontanen Magnetisierungen trägt die Austauschwechselwirkung der Atome und die damit zusammenhängende Energie

[Heise1928]. Sie ist bestrebt, die atomaren Spins und somit auch die magnetischen Momente in ferromagnetischen Materialien parallel zueinander auszurichten. Durch die parallel ausgerichteten Spins entsteht so ein Zustand minimaler Energie. Dies lässt sich durch Betrachtung der Gesamtenergie eines ferromagnetischen Materials erläutern. Die Gesamtenergie setzt sich aus mehreren Teilenergien zusammen. Eine der darin enthaltenen Teilenergien stellt die Austauschenergie dar. Diese wiederum ist abhängig von dem Verhältnis des Atomabstandes zu dem Radius der unabgeschlossenen Elektronenschale (siehe Abb. 3).

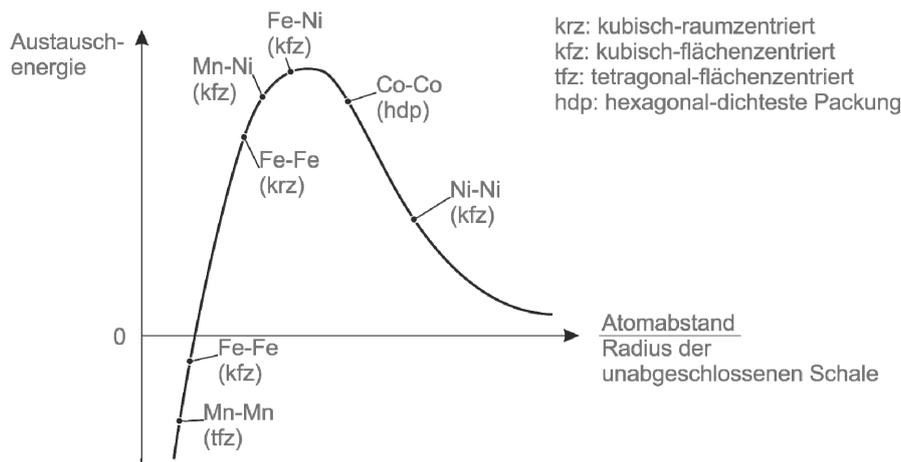


Abb. 3: Die Bethe-Slater-Kurve zeigt die Abhängigkeit der Austauschenergie vom Verhältnis des inter-atomaren Abstandes zum Radius der unabgeschlossenen Elektronenschale

Die Abhängigkeit wird in der Bethe-Slater-Kurve gezeigt [Culli1972]. Im Bereich des Maximums der Bethe-Slater-Kurve ist die Austauschenergie groß genug, um die Ausrichtung der Spins in der Art zu beeinflussen, dass sie sich parallel ausrichten. Bei größer werdenden Atomabständen ist der Einfluss der Austauschenergie zu geringfügig für eine Beeinflussung der Spins. Im Gegensatz dazu tauschen sich die Atome der äußeren, unabgeschlossenen Schale bei geringerem Atomabstand ständig untereinander aus. Laut dem Pauli-Prinzip sind sie dadurch gezwungen, unterschiedliche Spins anzunehmen. Ein derartiges Verhalten wird als antiferromagnetisch bezeichnet. Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass sich die Gesamtenergie eines Ferromagneten zusätzlich noch aus der Anisotropieenergie, einigen makroskopischen Energieanteilen und thermischen Energien zusammensetzt. Die Anisotropieenergie berücksichtigt die Kristallgitterstruktur, die die Magnetisierung in eine bestimmte Richtung begünstigen kann. Diese günstigen Magnetisierungsrichtungen werden als leichte Magnetisierungsrichtungen bezeichnet. Die makroskopischen Energieanteile repräsentieren Energieanteile, die durch vorhandene Streufelder und externe Magnetfelder oder durch elastische Wechselwirkungen wie Spannungen und Magnetostriktion entstehen können. Zu den thermischen Energien sei hier nur so viel gesagt, dass grundsätzlich alle magnetischen Prozesse nur unterhalb der Curie-Temperatur vorhanden sind. Durch Phasenübergänge verlieren Werkstoffe über dieser Temperatur ihre magnetischen Eigenschaften. Für eine nähere

Betrachtung der thermischen Energien wäre eine umfangreiche thermodynamische Analyse notwendig, auf die an dieser Stelle verzichtet wird.

3.1.1 Magnetische Hysterese

Ferromagnetische Materialien richten unter Einwirkung eines externen, magnetischen Feldes die Magnetisierungsvektoren der Domänen in Richtung des externen Magnetfeldes aus. Die Magnetisierung ausgehend vom unmagnetisierten Zustand folgt dabei der sogenannten Neukurve (siehe Abb. 4). Bei einer Wechselfeldmagnetisierung von ferromagnetischen Werkstoffen besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke H und der magnetischen Flussdichte B . Bei zeitlich periodischer Ummagnetisierung reagiert ein ferromagnetisches Material mit einem Hystereseverlauf von B über H , die sogenannte Hysteresekurve (siehe Abb. 4). Der Verlauf der Neukurve entspricht im Bereich der Sättigung dem Verlauf der Hysteresekurve [Knell1962, Culli1972].

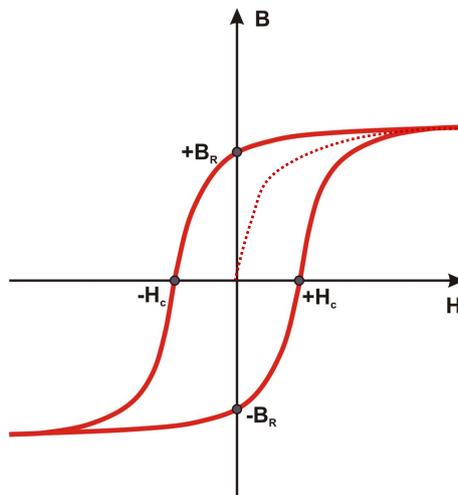


Abb. 4: Beispiel für Hysteresekurve und Neukurve (gepunktet dargestellt) sowie Koerzitivfeldstärke H_c und Remanenzflussdichte B_R

Die Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials wird bei einer gleichbleibenden, periodischen Wechselfeldmagnetisierung nach der Aufmagnetisierung, die entlang der Neukurve verläuft, jede Periode einmal durchlaufen. Der Verlauf der Hysterese beziehungsweise der Ummagnetisierung des ferromagnetischen Materials lässt sich in mehrere Bereiche aufteilen. Zu Beginn der Magnetisierung, also bei einem noch geringen, externen Magnetfeldanteil, breiten sich zunächst die Domänen aus, deren Magnetisierungsvektor Komponenten der Ausrichtung des externen Magnetfeldes aufweist. Das Wachsen dieser Domänen erfolgt durch Bloch-Wand-Bewegungen. Als erstes bewegen sich die 180° -Bloch-Wände, da diese leichter beweglich sind. Die Bewegung dieser 180° -Bloch-Wände erfolgt reversibel. Im weiteren Verlauf der Ummagnetisierung steigt das externe Magnetfeld weiter an, was zu einer zusätzlichen Bewegung der 90° -Bloch-Wände führt. Die Bewegung der beiden Bloch-Wand-Typen erfolgt in diesem Bereich der Hysterese irreversibel. Im darauffolgenden, so genann-

ten Kniebereich der Hysterese, werden hauptsächlich nur noch 90° -Bloch-Wände durch die Einwirkung des externen Magnetfeldes irreversibel verschoben. Nach dem Kniebereich der Hysterese folgt der letzte Teilbereich, in dem aufgrund des externen Magnetfeldes nur noch Drehprozesse auf das ferromagnetische Material einwirken. In diesem Bereich verursacht das noch steigende externe Magnetfeld eine Ausrichtung der magnetischen Momente in Richtung der externen Magnetisierung (siehe Abb. 5). Im Bereich der Sättigung sind die Drehprozesse abgeschlossen und die Magnetisierungsvektoren des Ferromagneten entsprechend parallel zur Magnetisierungsrichtung des externen Magnetfeldes ausgerichtet. In diesem Zustand verhält sich das ferromagnetische Material modellhaft wie eine Domäne mit der Ausrichtung ihres Magnetisierungsvektors entsprechend dem des externen Magnetfeldes. Durch Umkehrung der Magnetisierungsrichtung des externen Feldes nach der Sättigung wird ebenfalls eine Umkehrung des soeben beschriebenen Ablaufs der Bloch-Wand-Bewegungen und der Drehprozesse verursacht.

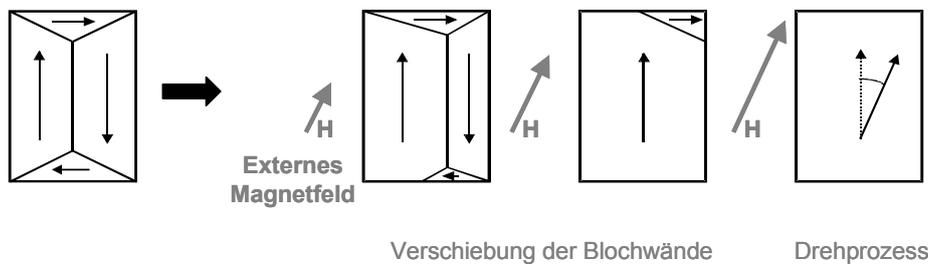


Abb. 5: Domänenstruktur eines ferromagnetischen Materials ohne und unter Einfluss eines steigenden, externen, magnetischen Feldes

Durchläuft die Umkehrung den Nullpunkt bezüglich der Feldstärke, so bleibt in der ferromagnetischen Probe eine Remanenz-Flussdichte B_R zurück. Dieser Restmagnetisierungsanteil wird erst durch den Einfluss eines entgegen gesetzten magnetischen Feldes der Größe H_C aufgehoben. Diese magnetische Feldstärke wird Koerzitivfeldstärke H_C genannt.

Die Bewegungen der Blochwände laufen bei dem kompletten Magnetisierungsvorgang nicht stetig, sondern sprunghaft ab. Dies ist auf die Wechselwirkung der Bloch-Wände mit der vorhandenen Mikrostruktur des Ferromagneten zurückzuführen. Die Bloch-Wand-Bewegungen werden durch vorhandene Gitterdefekte gestoppt beziehungsweise aufgehalten (pinning), bis der Einfluss des externen Magnetfeldes zu groß ist. Bis zu diesem Zeitpunkt stellen die Gitterdefekte wie Korngrenzen, Versetzungen und Ausscheidungen ein energetisches Minimum für die Bloch-Wände dar. Der Einfluss des externen Magnetfeldes ist dann zu groß, wenn das energetische Minimum von dem externen Feld überwunden wurde [Knell1962, Culli1972]. Dadurch entsteht ein sprunghaftes Losreißen der Bloch-Wände. Dieses Losreißen der Bloch-Wände wird als Barkhausen-Sprung bezeichnet.

3.2 Zerstörungsfreie elektromagnetische Prüfverfahren

Bei periodischer Ummagnetisierung ändert sich die Flussdichte gemäß der Hystereseurve. Für die zerstörungsfreie elektromagnetische Prüfung nutzt man die Zusammenhänge zwischen mechanischen und magnetischen Eigenschaften. Zum Beispiel korreliert die Koerzitivfeldstärke H_C häufig gut mit der mechanischen Härte. Die Remanenzflussdichte B_R und die Fläche in der Hystereseurve ergeben weitere Prüfgrößen für die zerstörungsfreie Prüfung.

In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten zerstörungsfreien elektromagnetischen Prüfverfahren näher erläutert. Es handelt sich um die Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke, die Analyse des magnetischen Barkhausen-Rauschens und die Analyse der Überlagerungspermeabilität. Diese drei Verfahren setzen für ihre Anwendung eine Ummagnetisierung des zu analysierenden Bereichs der Probe voraus. Das vierte im Folgenden erläuterte Verfahren, die Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse, benötigt keine Ummagnetisierung des Analysebereichs der Probe.

3.2.1 Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke

Bei der sinusförmigen Wechselfeldmagnetisierung eines ferromagnetischen Materials verursacht die Nichtlinearität der ferromagnetischen Hysterese im Signal der Tangentialfeldstärke neben der Grundschwingung ausgeprägte Oberwellenanteile (harmonische Schwingungen), die durch den nichtlinearen magnetischen Widerstand des Messobjekts hervorgerufen werden. Daher lässt eine Analyse der bei der Wechselfeldmagnetisierung auftretenden Oberwellenanteile Rückschlüsse auf die ferromagnetischen Eigenschaften des zu prüfenden Werkstoffs zu. Der Oberwellenanteil in dem Zeitsignal der Tangentialfeldstärke hängt dabei vom Verhältnis des ohmschen Widerstandes zum induktiven Widerstand des Magnetisierungskreises ab. Der Anteil der harmonischen Schwingungen in dem tangentialen Feld lässt sich mit Hilfe von Fourier-Transformationen bestimmen. Abb. 6 zeigt den Verlauf des oberwellenbehafteten beziehungsweise verzerrten Gesamtsignals der tangentialen magnetischen Feldstärke bei der Ummagnetisierung einer ferromagnetischen Probe und deren Grund- und Oberwellen-Anteile.

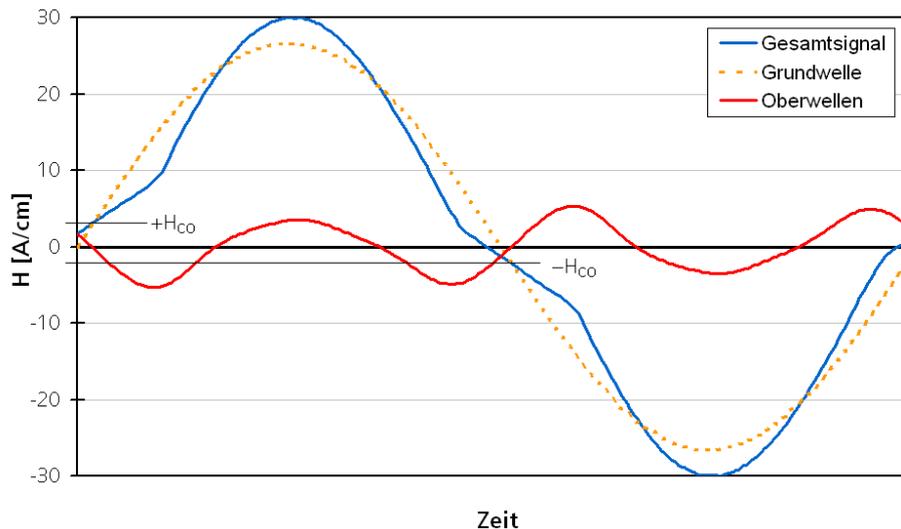


Abb. 6: Exemplarischer Verlauf einer verzerrten Wechselfeldmagnetisierung (Gesamtsignale) einer ferromagnetischen Probe bei periodischer Ummagnetisierung sowie deren beiden Bestandteile die Grundwelle (unverzerrtes Ursprungssignal) und der Oberwellenanteil

Im Verlauf des Oberwellenanteils wird eine charakteristische Nullstelle deutlich. Durch diese erste Nullstelle des Oberwellensignals nach dem Nulldurchgang des Gesamtsignals ist der Koerzitivfeldstärkewert abgeleitet aus der Oberwellenanalyse definiert (siehe Abb. 6). An diesem Punkt nach der Remanenz ist der Feldstärkewert des Gesamtsignals proportional zu dem Koerzitivfeldstärkewert der magnetischen Hysterese. Die Ausprägung des Oberwellenanteils ist von der Auslegung der verwendeten Magnetisierungsvorrichtung und dem werkstoffspezifischen Verhalten der magnetischen Hysterese des zu prüfenden Materials abhängig. Dies ermöglicht es, Rückschlüsse aus den Signalen der Oberwellenanalyse auf das Mikrogefüge des zu prüfenden Materials zu ziehen [Dobma1988, Pitsc1990]. Als weitere aus den Signalen der Oberwellenanalyse abgeleitete Größen dienen die Amplituden und Phasenverschiebungen bezüglich der Grundwelle der einzelnen Oberwellenanteile. Aufgrund der Symmetrie der Hysterese treten nur Oberwellenanteile mit ungerader Ordnung auf. Als Maß für den Anteil an nichtlinearen Verzerrungen in dem Gesamtsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke kann der Klirrfaktor K unter Zuhilfenahme der Amplituden der ersten (A_1), dritten (A_3), fünften (A_5), und siebten (A_7) Oberwelle wie folgt berechnet werden.

$$K [\%] = 100 \cdot \sqrt{\frac{|A_3|^2 + |A_5|^2 + |A_7|^2}{|A_1|^2}} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Der Klirrfaktor ermittelt das prozentuale Verhältnis der Oberwellenanteile zur Grundwelle [Pitsc1990].

3.2.2 Magnetische Barkhausen-Rausch-Analyse

Die magnetische Barkhausen-Rausch-Analyse basiert auf einer Entdeckung von Heinrich Georg Barkhausen [Barkh1919]. Die für ihre Anwendung notwendige Ummagnetisierung ferromagnetischer Werkstoffe und dem dadurch bedingten Durchsteuern der magnetischen Hysterese erfolgt zu einem Großteil durch Bloch-Wand-Bewegungen. Dies sorgt dafür, dass der Verlauf der magnetischen Hysterese nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft ist (siehe Abb. 7 oben). Die Bloch-Wand-Bewegungen werden durch die Wechselwirkung der Blochwände mit Gitterdefekten, Versetzungen, Korngrenzen, Ausscheidungen und Spannungsfeldern beeinflusst. Die sprunghafte Beeinflussung erfolgt durch das ebenfalls sprunghafte Losreißen der Blochwände von den Gitterdefekten. Dieses Losreißen verursacht einen sogenannten Barkhausen-Sprung. Diese Sprünge werden vorwiegend von den leichtbeweglichen 180° -Bloch-Wänden durch irreversible Bloch-Wand-Bewegungen hervorgerufen. Sie führen zu sprunghaften lokalen Magnetisierungsänderungen. Diese sprunghaften Magnetisierungsänderungen verursachen in einem magnetinduktiven Aufnehmer (Luftspule, Tonbandkopf, usw.) die Induktion von Spannungs- beziehungsweise Rauschimpulsen. Der Ort der größten Dichte dieser Spannungsimpulse liegt in Bezug auf die magnetische Hysterese in der Umgebung der Koerzitivfeldstärke H_C , da in diesem Bereich die meisten irreversiblen Sprünge der leicht beweglichen 180° -Bloch-Wände stattfinden. Die Spannungsimpulse werden verstärkt, gefiltert und gleichgerichtet. Die Einhüllende des resultierenden hochfrequenten Signals wird als Funktion der Magnetisierungsfeldstärke aufgezeichnet, wobei die sogenannte Barkhausen-Rausch-Profilkurve $M(H)$ entsteht (siehe Abb. 7 unten).

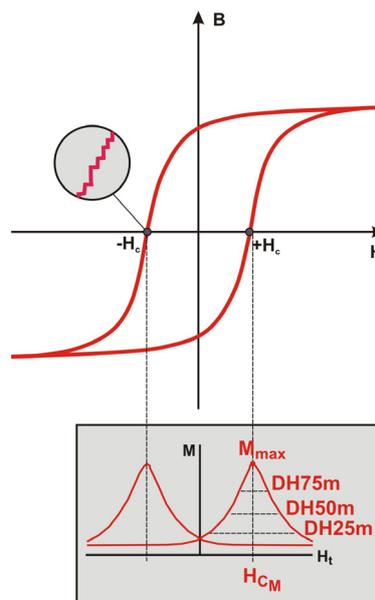


Abb. 7: Schematischer Verlauf der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (unten) mit daraus abgeleiteten Prüfgrößen im Vergleich zur magnetischen Hysteresekurve (oben; Ausschnittsvergrößerung zeigt sprunghaften Verlauf der Hysterese verursacht durch Barkhausen-Sprünge – die sogenannten Barkhausen-Steps)

Das Auftreten der Spannungs- beziehungsweise Rauschimpulse lässt sich mit Hilfe einer Energiebetrachtung der Blochwände erklären. Die freie Energie einer Bloch-Wand ist abhängig von ihrer Lage innerhalb der Mikrostruktur, da sie durch Gitterdefekte beeinflusst wird. In Abb. 8 ist ein Beispiel für den Verlauf des Gradienten der freien Energie bei einer Bloch-Wand-Bewegung dargestellt.

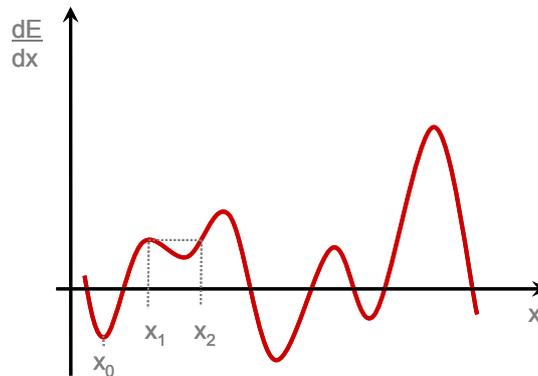


Abb. 8: Beispiel für den Verlauf des Gradienten dE/dx der freien Energie bei einer Bloch-Wand-Bewegung entlang der Koordinate x , die senkrecht zur Wandfläche steht.

Ohne Einwirkung eines externen Magnetfeldes liegt die Wand an der Stelle x_0 in einem stabilen Gleichgewicht. Bei ansteigendem externen Feld wird die Wand zunächst bis zum Punkt x_1 reversibel verschoben. In diesem Punkt zeigt der Energiegradient ein Maximum, was im Anschluss daran ein Vorzeichenwechsel der Steigung des Gradienten bedingt. Diese negative Gradientensteigung steht für instabile Wandlagen [Knell1962]. Die Wand sucht eine stabile Lage und springt irreversibel ohne weiteren Anstieg des externen Feldes zur Position x_2 . Der so ausgeführte Barkhausen-Sprung verursacht die Induktion von Wirbelströmen, hervorgerufen durch die lokale Änderung des magnetischen Flusses. Durch Diffusion der Wirbelströme an die Oberfläche des Werkstücks werden im magnetinduktiven Aufnehmer Rauschimpulse verursacht. Das detektierte Rauschen setzt sich aus der Superposition von Spannungsimpulsen mehrerer breitbandiger Einzelereignisse zusammen. Dieses so detektierte breitbandige Frequenzspektrum kann in unterschiedlichen Analysierfrequenzbereichen gefiltert werden, womit eine unterschiedliche Wechselwirkungstiefe des Verfahrens erreicht wird.

Als Prüfgrößen können unter anderem das Maximum M_{MAX} der Barkhausen-Rauschkurve und die aus dem magnetischen Barkhausen-Rauschen abgeleitete Koerzitivfeldstärke H_{CM} genutzt werden. Des Weiteren können ebenfalls die Kurvenaufweitungen bei bestimmten prozentualen Werten (zum Beispiel 25 %, 50 % und 75 %) des Maximums der Barkhausen-Rauschamplitude als Messgrößen genutzt werden.

3.2.3 Überlagerungspermeabilität

Mit dem Verfahren der Überlagerungspermeabilität kann durch kleine überlagerte Magnetfeldanregungen der reversible Anteil der momentanen Magnetisierungsänderung erfasst werden. Das Messprinzip der Überlagerungspermeabilität basiert auf der Wirbelstromprüftechnik. Es ist bei der hier beschriebenen Auswertung der Überlagerungspermeabilität ein Ummagnetisieren des Werkstoffes erforderlich. Es lassen sich aber auch Auswertungen der Überlagerungspermeabilität bei einer Gleichfeldmagnetisierung und überlagertes Wechsel-feldmagnetisierung ausführen. Durch den Gleichfeldanteil wird der Arbeitspunkt innerhalb der magnetischen Hysterese bestimmt, indem durch das überlagerte Wechselfeld eine Innenschleife innerhalb der Hysterese durchlaufen wird. Dabei ist der Wert der Überlagerungspermeabilität durch das Verhältnis der magnetischen Flussdichteänderung zur magnetischen Feldstärkeänderung, welche infolge der überlagerten Wechselfeldmagnetisierung entstehen, definiert. Dies entspricht der Steigung der durch das überlagerte Wechselfeld entstandenen Innenschleife. Ein qualitatives Maß für die Überlagerungspermeabilität über den gesamten Hysteresebereich ergibt sich, indem man dem sinusförmigen Erregerfeld ein höherfrequentes magnetisches Wechselfeld überlagert, so dass über den gesamten Verlauf der Hysterese eine Auswertung der Überlagerungspermeabilität erfolgen kann. Dazu muss das überlagerte Wechselfeld mindestens eine Frequenz haben, die um einen Faktor 100 größer ist als die Erregerfrequenz. Dadurch wird sichergestellt, dass in den Arbeitspunkten der Überlagerungspermeabilitätsauswertung das Erregerfeld gegenüber dem überlagerten Wechselfeld als stationär beziehungsweise als fester Arbeitspunkt bezüglich des Erregerfeldes angesehen werden kann. Es entstehen dadurch kleine Innenschleifen der Hysterese - die Hysterese-Loops (siehe Abb. 9 links), deren Fläche bei rein reversiblen Prozessen gegen Null konvergiert. Die Steigung dieser reversibel durchlaufenen Innenschleifen ist ein Maß für die Überlagerungspermeabilität: $\mu_{\Delta} = dB/dH$. Die Messung von μ_{Δ} erfolgt über die aktiv betriebene Abtastspule, wobei deren Impedanz Z proportional zur Steigung der Innenschleifen ist. Somit können die gemessenen Impedanzänderungen in der Spule beim Durchsteuern der Hysterese auf Änderungen von μ_{Δ} zurückgeführt werden. Durch den gegenüber dem Erregerfeld nur geringen Anteil des überlagerten Wechselfeldes wird klar, dass bei der Überlagerungspermeabilität beziehungsweise durch das überlagerte Wechselfeld lediglich reversible Bloch-Wand-Bewegungen ausgelöst beziehungsweise ausgewertet werden.

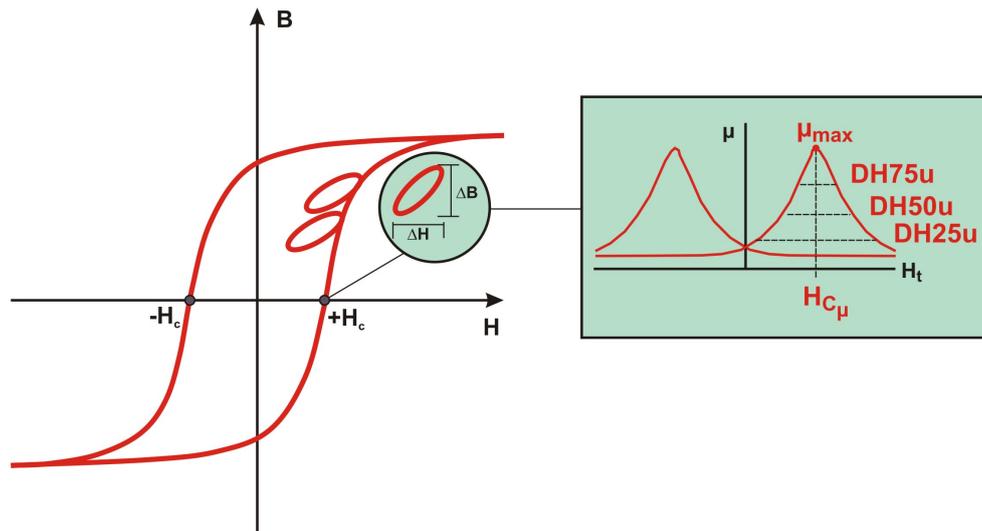


Abb. 9: *Ferromagnetische Hysterese mit zusätzlichen Hysterese-Loops (links) und der aus den Steigungen der Hysterese-Loops abgeleiteten Überlagerungspermeabilitätsprofilkurve $\mu(H)$ (rechts)*

Wird die Überlagerungspermeabilität μ_{Δ} als Funktion der Feldstärke H aufgetragen, ergibt sich der in Abb. 9 (rechts) dargestellte Kurvenverlauf $\mu(H)$. Der Maximalwert $\mu_{\Delta MAX}$ liegt wie bei der Barkhausen-Rausch-Analyse in der Umgebung der Koerzitivfeldstärke, da hier $B(H_{Erreger}) = 0$ gilt. Wie bei der Barkhausen-Rausch-Analyse können auch hier die Kurvenaufweitungen bei bestimmten prozentualen Werten der maximalen Überlagerungspermeabilität und der Wert der maximalen Überlagerungspermeabilität $\mu_{\Delta MAX}$ (μ_{MAX}) als Prüfgrößen genutzt werden. Weiterhin kann auch die aus der Überlagerungspermeabilität abgeleitete Koerzitivfeldstärke $H_{C\mu}$ (H_{CU} , Lage des Maximums der Überlagerungspermeabilität bezogen auf das tangentialen Magnetfeld) als Prüfgröße verwendet werden.

3.2.4 Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse

Die Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse ist ein zerstörungsfreies, elektromagnetisches Prüfverfahren, das zur Anwendung keiner Ummagnetisierung der zu analysierenden Probe bedarf. Das Prinzip der zerstörungsfreien Wirbelstromimpedanzanalyse beruht darauf, dass die Impedanzänderung einer wechselstromdurchflossenen Spule gemessen wird, während sie mit dem zu prüfenden Material in Wechselwirkung gebracht wird. Durch Wechselwirkung des Werkstoffs mit dem sich zeitlich ändernden Magnetfeld, welches durch die wechselstromdurchflossene Spule hervorgerufen wird, bilden sich um die Magnetfeldlinien kreisförmige, in sich geschlossene elektrische Felder. Diese Felder verursachen im Material die sogenannten Wirbelströme (siehe Abb. 10) [Heptn1972]. Voraussetzung ist folglich, dass das zu prüfende Material leitfähig sein muss. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Verfahren ist ein ferromagnetisches Materialverhalten nicht zwingend notwendig. Die Stärke der angeregten Wirbelströme hängt von der Frequenz und Amplitude des Wechselfeldes sowie von der Leitfähigkeit σ und Permeabilität μ der Probe ab. Die begleitenden Magnetfel-

der der Wirbelströme sind dem sie verursachenden Wechselfeld der Spule entgegengerichtet. Dem Primärfeld der wechselstromdurchflossenen Spule wird somit ein durch die Wirbelströme erzeugtes Sekundärfeld entgegengesetzt. Wegen der Induktionswirkung beeinflusst das resultierende Gesamtfeld den Real- und Imaginärteil der an der Spule gemessenen Wechselspannung. Bei Verwendung einer Stromeinprägung ist die gemessene Spulenspannung der Impedanz proportional.

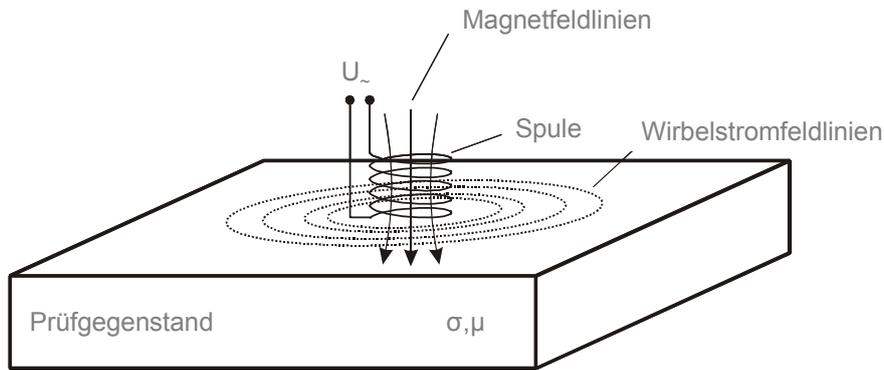


Abb. 10: Messprinzip der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse

Die Mikrostruktur beeinflusst die Wirbelströme durch verschiedenste Wechselwirkungen. Abhängig von den Einflüssen werden unterschiedliche Betrags- und Phasenänderungen der Spulenimpedanz hervorgerufen. Diese können durch Messen der an der stromdurchflossenen Spule anliegenden Spannung ermittelt und in der Impedanzebene beurteilt werden. Die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Wirbelstromimpedanz werden in der Impedanz-Ortskurve durch charakteristische Abweichungen deutlich. Die Impedanz-Ortskurve ergibt sich bei Variation der Prüffrequenz an einem ungestörten Prüfkörper (siehe Abb. 11).

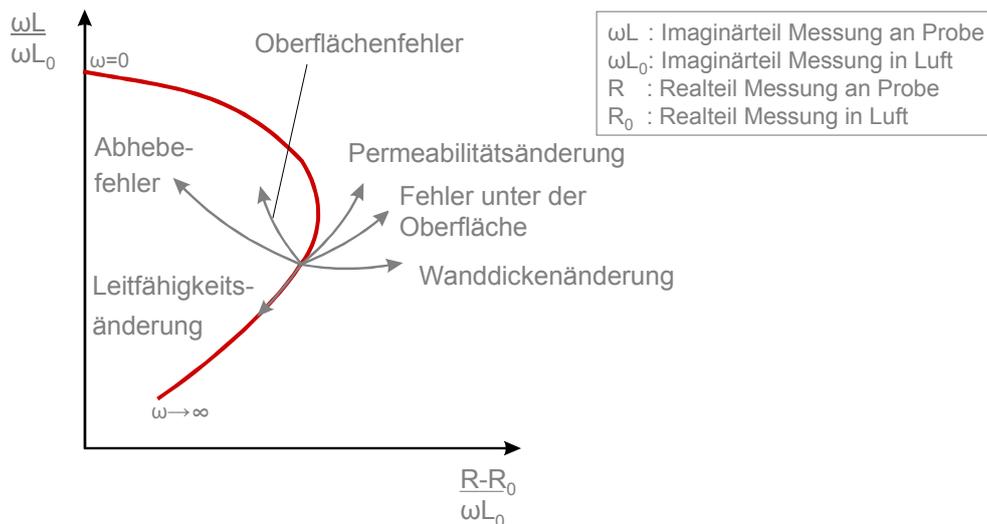


Abb. 11: Verschiebung des Impedanzvektors in der Impedanzebene bei Veränderung unterschiedlicher Einflussparameter (für eine Abtastspule)

Die Analyse der Wirbelstromsensorimpedanz ermöglicht Aussagen über die magnetischen (Permeabilität (μ)) und die elektrischen (Leitfähigkeit (σ)) Werkstoffeigenschaften bezie-

hungswise über eventuell vorhandene Fehler wie Einschlüsse, Risse, Korrosion, usw. des Prüfkörpers (siehe Abb. 11) [Heptn1972].

3.3 Das 3MA-Prüfsystem

Die 3MA-Technologie ist eine modular aufgebaute Kombination der vier zuvor beschriebenen zerstörungsfreier elektromagnetischer Prüfverfahren in einer Prüftechnik. Sie wurde am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) entwickelt und erlaubt eine quantitative und/oder qualitative Bestimmung von Werkstoffkenngrößen oder des Gefügestandes [Altp2002, Altp2010, AltpI2010, Borsu2010, Dobma2000, Dobma2008, DobmG2008, Kröni1996, Kröni1997, Thein1989, Tschu2010, TschR2010, Wolte2004].

Vertrieben wird das 3MA-Prüfsystem von der Firma ITW Test & Measurement GmbH der Reicherter Wolpert Wilson Hardness Group (zuvor von der Firma: C. Stiefelmayer GmbH & Co KG) und dort als QUALIMAX geführt [Herrm2007, Fürst2005, Thein2002]. In der aktuellen VDI/VDE-Richtlinie 2616 „Härteprüfung an metallischen Werkstoffen“ (Stand Juni 2010) wurde die Härteprüfung von ferromagnetischen Werkstoffen mit elektromagnetischen Verfahren am Beispiel der 3MA-, MikroMach- [Sziel2009] und Qualimax-Prüfverfahren [Herrm2007, Fürst2005, Thein2002] unter der Bezeichnung „QEM“ (qualitative elektromagnetische Verfahren) als nicht genormtes, indirektes Prüfverfahren aufgenommen [VDI2010]. Erst in der aktuellen Version der VDI/VDE-Richtlinie (Stand Juni 2010) wurde die Bezeichnung „QEM“ eingeführt, während in der Vorgängerversion (Stand 2002) die Bezeichnung „KEMAG“ (kombinierte elektromagnetische Prüfverfahren) für die elektromagnetischen Verfahren zur Härteprüfung verwendet wurde [Wolte2005, VDI2002].

Die vier elektromagnetischen Prüfverfahren werden in dem 3MA-Prüfsystem im zeitlichen Multiplex hintereinander ausgeführt. Für den Nutzer der 3MA-Prüftechnik ist der Zeitmultiplex der Verfahren transparent, da durch das Auslösen einer 3MA-Messung alle aktiven elektromagnetischen Verfahren ausgeführt werden. Die 3MA-Prüftechnik bietet dabei die Möglichkeit, dass für jedes Verfahren die zugehörigen Messparameter wie die Magnetisierungsfeldstärke, die Filterung, die Verstärkungen, usw. separat eingestellt werden können. Es kann jedes der vier Verfahren für eine 3MA-Messung aktiviert beziehungsweise deaktiviert werden. In Abb. 12 ist ein 3MA-Prüfsystem abgebildet, welches aus einem 3MA-Frontend, einem 3MA-Sensor und einem Laptop zur Ansteuerung des Prüfsystems besteht. Das 3MA-Frontend beinhaltet die zur Anwendung der vier elektromagnetischen Prüfverfahren notwendige Elektronik. Die Kommunikation zwischen dem Steuer-PC (Laptop) und dem 3MA-Frontend erfolgt über eine TCP/IP-Verbindung unter Verwendung des entsprechenden Protokolls. Dies ermöglicht die Netzwerkfähigkeit des 3MA-Prüfsystems. In den Sensor sind die Magnetisierungseinrichtung und verschiedene magnetinduktive Aufnehmer sowie eine Vor-

verstärkerelektronik integriert. Er wird über eine PG¹-Verschraubung mit dem 3MA-Frontend kontaktiert.

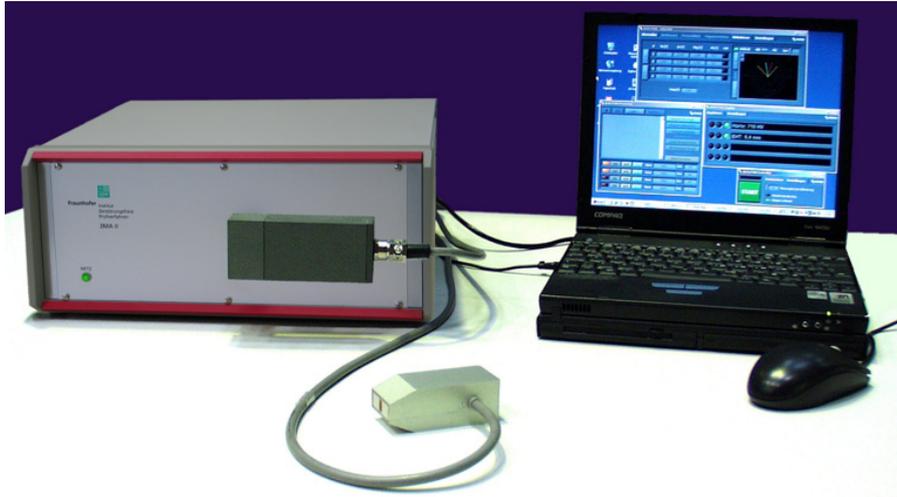


Abb. 12: 3MA-Prüfsystem (links) mit 3MA-Sensor (Vordergrund) und einem Laptop (rechts) zur Ansteuerung des Prüfsystems

Das Akronym 3MA steht für Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Alyse. Die 3MA-Prüftechnik beruht, durch die Anwendung der vier zuvor beschriebenen zerstörungsfreien, elektromagnetischen Prüfverfahren, auf der Auswertung elektrischer und magnetischer Größen, die sich hinsichtlich ihrer Wechselwirkung mit Gefügeparametern wie Härte, Härtetiefe usw. und Spannungsfeldern unterscheiden. Da in den meisten Werkstoffen sowohl Gefügeparameter als auch Spannungsfelder in unterschiedlichen Kombinationen vorliegen können, werden verschiedene elektromagnetische Prüfgrößen benötigt, so dass durch geeignete Verknüpfung der Prüfverfahren Störgrößen wie Gefüge-, Spannungs-, Textur- und Temperatureinflüsse separiert werden können. Ein zusätzlicher Vorteil ist die unterschiedliche Eindringtiefe der einzelnen Verfahren. Die Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse kann durch unterschiedliche Frequenzanregungen Informationen aus unterschiedlichen Tiefenbereichen des Prüflings erhalten. Die aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse abgeleitete Analyse der Überlagerungspermeabilität kann abhängig von der Frequenz der überlagerten Wechselfeldanregung ebenfalls auf unterschiedliche Materialtiefen sensibilisiert werden. Analog dazu kann die Analyse des magnetischen Barkhausen-Rauschens durch die Wahl unterschiedlicher Analysierfrequenzbereiche auf unterschiedliche Informationstiefen eingestellt werden. Im Gegensatz dazu ist die Analysiertiefe der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke lediglich von der verwendeten Magnetisierungsfrequenz abhängig. Dies sorgt dafür, dass dieses Verfahren gegenüber den anderen die größte Informationstiefe aufweist. Das 3MA-Prüfsystem ermög-

¹ PG: Panzerrohrgewinde

licht zusätzlich sogenannte Sweep-Messungen. Darunter sind mehrere hintereinander ausgeführte Messungen unter Variation der Messparameter zu verstehen, die als eine Messreihe interpretiert werden. Dies ermöglicht eine detaillierte Charakterisierung der Probe.

In dem 3MA-Prüfsystem sind also die folgenden zuvor näher erläuterten zerstörungsfreien, elektromagnetischen Prüfverfahren integriert:

- Magnetische Barkhausen-Rausch- Analyse
- Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke
- Überlagerungspermeabilität
- Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse

Aus diesen Prüfverfahren werden folgende Prüfgrößen für das 3MA-Prüfsystem abgeleitet:

| Bezeichnung | Erläuterung |
|-------------|---|
| M_{MAX} | Maximales Signal der Messkurve |
| M_{Mean} | Zeitlicher Mittelwert über eine Periode |
| M_R | Messwert des Signals bei $H_t = 0$ A/cm |
| DH25 | Kurvenaufweitung bei 25% von M_{MAX} |
| DH50m | Kurvenaufweitung bei 50% von M_{MAX} |
| DH75m | Kurvenaufweitung bei 75% von M_{MAX} |
| H_{CM} | Koerzitivfeldstärke (H_t für $M = M_{MAX}$) |

Tabelle 1 : 7 Prüfgrößen aus der magnetischen Barkhausen-Rausch-Analyse

| Bezeichnung | Erläuterung |
|-------------|---|
| A3 | Amplitude der dritten Harmonischen von H_t |
| A5 | Amplitude der fünften Harmonischen von H_t |
| A7 | Amplitude der siebten Harmonischen von H_t |
| P3 | Phase der dritten Harmonischen von H_{A3t} |
| P5 | Phase der fünften Harmonischen von H_{A5t} |
| P7 | Phase der siebten Harmonischen von H_{A7t} |
| H_{CO} | Koerzitivfeldstärke abgeleitet aus dem Oberwellensignal |
| H_{RO} | Oberwellenanteil von H_t im Nulldurchgang |
| UHS | Amplitudensumme der 3., 5., 7., 9. Oberwelle |
| K | Klirrfaktor |
| V_{MAG} | Amplitude der Endstufenspannung |

Tabelle 2 : 11 Prüfgrößen aus der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke

| Bezeichnung | Erläuterung |
|-------------|---|
| U_{MAX} | Maximales Signal der Messkurve |
| U_{MEAN} | Zeitlicher Mittelwert über eine Periode |
| U_R | Messwert des Signals bei $H_t = 0$ A/cm |
| DH25u | Kurvenaufweitung bei 25% von μ_{MAX} |
| DH50u | Kurvenaufweitung bei 50% von μ_{MAX} |
| DH75u | Kurvenaufweitung bei 75% von μ_{MAX} |
| H_{cu} | Koerzitivfeldstärke (H_t für $\mu = \mu_{MAX}$) |

Tabelle 3 : 7 Prüfgrößen der Überlagerungspermeabilität

| Bezeichnung | Erläuterung |
|------------------------|---|
| Re1, Re2, Re3, Re4 | Realteil des WS-Signals bei Frequenz Nr. 1, 2, 3, 4 |
| Im1, Im2, Im3, Im4 | Imaginärteil des WS-Signals bei Frequenz Nr. 1, 2, 3, 4 |
| Mag1, Mag2, Mag3, Mag4 | Betrag des WS-Signals bei Frequenz Nr. 1, 2, 3, 4 |
| Ph1, Ph2, Ph3, Ph4 | Phase des WS-Signals bei Frequenz Nr. 1, 2, 3, 4 |

Tabelle 4 : 16 Prüfgrößen aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse

Diese 41 abgeleiteten Prüfgrößen dienen als Datenbasis für die Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems. Mit Hilfe der Kalibrierung wird aus den Prüfgrößen ein Zusammenhang zu den Zielgrößen hergestellt und somit eine indirekte Mikrostruktur- und Spannungsanalyse der Prüfobjekte umgesetzt. Diese Umsetzung und die damit verbundenen Einstellungen, Ansteuerungen, Visualisierungen, Datensicherungen und -auswertungen des 3MA-Prüfsystems werden durch die am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren entwickelte Software, dem modularen Messsystem (mms), gewährleistet [Sziel2001].

Die Mikrostruktur- und Spannungsanalyse mit zerstörungsfreien, elektromagnetischen Prüfverfahren setzt voraus, dass das Bauteil aus ferromagnetischem Material besteht und sich die unterschiedlichen Eigenschaften des Werkstoffzustandes auch in den zerstörungsfreien Messgrößen abbilden.

3.3.1 Sensorik der elektromagnetischen 3MA-Prüfung

Die meisten 3MA-Sensoren sind nach dem in Abb. 13 dargestellten Prinzip aufgebaut.

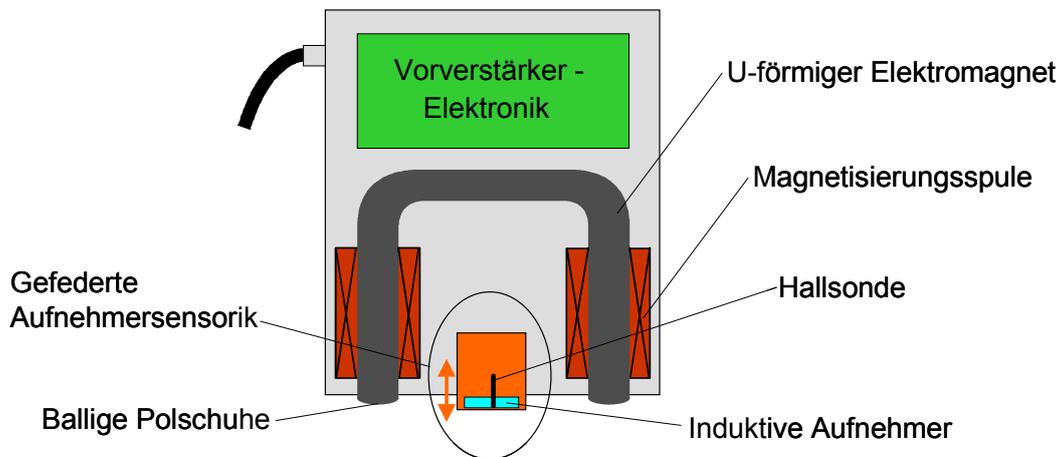


Abb. 13: Allgemeiner schematischer Aufbau eines Standard-3MA-Sensors

Wegen der notwendigen periodischen Ummagnetisierung des Werkstoffs sind in die 3MA-Sensoren Elektromagnete integriert. Diese sind in der Regel u-förmig und bestehen aus einem speziellen Eisenkern - dem Joch - und einer darum gewickelten Magnetisierungsspule. Durch diesen Elektromagneten wird der Werkstoff ummagnetisiert. Hierzu wird die Magnetisierungsspule mit einem periodisch veränderlichen Strom durchflossen, dessen Frequenz und Stärke abhängig von der Magnetisierungs-Frequenz und -Feldstärke ist. In der Mitte zwischen den bei Standard-3MA-Sensoren ballig ausgeführten Polschuhen der Jochschenkel ist das Magnetfeld annähernd homogen. An dieser Position befindet sich bei 3MA-Sensoren die Aufnehmersensorik. Sie besteht aus mindestens einer Magnetfeldsonde (Hallsonden, usw.) und induktiven Aufnehmern wie zum Beispiel Luftspulen. Die Aufnehmersensorik ist bei den Standard-3MA-Sensoren federnd gelagert (siehe Abb. 13 Pfeilrichtung). Der zeitliche Verlauf des Tangentialfeldes $H_t(t)$ an der Oberfläche des Bauteils wird mittels der Magnetfeldsonde (Hallsonde) in der Aufnehmersensorik detektiert [Bähre2010, Bähre2011]. Dieser dient einerseits zur Steuerung der Magnetfeldregelung, um zum Beispiel eine reproduzierbare Anregung für Werkstoffe mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften zu gewährleisten, andererseits wird er zur Prüfgrößenbildung verwendet. Durch die induktiven Aufnehmer werden die Barkhausen-Rauschereignisse detektiert. Sie können aber auch als Wirbelstrom-Sende-Empfangssystem dienen, das bei der Wirbelstromimpedanzanalyse und bei der Überlagerungspermeabilität zum Einsatz kommt. Abhängig davon, ob Sender und Empfänger über eine einzige Spule oder getrennt realisiert werden, können eine oder zwei Tastspulen in die gefederte Aufnehmersensorik integriert sein. Die Erregerspule kann auch als zusätzliche Wicklung auf dem Magnetjoch aufgebracht werden. Welche Variante vorzuziehen ist, hängt vom jeweiligen Prüfproblem ab. Bei dem Standardprüfkopf besteht das Sende-Empfangssystem aus einer einzigen Tastspule, die mittig zwischen den Polen des

Elektromagneten angeordnet ist. Zusätzlich ist zum Teil noch die Vorverstärker-Elektronik in den Sensor integriert, wie es bei den Standard-3MA-Sensoren der Fall ist. In Abb. 14 ist ein solcher Standard-3MA-Sensor abgebildet.

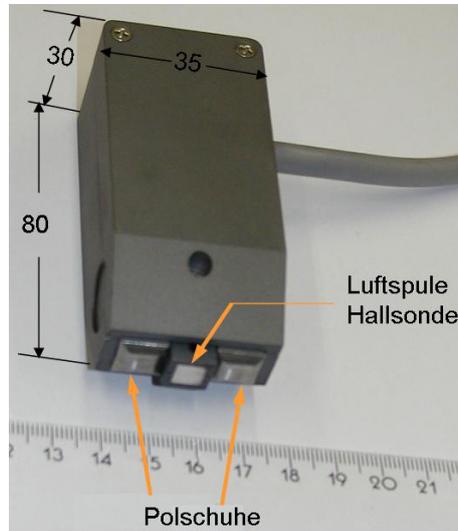


Abb. 14: Standard-3MA-Sensor

Der abgebildete Standard-3MA-Prüfkopf wird wie alle 3MA-Sensoren mit dem Geräte-Frontend über ein mehradriges Kabel und eine PG-Verschraubung verbunden. Standard-Sensoren haben eine quadratische Schenkelquerschnittsfläche mit einer Kantenlänge von 10 mm. Der Bereich der Aufnehmersensorik - zwischen den Jochschenkeln - ist ebenfalls quadratisch und hat die gleichen Ausmaße wie ein Magnetjochschenkel.

3MA-Sensoren werden standardmäßig auf die Oberfläche des zu prüfenden Bereichs des Werkstücks aufgesetzt. Sie können aber auch mit einer von dem Sensor, der Prüfaufgabe und des zu prüfenden Werkstoffs abhängigen Abhebung betrieben werden.

Abhängig von der Bauteilgeometrie und -größe können angepasste Spezial-3MA-Sensoren aufgebaut werden. Hierbei kann eine räumliche Trennung der Magnetisierungsvorrichtung von der Aufnehmersensorik von Vorteil sein, wie bei dem in Abb. 15 dargestellten Spezial-3MA-Sensor zur Ankerbolzenprüfung.

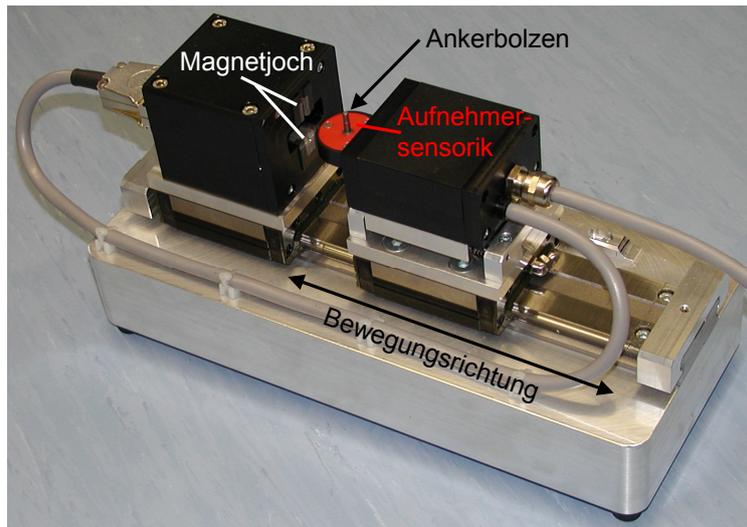


Abb. 15: *Spezial-3MA-Sensor zur Ankerbolzenprüfung mit eingelegtem Ankerbolzen in geöffnetem Zustand*

Bei dem 3MA-Spezial-Sensor zur Ankerbolzenprüfung wird durch das Verfahren der Aufnehmersensorik entlang der Bewegungsrichtung eine definierte Ankopplung des Bolzens an das speziell angepasste Magnetjoch umgesetzt. Eine räumliche Trennung der Magnetisierungsvorrichtung und der Aufnehmersensorik ist nicht für jeden speziell angepassten Sensor notwendig. In Abb. 16 ist zum Beispiel ein Sensor ohne räumliche Trennung von Magnetisierungsvorrichtung und Aufnehmersensorik abgebildet, der speziell zur Prüfung von zylindrischen Proben entwickelt und aufgebaut wurde.

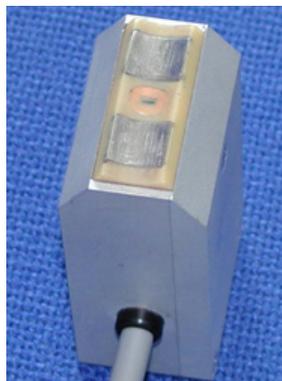


Abb. 16: *Spezial-3MA-Sensor zur Prüfung von zylindrischen Proben*

Bei diesem speziellen Sensor wurden die Polschuhe des Magnetjochs und die Aufnehmersensorik an die Geometrie von zylindrischen Proben angepasst. In diesem Spezialfall wurde auch auf die Beweglichkeit der Aufnehmersensorik verzichtet.

3.3.2 Kalibrierung des elektromagnetischen 3MA-Prüfsystems

Um mechanisch technologische Kenngrößen wie Härte, Zugfestigkeit oder Eigenspannungen, sogenannte Zielgrößen, quantitativ erfassen zu können, ist eine Kalibrierung des 3MA-Systems erforderlich.

Bei der Kalibrierung werden den elektromagnetischen Prüfgrößen die entsprechenden Zielgrößenwerte zugeordnet. Voraussetzung hierfür sind Probensätze mit konventionell ermittelten Referenzdaten, die bei der Kalibrierung als Sollwerte verwendet werden können. Alle aus den 3MA-Prüfverfahren abgeleiteten elektromagnetischen Prüfgrößen werden für die ausgewählten Zielgrößen mit einem 3MA-Prüfsystem ermittelt.

Als mathematische Hilfsmittel zur Bestimmung von Korrelationen zwischen den 3MA-Prüfgrößen und den Werkstoff-Kennwerten stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Zum einen die Regressionsanalyse, die den Kalibrierdatensatz mittels der Regressionsrechnung hinsichtlich der Signifikanz der einzelnen elektromagnetischen Messgrößen analysiert, dabei werden die Prüfgrößen in verschiedenen Potenzen, als Kehrwert und in Form ausgewählter Produkte und Quotienten in den Berechnungen berücksichtigt [Alber1999]. Zum anderen eine Mustererkennung, die auf Basis einer Ähnlichkeitsbetrachtung die Prüfgrößen der zu charakterisierenden Probe in Bezug auf die Prüfgrößen der Kalibrierproben einer Bewertung unterzieht und dadurch die zugeordneten Zielgrößen berechnet [Stork2001]. In Abb. 17 ist schematisch der Ablauf einer Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems dargestellt. Es wird deutlich, dass unabhängig von der Kalibriermethode der an den Kalibrierproben aufgenommene Prüfgrößenraum immer die Basis für die Kalibrierung darstellt. Deshalb wird in Kapitel 3.3.2.1 der 3MA-Prüfgrößenraum auf Orthogonalität analysiert und die Kalibriermethoden, die zur Lösung des Mehrparameterproblems verwendet werden können, anschließend vorgestellt.

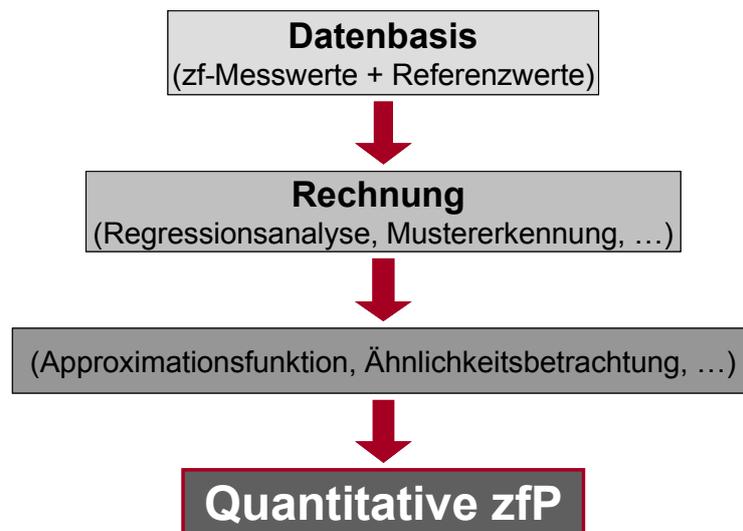


Abb. 17: Prinzip einer Kalibrierung zur quantitativen zerstörungsfreien Prüfung

3.3.2.1 Prüfgrößenraumanalyse – Orthogonalität des Prüfgrößenraumes

Der Prüfgrößenraum bei einer 3MA-Kalibrierung wird durch Messdatenaufnahme an dem Kalibrierprobensatz gebildet. Der Kalibrierprobensatz muss hierbei das komplette Spektrum des Zielgrößenbereiches abdecken. Dadurch wird der Merkmalsraum für die Kalibrierung aufgespannt und gewährleistet, dass alle charakteristischen Merkmale darin erfasst werden können. Zur Kalibrierdatenaufnahme werden an allen Kalibrierproben mehrere Messungen mit dem zuvor an die Prüfaufgabe angepassten 3MA-Prüfsystem aufgenommen. Abhängig von der Prüfaufgabe können alle vier oder nur ausgewählte Prüfverfahren für die Kalibriermessungen und somit auch für die folgende Anwendung der Kalibrierung aktiviert sein. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, dass die Datenaufnahme in Form von sogenannten Sweep-Messungen erfolgt (zum Beispiel Messdatenaufnahme bei mehreren unterschiedlichen Frequenzen und/oder Magnetfeldstärken). Die so angelegte Datenbasis beziehungsweise der so angelegte Prüfgrößen- oder Merkmalsraum hat folglich eine von der Prüfaufgabe abhängige mehrdimensionale Ausdehnung. Allgemein besteht die Möglichkeit, dass sich in einer derartigen Datenbasis sowohl voneinander linear unabhängige Prüfgrößen, aber auch voneinander linear abhängige Größen befinden. Rein statistisch ausgedrückt bedeutet dies, dass sowohl redundante als auch diversitäre Informationen in Form von Prüfgrößen in der Datenbasis enthalten sein können. Die Redundanz führt in der Statistik zu Multikollinearitäten. Unter Multikollinearitäten versteht man lineare Abhängigkeiten zwischen Datenreihen. Diese Abhängigkeiten stellen bei der Anwendung statistischer Auswertungsalgorithmen wie der Regressionsanalyse Probleme dar, weil derartige Ansätze auf der idealisierten Annahme eines orthogonalen Merkmalsraumes basieren. Diese Ansätze gehen also davon aus, dass keine linearen Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Prüfgrößen bestehen. Diese Probleme müssen bei der Anwendung von Auswertungsalgorithmen berücksichtigt werden (siehe 3.3.2.2. Regressionsanalyse). Im Gegensatz dazu sorgt die Diversität für die Unabhängigkeit der Informationen beziehungsweise der Prüfgrößen untereinander.

Um exemplarisch den tatsächlichen Prüfgrößenraum von elektromagnetischen Kalibrierdatenbanken zu analysieren, wurde für zwei von der Art der Datenaufnahme unterschiedliche Kalibrierdatenbanken die Ab- und Unabhängigkeit der Informationen untereinander näher betrachtet. Dazu wurde eine Kalibrierung verwendet, bei der zur Datenaufnahme alle vier Verfahren der 3MA-Prüftechnik bei einer Frequenz von 250 Hz aktiviert wurden. Zusätzlich wurde eine Kalibrierdatenbank analysiert, bei der die sogenannten Sweep-Messungen für die Kalibrierung zum Einsatz kamen. Für diese Sweep-Messungen wurden zwei unterschiedliche Frequenzen bei einer Feldaussteuerung (Frequenzen 15 und 50 Hz bei jeweils 60 A/cm) verwendet und nur drei von vier Verfahren der 3MA-Prüftechnik aktiviert. Die Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse wurde für diese Kalibrierung nicht verwendet. Die Ab-

bzw. Unabhängigkeit wurde ermittelt, indem für die beiden Prüfgrößenräume der Kalibrierdatenbanken analysiert wurde, ob sich die betrachtete Prüfgröße mit Hilfe einer anderen Prüfgröße aus dem Merkmalsraum beschreiben lässt. Es wurde also für jede Prüfgröße in der Kalibrierdatenbank versucht, einen linearen Zusammenhang aus einer anderen Prüfgröße der Kalibrierung herzuleiten, der die betrachtete Prüfgröße möglichst gut beschreibt. Nachdem für jede Prüfgröße die beste lineare Beschreibung durch eine andere Prüfgröße ermittelt wurde, kann der jeweilige Korrelationskoeffizient (R) beziehungsweise das jeweilige Bestimmtheitsmaß (R^2) ermittelt und dazu verwendet werden, den Prüfgrößenraum bezüglich der Redundanz und der Diversität zu beurteilen. Wird ein Korrelationskoeffizient ermittelt, der eine gute Korrelation widerspiegelt, so lässt sich diese Prüfgröße als redundant ansehen. Redundante Prüfgrößen führen zur Kollinearität. Wird im Gegensatz dazu ein Korrelationskoeffizient ermittelt, der keine gute Korrelation widerspiegelt, so lässt sich diese Prüfgröße als diversitär und somit als unabhängig ansehen. In Abb. 18 sind die Ergebnisse der Prüfgrößenraumanalyse für beide oben erwähnte Kalibrierungen dargestellt. Im linken Bereich von Abb. 18 sind die Ergebnisse für die Kalibrierung durch Sweep-Messungen dargestellt. Rechts sind die Ergebnisse für die Kalibrierung, bei der alle vier 3MA-Prüfverfahren beteiligt waren, dargestellt. Beide Ergebnisse sind tabellarisch aufgeführt. In der ersten Spalte „f(x)“ der beiden Tabellen ist die Größe dargestellt, für die ein linearer Zusammenhang aus einer anderen Prüfgröße ermittelt wurde. In den Spalten „ R^2 “ und „RMSE“ sind das Bestimmtheitsmaß und die Wurzel des mittleren Fehlerquadrates (Root Mean Square Error) des ermittelten linearen Zusammenhangs aufgelistet. Die letzte Spalte „x“ enthält die Prüfgröße, mit deren Hilfe der lineare Zusammenhang gebildet wurde. Beide Tabellen sind absteigend nach dem Bestimmtheitsmaß R^2 sortiert. Die Zeilen der Tabellen sind abhängig davon, aus welchem Prüfverfahren die Prüfgröße in der Spalte „f(x)“ abgeleitet wurde, eingefärbt.

Sensor- und geräteunabhängige Kalibrierung elektromagnetischer
zerstörungsfreier Prüfverfahren zur praxisorientierten Werkstoffcharakterisierung

| f(x) | R ² | RMSE | x | f(x) | R ² | RMSE | x |
|--------------|----------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|-------|
| F15H60-A3 | 0.9997 | 0.0080 | F15H60-K | Ph4 | 0.9998 | 0.001 | Ph3 |
| F50H60-K | 0.9990 | 0.0180 | F50H60-A3 | Ph3 | 0.9998 | 0.001 | Ph4 |
| F50H60-A3 | 0.9990 | 0.0100 | F50H60-K | Ph2 | 0.9993 | 0.002 | Ph3 |
| F15H60-K | 0.9970 | 0.0130 | F15H60-A3 | Re1 | 0.9983 | 0 | Im2 |
| F15H60-UHS | 0.9936 | 0.0042 | F15H60-K | Im2 | 0.9983 | 0.001 | Re1 |
| F50H60-UHS | 0.9913 | 0.0400 | F50H60-K | Im4 | 0.9978 | 0.001 | Ph4 |
| F50H60-Hcu | 0.9757 | 0.4580 | F50H60-Hcm | Re4 | 0.9976 | 0.001 | Mag2 |
| F50H60-Hcm | 0.9757 | 0.4830 | F50H60-Hcu | Ph1 | 0.9976 | 0.003 | Ph2 |
| F15H60-P3 | 0.9603 | 0.0460 | F15H60-Hco | Mag2 | 0.9976 | 0.001 | Re4 |
| F15H60-Hco | 0.9603 | 0.6420 | F15H60-P3 | umean | 0.9974 | 0.001 | umax |
| F15H60-DH75m | 0.9569 | 0.3020 | F15H60-DH50m | umax | 0.9974 | 0.001 | umean |
| F15H60-DH50m | 0.9569 | 0.4550 | F15H60-DH75m | Mag3 | 0.9971 | 0.001 | Mag2 |
| F15H60-umean | 0.9517 | 0.0010 | F50H60-umean | Mmean | 0.9968 | 0.001 | Mmax |
| F50H60-umean | 0.9517 | 0.0020 | F515H60-umean | Mmax | 0.9968 | 0.003 | Mmean |
| F15H60-Hcu | 0.9415 | 0.8420 | F15H60-Hcm | K | 0.9958 | 0.014 | A3 |
| F15H60-Hcm | 0.9415 | 0.8620 | F15H60-Hcu | A3 | 0.9958 | 0.008 | K |
| F15H60-A7 | 0.9412 | 0.0100 | F15H60-UHS | Mag4 | 0.9929 | 0.001 | Mag3 |
| F15H60-DH25m | 0.9379 | 0.8520 | F15H60-DH50m | Mag1 | 0.9929 | 0.001 | Mag2 |
| F50H60-A5 | 0.9376 | 0.0210 | F50H60-UHS | Im3 | 0.9925 | 0.002 | Re1 |
| F50H60-A7 | 0.9335 | 0.0080 | F50H60-A5 | P3 | 0.9743 | 0.054 | Hco |
| F15H60-umax | 0.9298 | 0.0060 | F50H60-umax | Hco | 0.9743 | 0.975 | P3 |
| F50H60-umax | 0.9298 | 0.0070 | F15H60-umax | Re2 | 0.9681 | 0.001 | Im4 |
| F15H60-Vmag | 0.9288 | 0.0070 | F15H60-P3 | DH75m | 0.9535 | 0.332 | DH50m |
| F15H60-Hro | 0.9205 | 0.1800 | F15H60-A3 | DH50m | 0.9535 | 0.54 | DH75m |
| F50H60-Mmax | 0.9195 | 0.0070 | F15H60-Mmax | DH75u | 0.9466 | 0.581 | DH50u |
| F15H60-Max | 0.9195 | 0.0050 | F50H60-Mmax | DH50u | 0.9466 | 0.545 | DH75u |
| F50H60-DH50m | 0.9192 | 0.5920 | F50H60-DH25m | UHS | 0.9393 | 0.038 | K |
| F50H60-DH25m | 0.9192 | 0.8690 | F50H60-DH50m | ur | 0.9272 | 0.006 | umean |
| F50H60-Vmag | 0.9158 | 0.0080 | F15H60-Vmag | DH25m | 0.9177 | 1.37 | DH50m |
| F50H60-DH75m | 0.9154 | 0.4020 | F50H60-DH50m | Hro | 0.9128 | 0.062 | Hco |
| F50H60-Mmean | 0.9077 | 0.0020 | F15H60-Mmean | Re3 | 0.8958 | 0.001 | Im1 |
| F15H60-Mmean | 0.9077 | 0.0010 | F50H60-Mmean | Im1 | 0.8958 | 0.001 | Re3 |
| F15H60-DH50u | 0.9062 | 1.4960 | F15H60-DH25u | Hcu | 0.8748 | 0.944 | Hcm |
| F15H60-DH25u | 0.9062 | 1.3460 | F15H60-DH50u | Hcm | 0.8748 | 1.044 | Hcu |
| F50H60-Hco | 0.8960 | 0.3720 | F50H60-Hro | Vmag | 0.8746 | 0.026 | ur |
| F50H60-Hro | 0.8960 | 0.0760 | F50H60-Hco | A5 | 0.8051 | 0.018 | DH50u |
| F15H60-ur | 0.8935 | 0.0070 | F50H60-umax | Mr | 0.7917 | 0.011 | Vmag |
| F50H60-ur | 0.8924 | 0.0100 | F50H60-A5 | DH25u | 0.7608 | 0.502 | DH50u |
| F50H60-DH50u | 0.8890 | 1.2690 | F50H60-DH25u | P5 | 0.649 | 0.0138 | Hco |
| F50H60-DH25u | 0.8890 | 1.3400 | F50H60-DH50u | A7 | 0.5331 | 0.008 | A5 |
| F50H60-P5 | 0.8521 | 0.0380 | F50H60-Hco | P7 | 0.5121 | 0.0481 | DH50u |
| F50H60-DH75u | 0.8282 | 0.7700 | F50H60-DH50u | | | | |
| F50H60-P7 | 0.8041 | 0.0620 | F50H60-P5 | | | | |
| F15H60-Mr | 0.7922 | 0.0070 | F15H60-Mmax | | | | |
| F15H60-DH75u | 0.7640 | 0.6310 | F15H60-DH50u | | | | |
| F50H60-Mr | 0.6205 | 0.0190 | F50H60-Hcm | | | | |
| F15H60-P7 | 0.6164 | 0.0830 | F15H60-Hco | | | | |
| F50H60-P3 | 0.6085 | 0.0270 | F50H60-Hro | | | | |
| F15H60-A5 | 0.4901 | 0.0270 | F15H60-Mmax | | | | |
| F15H60-P5 | 0.2613 | 0.1500 | F50H60-Vmag | | | | |

| |
|--|
| Oberwellenanalyse |
| Barkhausen-Rausch-Analyse |
| Überlagerungspermeabilität |
| Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse |

Abb. 18: Prüfgrößenraumanalyse bezüglich Redundanz und Diversität für zwei unterschiedliche Kalibrierdatenbanken; links: Sweep-Messungen ohne die Wirbelstromimpedanzanalyse; rechts: Verwendung aller vier 3MA-Prüfverfahren bei einer Frequenz

Durch Auswertung der beiden Tabellen bezüglich des Bestimmtheitsmaßes wird deutlich, dass in beiden Kalibriervarianten redundante Informationen vorliegen, da in beiden Tabellen

im oberen Bereich Bestimmtheitsmaße von nahezu Eins vorliegen. Dies bedeutet, dass sich diese gut korrelierten Prüfgrößen vollständig durch andere Prüfgrößen beschreiben lassen und somit im Kalibrierprüfgrößenraum Multikollinearität auftritt. Dies lässt sich statistisch durch die sogenannte Toleranz ausdrücken. Die Toleranz T ist definiert als die Differenz zwischen Eins und dem Bestimmtheitsmaß [Skier2000].

$$T = 1 - R^2 \quad \text{Gl. 3-2}$$

Ist der Wert der Toleranz sehr klein, so ist dies ein Hinweis auf eine Multikollinearität in den zugrunde liegenden Daten. Es gilt, dass bei Toleranzen unterhalb von 0,1 der Verdacht auf Multikollinearität nahe liegt. Ein Toleranzwert unterhalb 0,01 (siehe rote Linie in Abb. 19) kann als sicherer Beweis für eine Multikollinearität gewertet werden [Reinb2006, Fahrn1999, Brori2002]. Im Gegensatz dazu liegen ebenfalls in beiden Fällen im unteren Bereich der Tabellen in Abb. 18 auch Bestimmtheitsmaße vor, die eine schlechte Korrelation widerspiegeln (0,26 beziehungsweise 0,51). Dies verdeutlicht, dass in beiden Kalibrierprüfgrößenräumen auch voneinander unabhängige Informationen beziehungsweise Prüfgrößen enthalten sind. Die Auswertung der Toleranz für die beiden Kalibrierdatenbanken aus Abb. 18 verdeutlicht sowohl die abhängigen wie auch die unabhängigen Informationen in den Kalibrierdatenbanken (siehe Abb. 19)

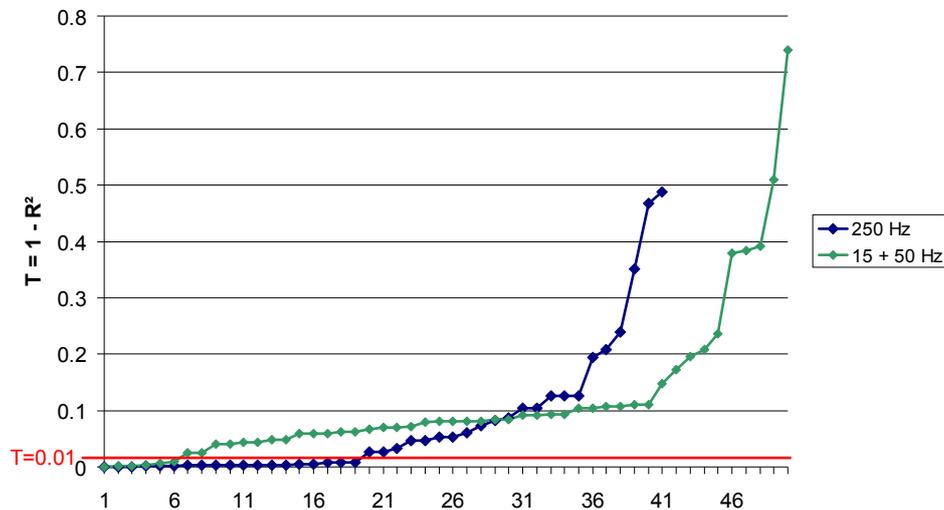


Abb. 19: Toleranzen der Prüfgrößen aus den Kalibrierdatenbanken (siehe Abb. 18) aufgetragen über die Anzahl der Prüfgrößen

Somit lässt sich zusammenfassend sagen, dass in den Kalibrierprüfgrößenräumen des 3MA-Prüfsystems sowohl Redundanz als auch Diversität vorhanden sein kann. Folglich ist dies bei der Auswahl von statistischen Methoden zur Kalibrierung zu beachten, indem nur solche Methoden verwendet werden, die trotz Redundanz und Diversität im Prüfgrößenraum gute Kalibrierergebnisse liefern können. Ganz allgemein lässt sich aber ebenfalls festhalten, dass zur Separation zweier Effekte (zum Beispiel Mikrogefüge- und Spannungseinflüsse) in einer

Kalibrierung die Erfassung von redundanten als auch von diversitären Informationen von Vorteil sein kann (siehe Abb. 22).

3.3.2.2 Regressionsanalyse

Eine Option zur Kalibrierung von elektromagnetischen Prüfverfahren ist die Regressionsanalyse. Bei der Regressionsanalyse handelt es sich um ein statistisches Analyseverfahren, das zum Ziel hat, Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen festzustellen [Schac1978, Blume1974, BlumJ1974, Heinh1979]. Diesem mathematischen Hilfsmittel wird hierbei der Zusammenhang zwischen den elektromagnetischen Prüfgrößen und der/den Zielgröße/n zur Verfügung gestellt. Dabei wird die Datenmatrix bestehend aus den elektromagnetischen Prüfgrößen als mehrere unabhängige Variablen und der zu den Prüfgrößen korrespondierende Ergebnisvektor oder auch Zielgrößenvektor als abhängige Variable interpretiert, so dass die Regressionsanalyse Korrelationen zwischen den Prüfgrößen und den zugehörigen Ergebnisvektoren finden soll.

Die Regressionsanalyse modelliert die Korrelation durch ein Polynom, welches den Prüfgrößen-Zielgrößen-Zusammenhang erfasst. Die näherungsweise optimalen Koeffizienten des Regressionspolynoms werden bei Anwendung der Regressionsanalyse anhand der Daten von Kalibriermessungen bestimmt, die hinsichtlich der Signifikanz der einzelnen elektromagnetischen Prüfgrößen analysiert werden [Alber1999]. Die Kalibriermessungen werden an einem abgestuften Kalibrierprobensatz aufgenommen, der den zu betrachteten Zielgrößenbereich abdecken muss.

Bei der Anwendung der linearen Regressionsanalyse zur Kalibrierung von elektromagnetischen Prüfverfahren wird ein Polynom parametrisiert, das in anschließenden Messungen aus den Prüfgrößenwerten den zu erwartenden Zielgrößenwert approximiert.

Hierfür steht ein Modul innerhalb des modularen Messsystems (mms) zur Verfügung. Dieses Regressionsmodul stellt zunächst die Menge der zur Regression verfügbaren Prüfgrößen fest. Deren Werte bilden eine Datenmatrix X zur Speisung des Kalibrieralgorithmus. Aus der entstandenen Menge von Informationen wählt das Modul diejenigen aus, welche im quadratischen Mittel die wählbare Zielgröße mit dem geringsten Fehler beschreiben. Hierbei berücksichtigt es die vom Anwender einzugebenden Randbedingungen, wie zum Beispiel die maximale Anzahl und den maximalen Polynomgrad der Terme in dem Regressionspolynom.

Es existieren unterschiedliche Modelle der Regressionsanalyse [Rudol1979]. Bei dem für die Kalibrierungen verwendeten Modell handelt es sich um eine schrittweise Vorwärts-Regressionsanalyse. Die schrittweise Vorwärts-Regression ist eine lineare Regressionsanalyse, die schrittweise ausgeführt wird.

3.3.2.2.1 Lineare Regressionsanalyse

Bei der linearen Regressionsanalyse wird davon ausgegangen, dass Ereignisse durch ein oder mehrere Merkmale prognostiziert werden können [Blume1974]. Das zu prognostizierende Ereignis wird als abhängige Variable bezeichnet, die beschreibenden Merkmale werden als unabhängige Variablen bezeichnet. Die lineare Regressionsanalyse setzt dabei das Vorhandensein einer linearen Beziehung zwischen den abhängigen und den unabhängigen Variablen voraus. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass sich die abhängige Variable (y) durch eine additive Verknüpfung der unabhängigen Variablen x_1 bis x_n prognostizieren lässt. Zusätzlich wird ebenfalls additiv ein Fehler e mit in das Regressionsmodell eingebracht. Der additive Faktor e wird als Residuum der Stichprobe bezeichnet. Das allgemeine Regressionsmodell lässt sich wie folgt formulieren.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + e \quad \text{Gl. 3-3}$$

Die in diesem Polynom-Modell verwendeten Gewichte a_j der unabhängigen Variablen werden Regressionskoeffizienten genannt. Dieses allgemeine, lineare Regressionsmodell dient als Grundlage für die Schätzung der Gewichte ($a_0 - a_n$) des Regressionspolynoms. Liegen k Ereignisse bestehend aus k Werten für die abhängige (y) und für jede unabhängige Variable (x_n) vor, wird diese Schätzung für alle $i = 1 \dots k$ Ereignisse durchgeführt, so dass dadurch für jedes Ereignis gilt

$$y_i = a_0 + a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \dots + a_nx_{in} + e_i \quad \text{Gl. 3-4}$$

Die Schätzwerte b_j für a_j ; $j = 1, \dots, n$; können hierbei auf der Basis der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden. Dabei wird eine Funktion so durch die Beobachtungen gelegt, dass die Quadratsumme der Residuen (SS_{Res} ; „residual sum of squares“) minimiert wird.

$$SS_{Res} = \sum_{i=1}^k \left(y_i - \sum_{j=1}^n b_j x_{i,j} \right)^2 \rightarrow \min! \quad \text{Gl. 3-5}$$

Die lineare Regressionsanalyse wählt die Parameter für eine Gleichung $y = f(x)$ so, dass im quadratischen Mittel minimale Abweichungen zwischen experimentellen und kalkulierten Werten entstehen.

3.3.2.2.2 Schrittweise Vorwärts-Regression

Bei der schrittweisen Vorwärts-Regression seien als Kalibriermessung gegeben k Messungen von je n Prüfgrößen und je einer zugeordneten Zielgröße ($y_i; i \in [1; k]$). Man geht auch hier davon aus, dass sich alle k Werte der Zielgröße durch lineare Gleichungen beschreiben lassen, indem man den Zielgrößen-Vektor \vec{y} durch die Multiplikation einer Messdaten-Matrix X (Dimension: $k \times n$) mit einem Vektor \vec{a} von n Koeffizienten und anschließender Addition eines fehlerkompensierenden, normalverteilten (gaußverteilten) Restvektors \vec{e} der Höhe k darstellen lässt:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{k1} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_k \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3-6}$$

$$\vec{y} = X \cdot \vec{a} + \vec{e}$$

Somit lassen sich die Zielgrößen durch zeilenweise Addition der mit a_i gewichteten Messdaten x_{ij} und den Restwerten e_i darstellen ($j \in [1; n]$).

Da der Restvektor \vec{e} möglichst gering, die Approximation also möglichst genau sein soll, wird eine Methode benötigt, die den Restvektor \vec{e} minimieren kann, was gleichzeitig ein Optimierungskriterium für die Bestimmung von \vec{a} darstellt. Das hier verwendete Verfahren nennt sich Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Bei der schrittweisen Regressionsanalyse wird zusätzlich ein Verfahren benötigt, das die geeigneten Terme (feste Funktionen der Prüfgrößen) aus den Prüfgrößen auswählt und rechtzeitig abbricht, wenn zusätzliche Terme keine signifikante Verbesserung mehr bringen. Bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums wird der Matrix X je eine neue Spalte (also ein neuer Term) hinzugefügt, und zwar immer derjenige, mit welchem die größte Verbesserung erzielt wird. Darüber hinaus werden gegebenenfalls überflüssige Terme aus dem Polynom entfernt. Die Beurteilung der Wichtigkeit eines am Polynom beteiligten Terms erfolgt auf Basis des sogenannten Fischer-Kriteriums [Alber1999].

Dieses Vorgehen sorgt dafür, dass der unerwünschte, negative Einfluss von in dem Prüfgrößenraum vorhandenen Multikollinearitäten minimiert wird. Für den Fall einer Kalibrierung von elektromagnetischen Prüfgrößen sind dies Abhängigkeiten unter den Messdaten. Diese Abhängigkeiten sorgen ohne eine schrittweise Ausführung der linearen Regressionsanalyse für eine Verschlechterung des Regressionsergebnisses. Durch die schrittweise Ausführung und die dadurch verbundene schrittweise Überprüfung der Verbesserung des Regressionsmodells wird vermieden, dass zu stark voneinander abhängige Prüfgrößen in das Modell aufge-

nommen werden. Denn durch die Verwendung linearabhängiger Prüfgrößen in der Regressionsanalyse würde eher eine Verschlechterung des Ergebnisses statt einer gewünschten Verbesserung auftreten. Dadurch, dass bei der schrittweisen Regressionsanalyse auch Terme wieder aus dem Modell entfernt werden, ist sichergestellt, dass stets die Prüfgrößen ausgewählt werden, welche die größte Verbesserung des Ergebnisses liefern.

3.3.2.2.3 *Annahmen der Regressionsanalyse*

Zur fehlerfreien Anwendung der Regressionsanalyse müssen bestimmte Annahmen erfüllt sein. Diese Annahmen beziehen sich entweder auf die Restwerte (e_i), auf die Beziehung zwischen Messdaten (x_{ij}) und Zielgröße (y_i), auf die Beziehung zwischen den Messdaten (x_{ij}) untereinander und auf die Anzahl der Beobachtungen [Alber1999].

Annahmen hinsichtlich der Restwerte (e_i):

- Normalverteilung der Restwerte
- Erwartungswert von Null für alle Restwerte
- Gleiche Varianz für alle Restwerte (Homoskedastizität)

Annahmen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen den Messdaten (x_{ij}) und den Zielgrößenwerten (y_i):

- Erfassung aller relevanten unabhängigen Messdaten
- Linearität des Prüfgrößen-Zielgrößen-Zusammenhangs

Annahmen hinsichtlich des Zusammenhangs der Messdaten (x_{ij}) untereinander:

Es wird davon ausgegangen, dass keine lineare Abhängigkeit zwischen den Messdaten besteht (fehlende Multikollinearität). Falls Multikollinearität vorhanden ist, wird diese durch die Verwendung einer schrittweise ausgeführten Regressionsanalyse minimiert.

Annahmen hinsichtlich der Anzahl der Beobachtungen:

Für eine zuverlässige Kalibrierung muss gelten, dass die Anzahl k der Messdatensätze wesentlich größer als die Anzahl n der Kalibrierterme ist ($k \gg n$), da sonst die Regression Zusammenhänge sieht, die nicht auf das Prüfgrößenverhalten, sondern auf zufällige Messschwankungen zurückzuführen sind.

3.3.2.3 Mustererkennung

Eine weitere Option zur Kalibrierung der elektromagnetischen Prüfverfahren ist die Mustererkennung. Eine Mustererkennung ist im Allgemeinen stets modellfrei, da hier zur Umsetzung der Kalibrierung ausschließlich die Ähnlichkeit der gemessenen Prüfgrößenwerte mit den in der Kalibrierdatenbank enthaltenen Prüfgrößenwerten ermittelt wird. Es werden diejenigen Proben aus der Kalibrierdatenbank identifiziert, von denen die gemessene Probe am wenigsten abweicht.

Die in dem Mustererkennungs-Modul des modularen Messsystems (mms) verwendete Methode ist eine Nearest-Neighbor-Suche, die zur Ermittlung der Ähnlichkeit eine Betrachtung der euklidischen Distanzen der Prüfgrößenwerte durchführt [Tschu2004].

3.3.2.3.1 Normierung der Prüfgrößen

Bevor mit einer Mustererkennung durch eine Nearest-Neighbor-Suche begonnen werden kann, ist eine Normierung der Prüfgrößen erforderlich, da nicht jede Prüfgröße im gleichen Wertebereich liegt. Die Normierung führt alle Prüfgrößen in äquivalente Wertebereiche und macht dadurch eine Auswertung der Distanzen zwischen den Prüfgrößen möglich.

Die Normierung wird hier mit Hilfe einer Mustermessung durchgeführt. Die Mustermessung dient zur Feststellung der reinen Messwertabweichung der einzelnen Prüfgrößenwerte während mehrerer identischer Messzyklen. Die Mustermessung ist so anzufertigen, dass sie an nur einer Probe und in einem unverändert bleibenden, definierten Messaufbau durchgeführt wird. Weiterhin sollten in der Mustermessung alle Faktoren enthalten sein, welche die Messung beeinflussen können.

3.3.2.3.2 Bildung der Normierungsfaktoren

Zur Bildung der Normierungsfaktoren werden die Messwerte einer Prüfgröße für alle durchgeführten Messzyklen der Mustermessung als eine Reihe beziehungsweise Verteilung ($\vec{p}_{MUSTER,j}$; Dimension: N = Anzahl der Messzyklen in der Mustermessung, j = Index der Prüfgröße) aufgefasst. Aus jeder Prüfgrößen-Spalte wird ein Faktor für die entsprechende Prüfgröße erzeugt, der zur Normierung der Prüfgröße verwendet wird. Die Normierungsfaktoren für die jeweiligen Prüfgrößen werden durch Bildung der Standardabweichung (σ_j) für die zugehörigen Prüfgrößen-Spalten aus der Mustermessung generiert. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung einer Verteilung um ihr arithmetisches Mittel. Die Standardabweichung σ ist folgendermaßen definiert:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \hat{x})^2} \quad \text{Gl. 3-7}$$

\hat{x} stellt den arithmetischen Mittelwert der Verteilung und N die Anzahl der Reihenglieder dar. Der Wert der Standardabweichung einer Prüfgrößen-Spalte der Mustermessung bildet den Normierungsfaktor für die entsprechende Prüfgröße.

Die Normierungsfaktoren (\bar{s}_σ) werden ihren korrespondierenden Prüfgrößen entsprechend bei jeder Verwendung der Kalibrierdatenbank und bei aktuellen Messdaten zur Normierung verwendet. Sie werden mit in die Betrachtung einbezogen, indem man den jeweiligen Prüfgrößenwert durch den entsprechenden Faktor ($s_{\sigma,j}$) dividiert. Nach der Division der Prüfgröße (p_j) durch den entsprechenden Normierungsfaktor erhält man eine normierte Prüfgröße ($p_{NORM,j}$), mit der eine korrekte Ähnlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden kann.

$$s_{\sigma,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (p_{MUSTER,j,i} - \hat{p}_{MUSTER,j})^2} \quad \text{Gl. 3-8}$$
$$p_{NORM,j} = \frac{p_j}{s_{\sigma,j}}$$

Die Normierung der Prüfgrößen auf ihre Standardabweichungen stellt eine Normierung auf den Energiewert 1 dar und entspricht der quadratischen Norm [Tschu2004].

3.3.2.3.3 Nearest Neighbor-Suche

Die Nearest Neighbor-Suche ist ein nicht parametrisches Verfahren. Dieses Verfahren macht keine Annahmen über die parametrische Form der zugrunde liegenden Verteilung der Prüfgrößen beziehungsweise geht nicht von einem Modell aus, um den Zielgrößen-Prüfgrößen-Zusammenhang zu ermitteln.

Im Allgemeinen wird bei einer Nearest Neighbor-Suche zunächst eine Merkmalsextraktion (feature extraction) vorgenommen. Hierbei werden aus der Menge der zur Verfügung stehenden Größen diejenigen entnommen beziehungsweise generiert, die zur Mustererkennung verwendet werden sollen [Stork2001]. Im hier verwendeten Modul ist die Umsetzung einer Merkmalsextraktion nicht notwendig, da durch den Benutzer explizit die Prüfgrößen angegeben werden, die zur Erkennung verwendet werden sollen. Alle Prüfgrößen stehen dem Benutzer bereits als konkrete Signale des Messsystems zur Verfügung und müssen somit auch nicht generiert werden.

Nachdem die zu verwendenden Prüfgrößen feststehen, findet eine Beurteilung der Prüfgrößenwerte der zu klassifizierenden Probe in Bezug auf die euklidische Distanz zu den ent-

sprechenden Einträgen in der Kalibrierdatenbank statt. Es findet eine Differenzbildung für jede einzelne normierte Prüfgröße eines Kalibrierdatensatzes und der entsprechenden Prüfgröße der aktuellen Probe statt. Diese Differenzen werden zu einer dem entsprechenden Kalibrierdatensatz zugeordneten, normierten Gesamtdistanz aufsummiert (siehe Gl. 1-8). Nach Bildung der Gesamtdistanz werden die Datensätze aus der Kalibrierdatenbank als nächste Nachbarn der aktuellen Probe bezeichnet, wenn deren euklidische Distanz unter einer vom Benutzer gewählten Schranke (maximale euklidische Distanz) liegt. Diese nächsten Nachbarn werden verwendet, um das Ergebnis der Mustererkennung zu generieren [Tschu2004].

3.3.2.3.4 Nearest Neighbor-Algorithmus

Sei $G = [P_{NORM}, \vec{z}]$ die Kalibrierdatenbank, bestehend aus der normierten Prüfgrößenmatrix P_{NORM} der Kalibrierproben (Dimension: $i \times n$; i = Anzahl der Kalibriermessungen, n = Anzahl der verwendeten Prüfgrößen) und dem zugehörigen Zielgrößenvektor \vec{z} der Kalibrierproben (Dimension: i). Sei weiterhin der Vektor \vec{y}_{NORM} (Dimension: n) der über die Normierungsfaktoren normierte Prüfgrößenwertvektor der zu charakterisierenden Probe; so führt der Nearest Neighbor-Algorithmus die Bildung der normierten euklidischen Gesamtdistanz $d_{y,a}$ für einen normierten Kalibrierdatensatz ($\vec{p}_{NORM,a}$) folgendermaßen durch:

$$P_{NORM} = \begin{pmatrix} \vec{p}_{NORM,0} \\ \vdots \\ \vec{p}_{NORM,(i-1)} \end{pmatrix} ; \quad \vec{z} = \begin{pmatrix} z_0 \\ \vdots \\ z_{i-1} \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_{NORM,a} = (p_{NORM,a,0} \quad \cdots \quad p_{NORM,a,(n-1)}) ; \quad a \in [0; (i-1)] \quad \text{Gl. 3-9}$$

$$\vec{y}_{NORM} = (y_{NORM,0} \quad \cdots \quad y_{NORM,(n-1)})$$

$$d_{y,a} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} (p_{NORM,a,x} - y_{NORM,x})^2}$$

Diese Distanzbildung wird für jeden Eintrag der Kalibrierdatenbank durchgeführt, so dass sich ein Vektor aus normierten euklidischen Distanzen (\vec{d}_y) ergibt. Dieser Vektor enthält somit die euklidischen Distanzen der Prüfgrößenwerte der normierten zu charakterisierenden Probe zu jedem normierten Kalibrierdatensatz. Durch die Verwendung normierter Größen zur Distanzbildung und Division durch die Anzahl der verwendeten Prüfgrößen (n) sind die Distanzen ebenfalls normiert.

$$\vec{d}_y = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} (p_{NORM,0,x} - y_{NORM,x})^2} \\ \vdots \\ \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} (p_{NORM,(i-1),x} - y_{NORM,x})^2} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-10}$$

$$\vec{d}_y^T = (d_{y,0} \quad \cdots \quad d_{y,(i-1)})$$

Die jeweiligen Komponenten des Vektors \vec{d}_y , deren Werte oberhalb einer vom Benutzer gewählten, maximalen euklidischen Distanz S liegen, werden aus dem Vektor entfernt. Die maximale Distanz S dient dazu, die nächsten Nachbarn zu ermitteln. Sie ist dadurch, dass die Normierung der Prüfgrößen über die Standardabweichung (σ) einer Messung realisiert ist, als eine über die Standardabweichung skalierte Größe zu verstehen. Durch Angabe einer Schranke mit dem Wert k werden diejenigen Kalibrierdatensätze als nächste Nachbarn angesehen, deren Prüfgrößenwerte im Durchschnitt ($k \cdot \sigma$) von der zu klassifizierenden Probe abweichen.

Durch die Beschränkung auf die nächsten Nachbarn wird ein neuer Vektor \vec{d}_y^{near} (Dimension: j ; wobei $j \leq i$) erzeugt, der nur noch aus den Distanzen zu den nächsten Nachbarn besteht. Die Kalibrierdatensätze, deren zugehörige Gesamtdistanzen größer als die Schranke S sind, werden in die Ergebnisbildung der Nearest-Neighbor-Suche nicht einbezogen, da sie der aktuellen Probe nicht ähnlich genug sind.

Je geringer die Distanz der Nachbarn ist, umso ähnlicher sind sie der zu charakterisierenden Probe. Mit den korrespondierenden Datensätzen aus der Kalibrierdatenbank kann nun eine Ergebnisbildung für den unbekanntem Zielgrößenwert der Probe vorgenommen werden. Falls kein Eintrag aus der Kalibrierdatenbank eine Distanz kleiner als die maximale euklidische Distanz liefert, werden keine nächsten Nachbarn gefunden, und es kann kein Ergebniswert für die Zielgröße generiert werden [Tschu2004].

3.3.2.3.5 Ergebnisbildung aus den nächsten Nachbarn

Nachdem die nächsten Nachbarn gefunden sind, wird unter deren Verwendung ein Näherungswert für die Zielgröße der zu klassifizierenden Probe ermittelt. Dies geschieht durch Verschmelzen der den nächsten Nachbarn zugeordneten Zielgrößenwerte zu einem Zielgrößenwert. Unter Verschmelzen ist eine von den normierten Distanzen der Nachbarn abhängi-

ge, gewichtete Mittelwertbildung über die den Nachbarn zugeordneten Zielgrößenwerte zu verstehen.

Die zur Mittelwertbildung erforderlichen relativen Gewichte sind ein Maß für die Übereinstimmung zweier Messungen beziehungsweise den damit verbundenen Werkstoffeigenschaften. Aus der normierten Distanz ($d_{y,a}^{near}$) zwischen den normierten Prüfgrößenwerten eines Kalibrierdatensatzes ($\vec{p}_{NORM,a}$) und den normierten Prüfgrößenwerten der zu klassifizierenden Probe (\vec{y}_{NORM}) lassen sich die relativen Gewichte berechnen. Die Berechnung ermittelt Wahrscheinlichkeiten aus der Normalverteilungsfunktion. Es wird jeweils die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass $\vec{p}_{NORM,a}$ und \vec{y}_{NORM} zwei Ergebnisse ein und desselben Zufallsexperimentes sind, das für jede Prüfgröße $p_{NORM,a,i}$ ($i \in [0; (n-1)]$) die Standardabweichung $s_{\sigma,i}$ besitzt. Das heißt, es wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass die zu klassifizierende Probe gleich einer Kalibrierprobe ($\vec{p}_{NORM,a} = \vec{y}_{NORM}$) ist und diese zur Bildung der relativen Gewichte verwendet.

Innerhalb der Berechnung werden die Distanzen als normalverteilte Zufallsvariablen aufgefasst. Die Distanzen können aufgrund ihrer Normierung als Ergebnis eines Zufallsexperiments mit Mittelwert = 0 und Standardabweichung = 1 aufgefasst werden.

Die Normalverteilung ist eine theoretische Verteilung der analytischen Statistik, bei der es sich um eine stetige, symmetrische, eingipflige Verteilung handelt, die sich im Unendlichen asymptotisch der X-Achse nähert. Ihre Bedeutung leitet sich über den zentralen Grenzwertsatz daraus her, dass sie für viele andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen eine Grenzverteilung darstellt, der sich diese Verteilungen asymptotisch nähern. Sie hat für $-\infty < x < \infty$ mit den Parametern μ reell und $\sigma > 0$ die Dichtefunktion:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Die Verteilung ist durch ihre Parameter Mittelwert (μ) und Standardabweichung (σ) bestimmt.

Die Verteilungsfunktion einer normalverteilten Zufallsvariable x hat die Form:

$$F(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad \text{Gl. 3-12}$$

Die Verteilungsfunktion liefert die Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess zufällig einen Wert zwischen $-x$ und x liefert. Das heißt, je größer der Wert für x , umso größer ist der Wahr-

scheinlichkeitswert. In der Ergebnisbildung werden der Verteilungsfunktion die Distanzen ($d_{y,a}^{near}$) als Werte für x übergeben.

$$P(X \in [-x; x]) \\ \Rightarrow P(X \in [-d_{y,a}^{near}; d_{y,a}^{near}])$$

Gl. 3-13

$P(X)$: Wahrscheinlichkeit von X
 X : Normalverteilung

Bei der Ergebnisbildung ist aber die Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess nicht zufällig einen Wert zwischen $-d_{y,a}^{near}$ und $d_{y,a}^{near}$ liefert, also die Umkehrung des Zusammenhangs, von Bedeutung. Das heißt, je größer die Distanzen werden, umso kleiner wird der Wahrscheinlichkeitswert. Als relative Gewichte der Ergebnisbildung werden somit die jeweiligen Umkehrwahrscheinlichkeiten² verwendet.

$$\Rightarrow P(X \notin [-d_{y,a}^{near}; d_{y,a}^{near}])$$

Gl. 3-14

Durch die über die Normalverteilung ermittelten Relativgewichte wird also der folgende Sachverhalt ausgenutzt:

Je unwahrscheinlicher es ist, dass die jeweilige Distanz nicht zufällig zustande kam, desto höher muss der zugehörige Zielgrößenwert aus der Kalibrierdatenbank gewichtet werden.

Das heißt, je ähnlicher die zu klassifizierende Probe einem nächsten Nachbarn aus der Kalibrierdatenbank im Bezug auf die Prüfgrößenwerte ist, umso höher ist ihr zugeordnetes Relativgewicht.

Die aus der Normalverteilung ermittelten Wahrscheinlichkeiten ($w_{d_{y,a}^{near}}$) der normierten Distanzen der nächsten Nachbarn werden zur Gewichtsbildung in ihre Umkehrwahrscheinlichkeiten ($u_{d_{y,a}^{near}}$) transformiert. Diese relativen Gewichte werden multiplikativ mit den zugehörigen Zielgrößenwerten (z_a) der Nachbarn verknüpft und eine Mittelwertbildung durchgeführt. Der durch die gewichtete Mittelwertbildung entstandene Wert stellt den aus den Zielgrößenwerten der nächsten Nachbarn ermittelten Näherungswert der Zielgröße ($z(y)$) der aktuellen Probe dar [Tschu2004].

² Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses

$$\begin{pmatrix} u_{d_{y,0}}^{near} \\ \vdots \\ u_{d_{y,j}}^{near} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} w_{d_{y,0}}^{near} \\ \vdots \\ w_{d_{y,j}}^{near} \end{pmatrix}$$

Gl. 3-15

$$z(y) = \sum_{x=0}^j u_{d_{y,x}}^{near} \cdot z_x$$

3.3.3 Prüferfahrung bei Anwendung des 3MA-Prüfsystems

Im Folgenden werden die bisherigen Erfahrungen bei der Anwendung der 3MA-Prüftechnik und Untersuchungen zum Einfluss von Prüfsystemkomponentenwechseln auf 3MA-Prüfergebnisse vorgestellt.

3.3.3.1 Einflüsse von Werkstoffparametern auf die 3MA-Prüfgrößen

Die Einflüsse von Werkstoffparametern auf die elektromagnetischen Prüfgrößen des 3MA-Verfahrens sollen hier exemplarisch für Härte- und Spannungsänderungen in Werkstoffen für das magnetische Barkhausen-Rauschen veranschaulicht werden.

Das Auftreten von Eigenspannungen hat einen Einfluss auf das magnetische Barkhausen-Rauschen. Es treten abhängig von der Spannungsart (Zug- oder Druckspannung) und dem Spannungsbetrag Amplitudenveränderungen in der Barkhausen-Rausch-Profilkurve auf (siehe Abb. 20) [Altp1990, Altp1995, Altp1997, Altp2006, Behre2005].

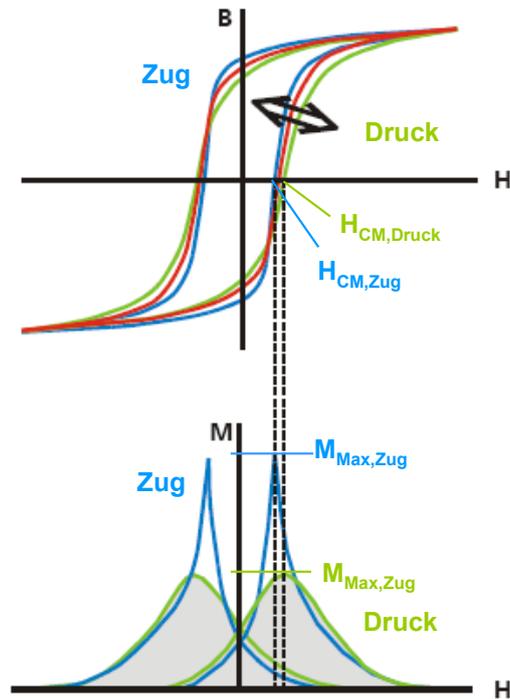


Abb. 20: Lastspannungsabhängigkeit der Hystereseschleife (oben) und der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (unten)

Die Gefügeabhängigkeit der magnetischen Hysterese und daraus resultierend auch der Barkhausen-Rausch-Profilkurve wird am Beispiel zweier Gusseisenwerkstoffe deutlich (siehe Abb. 21) [Maisl1999]. Die Hystereseschleife beziehungsweise die Barkhausen-Rausch-Profilkurve für das weiße Gusseisen unterscheidet sich sowohl im H_C - beziehungsweise H_{CM} -Wert als auch im Amplitudenwert M_{MAX} der Barkhausen-Rausch-Profilkurve von den Kurvenverläufen für das Gusseisen mit Kugelgrafit.

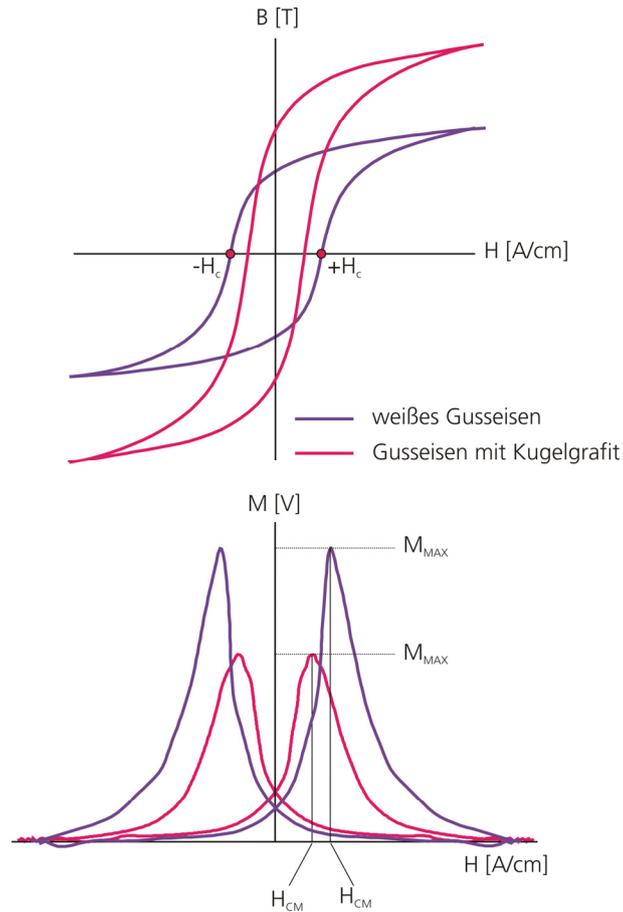


Abb. 21: Gefügeabhängigkeit der Hystereseschleife (oben) und der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (unten) am Beispiel zweier Gusseisenwerkstoffe

Liegen in einem Werkstoff sowohl Gefüge- als auch Spannungseinflüsse vor, so ist eine einzige Prüfgröße zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften nicht ausreichend (siehe Abb. 22). Beispielhaft kann eine Amplitude M_{MAX} von 1,5 V für einen weichen Werkstoff mit einer Spannung von ca. -200 MPa oder einen gehärteten Werkstoff mit einer Spannung von ca. 350 MPa stehen (siehe Abb. 22 (links) graue Pfeile). Diese Zweideutigkeit kann durch eine Verknüpfung mit der Prüfgröße H_{CM} eliminiert werden.

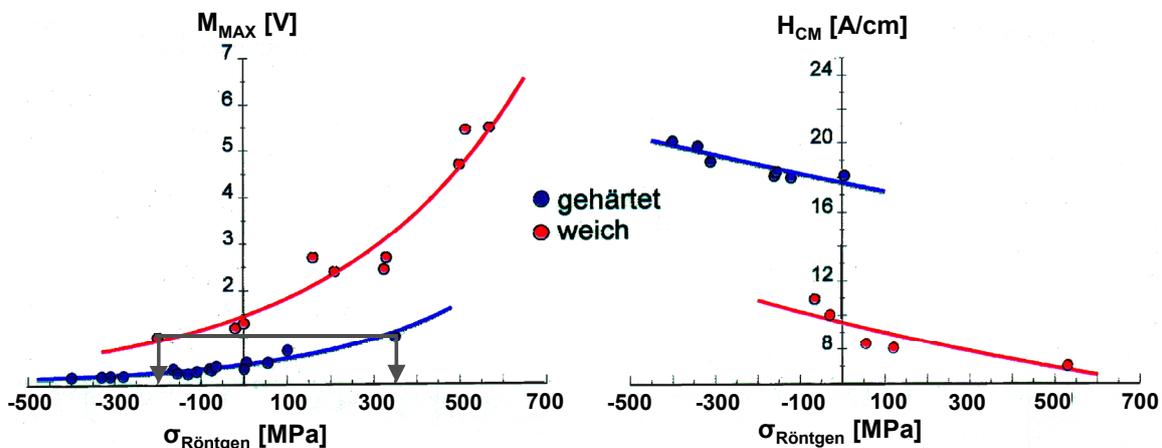


Abb. 22: Darstellung der Prüfgrößen M_{MAX} und H_{CM} in Abhängigkeit von der röntgenographisch ermittelten Eigenspannung $\sigma_{Röntgen}$ für ein weiches und gehärtetes Gefüge

3.3.3.2 Untersuchungen zum Einfluss eines Prüfsystemkomponentenaustausches auf die Kalibrierung

Im Folgenden werden Anwendungen der 3MA-Prüftechnologie beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt wurden. Zum Einsatz kamen beide in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Kalibriermethoden: die Regressionsanalyse und die Mustererkennung. Es wird zu jeder Applikation angegeben, welche und wie viele Komponenten des 3MA-Prüfsystems (Sensoren und Prüfgeräte) zur Verfügung gestanden haben. Zusätzlich wird zur Verdeutlichung der Notwendigkeit einer sensor- und geräteunabhängigen beziehungsweise -übertragbaren Kalibrierung der Einfluss eines Prüfsystemkomponentenaustausches auf das Kalibrierergebnis anhand von Industrieapplikationen vorgestellt. Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Applikationen der 3MA-Prüftechnologie wurden ebenfalls dazu verwendet, die in dieser Arbeit entwickelten Lösungswege (siehe Kapitel 4) für ausgetauschte Prüfsystemkomponenten zu validieren (siehe Kapitel 5).

Allgemein dürfen bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch nur baugleiche Komponenten ausgetauscht werden, denn nur so kann eine anschließende Anpassung der Kalibrierung gesichert durchgeführt werden. Würde beispielsweise ein 3MA-Standard-Sensor durch eine 3MA-Spezial-Sensorik ausgetauscht, lägen unter Umständen keine Ähnlichkeiten beziehungsweise Korrelationen im Prüfgrößenverhalten zwischen den beiden Sensoren vor. Diese eventuell fehlenden Korrelationen lassen sich zum Beispiel durch unterschiedlich große, gelagerte, ausgerichtete und geometrieangepasste Sensorelemente oder durch eine andersartige Ankopplung der Magnetisierung an das Werkstück erklären. Diese fehlenden Korrelationen würden eine Anpassung verschlechtern beziehungsweise verhindern und sind deshalb durch baugleiche Prüfsystemkomponenten auszuschließen.

Anwendung 1: Oberflächenhärtebestimmung an Härtevergleichsplatten

Die Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems bezüglich einer Härteprüfung an Härtevergleichsplatten wurde bereits in Kapitel 1 *Einleitung* beschrieben. Für diese Platten wurde mit konventionellen Härteprüfanlagen die Oberflächenhärte nach DIN 51303 ermittelt. In Tabelle 5 sind die Vickers-Härtewerte der Härtevergleichsplatten aufgelistet.

| Nr. | Härte [HV] |
|-----|------------|
| 1 | 268 ± 5 |
| 2 | 307 ± 5 |
| 3 | 348 ± 5 |
| 4 | 384 ± 5 |
| 5 | 450 ± 5 |
| 6 | 505 ± 5 |
| 7 | 606 ± 6 |
| 8 | 785 ± 6 |
| 9 | 829 ± 5 |

Tabelle 5 : Vickers-Härtewerte der Kalibrierproben

Für diese Anwendung standen mehrere 3MA-Standard-Sensoren und zwei 3MA-Prüfgeräte zur Verfügung. Es handelt sich dabei um neun Sensoren mit den Bezeichnungen: V, B, V K3, M1, M2, V K2, 208 A, 209 A und 210 A. Die beiden 3MA-Prüfgeräte sind mit 1 und 2 bezeichnet. Alle Sensoren sind 3MA-Standard-Sensoren (siehe Kapitel 3.3.1, Abb. 13 und Abb. 14), die jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten gefertigt wurden. Die Sensoren V, B, V K2, V K3, M1 und M2 sind Sensoren der ersten Generation, die vor den restlichen Sensoren der zweiten Generation (208 A, 209 A, 210 A) gefertigt wurden. Dies führt dazu, dass in den drei Sensoren mit neuem Fertigungsdatum eine andere Hallsonde zur Erfassung des magnetischen Feldes eingebaut ist. Die in den neueren Sensoren verwendete Hallsonde wurde aus Gründen der verbesserten Temperaturstabilität und Genauigkeit eingesetzt. Bei den beiden 3MA-Prüfgeräten (1, 2) handelt es sich um zwei baugleiche Prüfgeräte.

Hier sei aus Gründen der Übersicht erneut das Ergebnis der Kalibrierung mit Hilfe einer Regressionsanalyse und zusätzlich die äquivalente Kalibrierung durch eine Mustererkennung beim Austausch von Sensoren in Abb. 23 und für einen Geräteaustausch in Abb. 24 angegeben. Das Regressionspolynom wurde auf maximal quadratische Terme beschränkt. Zum Aufbau der Kalibrierungen wurden mit einem 3MA-Standard-Sensor (V) und einem 3MA-Prüfgerät jeweils 250 Messungen an den neun Härtevergleichsplatten mit bekannten Oberflächenhärtewerten aufgenommen. Die 250 Messungen wurden in 25 Messzyklen aufgenommen. Nach jedem Messzyklus fand eine Neupositionierung des Sensors statt. Somit wurde den Anforderungen an die Wiederholgenauigkeit entsprochen. Jeder Messzyklus bestand aus jeweils 10 hintereinander folgenden 3MA-Messungen zur Messdatenaufnahme aller Prüfgrößen. Sie wurden bei einer Magnetisierungsfrequenz von 100 Hz und einer Magnetfeldaussteuerung von 35 A/cm für alle vier Prüfverfahren durchgeführt. Der Sensor wurde von Hand mit Hilfe einer Führung an die Messposition geführt und gehalten.

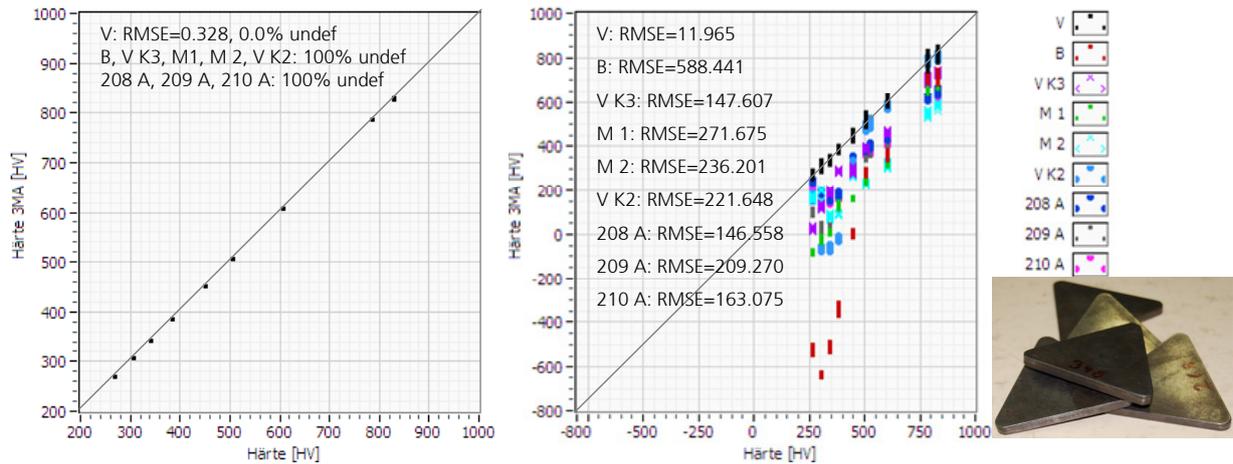


Abb. 23: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms (rechts) des 3MA-Standard-Sensors V auf acht weitere 3MA-Standard-Sensoren, die mit dem gleichen Prüfgerät betrieben wurden

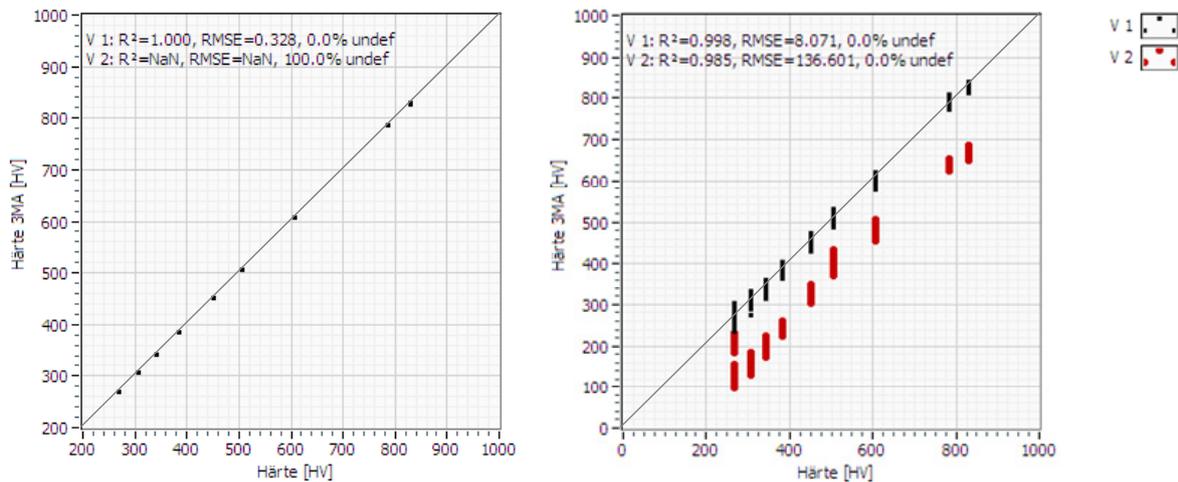


Abb. 24: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms (rechts) des 3MA-Prüfgerätes 1 auf ein weiteres 3MA-Prüfgerät 2, welches mit dem gleichen Sensor (V) betrieben wurde

Die Ergebnisse der Mustererkennungskalibrierungen zeigen in den Abb. 23 und Abb. 24 (jeweils links) sehr gute Korrelationen zu den Vickers-Härtewerten für die Prüfgrößenwerte des Sensors V, der mit Prüfgerät 1 betrieben wurde. Mit diesen Komponenten wurde die jeweilige Mustererkennungskalibrierung angefertigt. Die Prüfgrößenwerte der anderen Sensoren beziehungsweise des anderen Prüfgerätes, die an den gleichen Proben unter identischen Bedingungen aufgenommen wurden, liefern im Gegensatz dazu für alle Messungen undefinierte (undef) also keine Zielgrößenwerte. Dies ist erkennbar an der Angabe „100,0 % undef“ im oberen Teil von Abb. 23 und Abb. 24 (jeweils links), die dafür steht, dass die zugrundeliegende Mustererkennungsdatenbank keine Probe eincharakterisieren konnte. In Abb. 23 und Abb. 24 jeweils auf der rechten Seite sind die Ergebnisse bei Verwendung eines Regressionspolynoms zur Kalibrierung dargestellt. Auch hier stellen sich für die zur Kalibrierung verwendeten Prüfsystemkomponenten (Sensor V, Prüfgerät 1) gute Korrelationen zu den Vickers-Härtewerten ein. Es zeigen sich aber auch starke Abweichungen bezüglich der Güte

des Kalibrierergebnisses bei Austausch einer Prüfsystemkomponente. Hierbei ist beim Austausch eines Sensors die Verschlechterung des Kalibrierergebnisses stärker als beim Austausch eines Prüfgerätes.

Bei der Verwendung anderer Sensoren beziehungsweise Geräte zur Anfertigung der Kalibrierung und anschließender Anwendung auf die restlichen zur Verfügung stehenden Komponenten stellen sich vergleichbare Ergebnisse ein.

Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten

Bei dieser Industrieapplikation handelt es sich um eine Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems bezüglich der zerstörungsfreien Restaustenitgehaltbestimmung, die im Rahmen dieser Arbeit durch Messungen an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten aufgebaut wurde. Bei Restaustenit handelt es sich um eine meistens unerwünschte Phase in Stahl oder Gusseisen, die durch Wärmebehandlung des Stahls beziehungsweise des Gusseisens auftritt. Restaustenit kann durch den Härteprozess im gehärteten Stahl oder Gusseisen zurückbleiben, wenn sich beim zur Härtung notwendigen Abschrecken der Austenit nicht vollständig in das gewünschte Martensit umgewandelt hat. Da sich Austenit in vielen Eigenschaften von dem gewünschten Martensit unterscheidet, ist die Detektion des Restaustenitanteils eine wichtige Prüfaufgabe. Der Restaustenitgehalt wird in der Regel mittels Röntgendiffraktometer-Messungen bestimmt. Dabei findet eine Röntgenbestrahlung der Probe unter Winkelvariation statt. Dadurch werden im Detektor bei gefügespezifischen Winkelpositionen charakteristische Intensitätspeaks aufgenommen. Mit Hilfe der aufintegrierten Intensitätspeaks lässt sich nach abgeschlossener Winkelbestrahlung auf die tatsächlichen Gefügeanteile rückrechnen [Glock1971].

Für diese Kalibrierung standen vier 3MA-Standard-Sensoren und zwei 3MA-Prüfgeräte zur Verfügung. Es handelt sich dabei um die Sensoren mit den Bezeichnungen: V, 208 A, 209 A und 210 A. Die beiden 3MA-Prüfgeräte sind mit 1 und 2 bezeichnet. Alle Sensoren sind 3MA-Standard-Sensoren (siehe Kapitel 3.3.1 *Sensorik der elektromagnetischen 3MA-Prüfung* Abb. 13 und Abb. 14), die jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten gefertigt wurden (vergleiche **Anwendung 1** oben).

Zum Aufbau der Kalibrierung wurden mit einem 3MA-Standard-Sensor (V) und einem 3MA-Prüfgerät (1) jeweils 60 Messungen bei einer Magnetisierungsfrequenz von 250 Hz und einer Magnetfeldaussteuerung von 60 A/cm für die Oberwellenanalyse, die Barkhausen-Rausch-Analyse und die Messungen der Überlagerungspermeabilität sowie 40 A/cm für die Mehrfrequenzwirbelstrommessungen an den Ankerplatten aufgenommen. Die Messdatenaufnahme erfolgte in Messzyklen bestehend aus 10 Messungen und unter Zuhilfenahme einer Sensorführung von Hand. Die Sensorführung führt nicht nur den Sensor, sondern fixiert auch die Ankerplatte während der Messung (siehe Abb. 25 rechts). Zur Berücksichtigung der Wieder-

holgenauigkeit wurde der Sensor nach jedem Messzyklus aus der Führung entfernt und für den nächsten Messzyklus erneut in die Führung eingelegt.

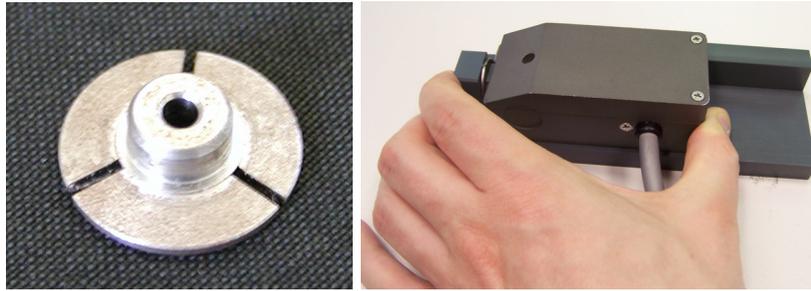


Abb. 25: *Common-Rail-Injektor-Ankerplatte (links); 3MA-Messung einer Ankerplatte von Hand mittels einer Sensorführung (rechts)*

Die betrachtete Zielgröße bei diesem Kalibrierprobensatz ist der Restaustenitgehalt der Ankerplatten. Die Variation des Restaustenitgehaltes wurde durch unterschiedliche Wärmebehandlungen (Anlassen mit und ohne anschließende Tiefkühlung) sichergestellt. Der Kalibrierprobensatz setzt sich aus 21 unterschiedlichen Wärmebehandlungsgruppen bestehend aus je fünf Ankerplatten zusammen. Somit wurden für jede Gruppe jeweils 300 3MA-Messungen aufgenommen. In der folgenden Tabelle sind die Restaustenitgehalte und die Anlasstemperaturen (Anlasst.) der Kalibrierprobengruppen aufgelistet. Dabei wurden die Wärmebehandlungsgruppen ohne Tiefkühlung blau und die mit nach dem Anlassen schwarz dargestellt. Für alle fünf Ankerplatten jeder Gruppe wurde der gemittelte Restaustenitgehalt, der an drei identisch wärmebehandelten Platten durch Röntgendiffraktometer-Messungen ermittelt wurde, verwendet.

| Gruppe | Restaustenitgehalt [%] | Anlasst. [°C] | Gruppe | Restaustenitgehalt [%] | Anlasst. [°C] |
|--------|------------------------|---------------|--------|------------------------|---------------|
| 1 | 47,1 | 20 | 12 | 16,6 | 150 |
| 2 | 44,1 | 150 | 13 | 18,7 | 160 |
| 3 | 41,8 | 160 | 14 | 15,6 | 170 |
| 4 | 39,6 | 170 | 15 | 18,0 | 180 |
| 5 | 41,3 | 180 | 16 | 17,0 | 190 |
| 6 | 41,0 | 190 | 17 | 15,7 | 200 |
| 7 | 38,2 | 200 | 18 | 14,8 | 210 |
| 8 | 36,4 | 210 | 19 | 13,1 | 220 |
| 9 | 31,2 | 220 | 20 | 2,8 | 2400 |
| 10 | 13,6 | 240 | 21 | 8,0 | ohne |
| 11 | 22,3 | 20 | | | |

Tabelle 6: *Restaustenitgehalte und Anlasstemperaturen der Kalibrierproben*

Nach der elektromagnetischen Messdatenaufnahme an den Kalibrierproben wurden aus der so gewonnenen Datenbasis, bestehend aus den elektromagnetischen Prüfgrößen und den korrespondierenden Restaustenitgehalten, durch eine Regressionsanalyse Polynome gebildet. Diese Polynome erfassen den Prüfgrößen-Zielgrößen-Zusammenhang und ermöglichen somit eine Restaustenitbestimmung an Ankerplatten.

Nach der Ermittlung der Kalibrierpolynome wurden zunächst die elektromagnetischen Messungen des zur Kalibrierung verwendeten 3MA-Standard-Sensors und mehrerer anderer 3MA-Standard-Sensoren auf diese Polynome angewandt. Die Datenaufnahme mit den Sensoren wurde identisch zu der Kalibrierdatenaufnahme und ebenfalls mit Prüfgerät 1 ausgeführt. In Abb. 26 sind die Ergebnisse, die die Kalibrierpolynome bei Anwendung auf mehrere Sensoren zeigt, dargestellt.

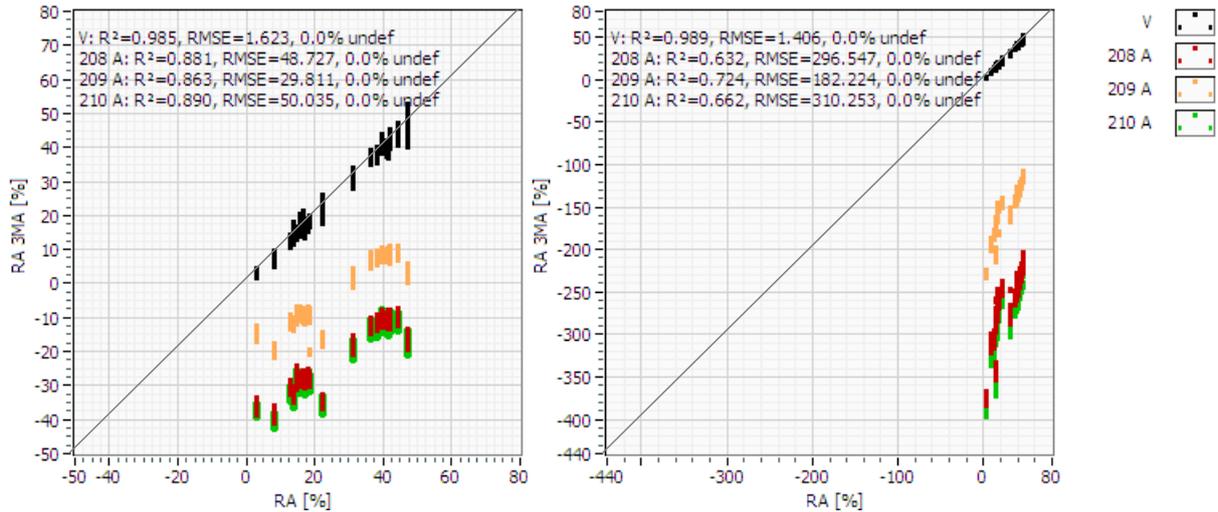


Abb. 26: Ergebnis der Anwendung eines Kalibrierpolynoms mit maximal linearen (links) und maximal quadratischen (rechts) Termen des 3MA-Standard-Sensors V auf drei weitere 3MA-Standard-Sensoren, die mit dem gleichen Prüfgerät betrieben wurden

Der Sensor (V), der für beide Kalibrierungen verwendet wurde, zeigt eine gute Korrelation bezüglich den auf der X-Achse aufgetragenen durch Röntgendiffraktometer-Messungen ermittelten Referenzwerten (RA) und den auf der Y-Achse aufgetragenen zerstörungsfrei ermittelten Restaustenitgehaltswerten (RA 3MA). Es zeigt sich aber auch, dass starke Abweichungen bezüglich der Güte der Kalibrierung durch die Anwendung auf andere Sensoren aufgetreten sind. Die Abweichungen sind bei Anwendung eines Kalibrierpolynoms mit maximal linearen Termen (siehe Abb. 26 (links)) noch geringer als bei einem Kalibrierpolynom mit maximal quadratischen Termen (siehe Abb. 26 (rechts)). Aber auch für ein Kalibrierpolynom mit maximal linearen Termen sind die Abweichungen bereits so stark, dass für den Großteil der Kalibrierproben negative Restaustenitgehalte prognostiziert werden. Dies steigert sich jedoch noch für den Kalibrierpolynom-Fall mit quadratischen Termen. Das im quadratischen Fall für die nicht an der Kalibrierung beteiligten Standard-Sensoren eine noch stärkere Abweichung erreicht wird, lässt sich durch den stärkeren Einfluss der einzelnen Terme bei einem Polynom mit quadratischen Termen erklären, da hier eventuell vorhandene Prüfgrößenabweichungen quadratisch statt linear in die Ergebnisbildung eingehen. Neben dem Polynomgrad der Regressionsterme hat auch die Kalibriermethode selbst einen unterschiedlich starken Einfluss auf das Kalibrierergebnis nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch. Deshalb ist das Ergebnis der Kalibrierung durch Anwendung einer Regressionsanalyse mit

ausschließlich linearen Termen und das äquivalente Kalibrierergebnis durch eine Mustererkennung bei Austausch von Sensoren in Abb. 27 und für einen Gerätetausch in Abb. 28 angegeben. Äquivalent zum Vorgehen für mehrere Sensoren wurde für einen Prüfgeräteaustausch nach der Ermittlung des Kalibrierpolynoms beziehungsweise der Kalibrierdatenbank die elektromagnetischen Messungen des zur Kalibrierung verwendeten 3MA-Prüfgerätes (1) und die elektromagnetischen Messungen eines anderen baugleichen 3MA-Prüfgerätes (2), das mit dem identischen 3MA-Standard-Sensor (V) betrieben wurde, auf dieses Polynom angewandt beziehungsweise mittels der Kalibrierdatenbank eine Mustererkennung mit den Daten des baugleichen Prüfgerätes durchgeführt.

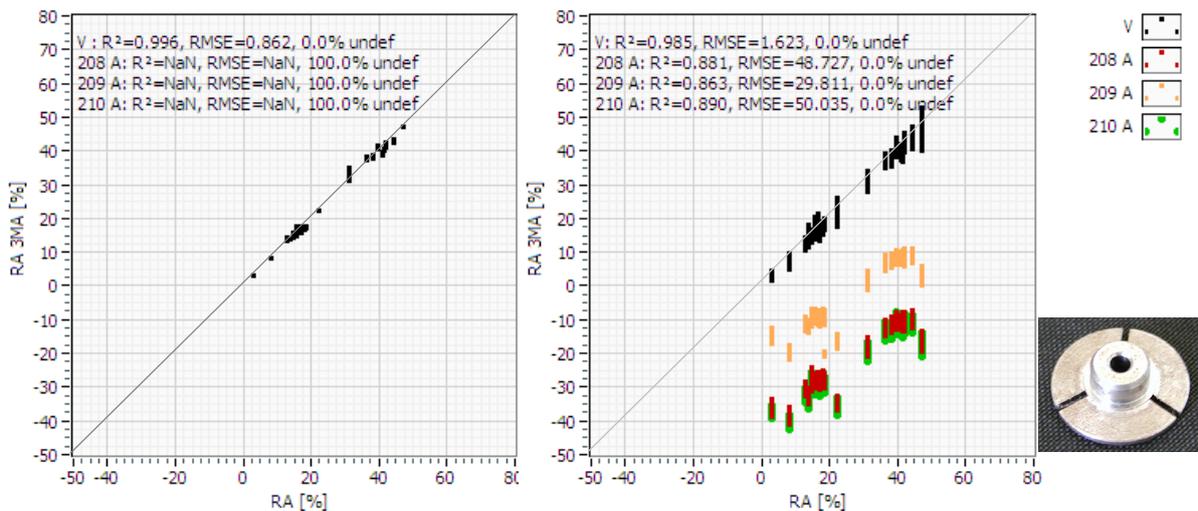


Abb. 27: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal linearen Termen (rechts) des 3MA-Standard-Sensors V auf drei weitere 3MA-Standard-Sensoren, die mit dem gleichen Prüfgerät betrieben wurden

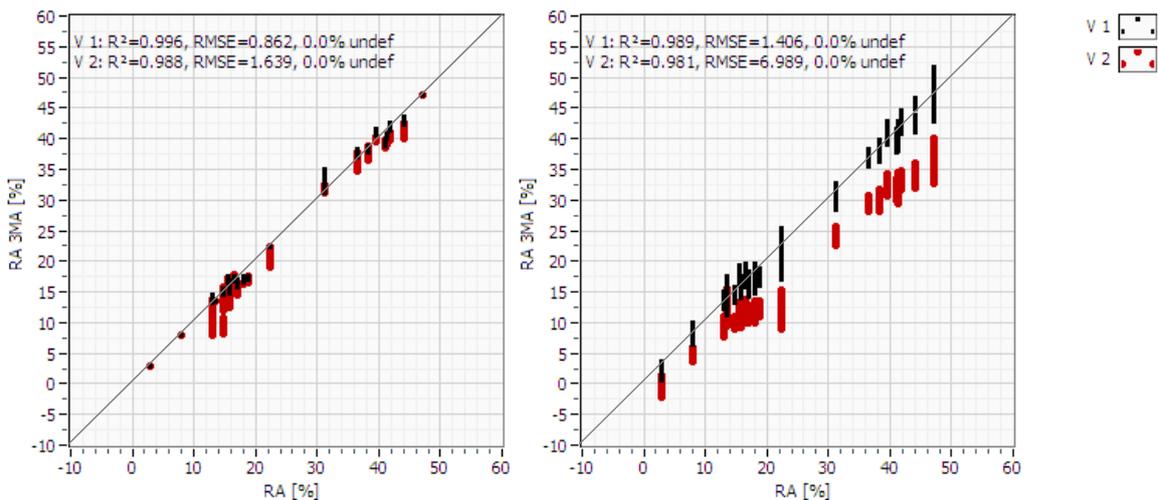


Abb. 28: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen (rechts) des 3MA-Prüfgerätes 1 auf ein weiteres 3MA-Prüfgerät 2, welches mit dem gleichen Sensor (V) betrieben wurde

Bei der Verwendung anderer Sensoren beziehungsweise Geräte zur Anfertigung der Kalibrierung und anschließender Anwendung auf die restlichen zur Verfügung stehenden Komponenten stellen sich vergleichbare Ergebnisse ein.

Diese Applikation verdeutlicht, dass der Effekt eines Geräteaustausches auf die Kalibrierung im Vergleich zu dem Effekt eines Sensortausches geringer ist (vergleiche Abb. 27 mit Abb. 28). Dennoch führt auch der Geräteaustausch zu einer Verschlechterung des Kalibrierergebnisses.

Anwendung 3: Oberflächenhärtebestimmung an zylindrischen Proben

In dieser Industrieapplikation handelt es sich um eine Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems, die durch Messungen an 100 zylindrischen Proben aus 50 CrMo 4 mit bekannten Oberflächenhärtewerten aufgebaut wurde. Die Härtewerte der zylindrischen Proben wurden durch konventionelle Rockwell-Härteprüfung ermittelt. Die Ergebnisse der Rockwell-Härtebestimmung sind in untenstehender Tabelle einschließlich der zugehörigen Wiederholgenauigkeit in HRC für drei Wiederholungsmessungen angegeben.

| Probe | Härte [HRC] | Probe | Härte [HRC] | Probe | Härte [HRC] |
|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
| 1 | 21,8 ± 0,8 | 34 | 39,9 ± 0,1 | 68 | 42,8 ± 0,7 |
| 2 | 21,0 ± 2,0 | 35 | 39,7 ± 1,5 | 69 | 42,2 ± 1,0 |
| 3 | 21,1 ± 0,8 | 36 | 39,2 ± 0,4 | 70 | 42,5 ± 2,4 |
| 4 | 22,7 ± 0,9 | 37 | 38,4 ± 1,1 | 71 | 44,8 ± 1,6 |
| 5 | 21,9 ± 1,9 | 38 | 40,1 ± 0,9 | 72 | 46,8 ± 1,6 |
| 6 | 21,3 ± 0,5 | 39 | 39,1 ± 0,9 | 73 | 47,9 ± 0,2 |
| 7 | 21,9 ± 0,5 | 40 | 38,5 ± 2,1 | 74 | 46,3 ± 2,3 |
| 8 | 21,6 ± 0,8 | 41 | 30,8 ± 0,6 | 75 | 45,0 ± 1,5 |
| 9 | 22,6 ± 1,2 | 42 | 30,1 ± 0,9 | 76 | 46,3 ± 2,4 |
| 10 | 21,5 ± 0,2 | 43 | 30,6 ± 0,3 | 77 | 47,9 ± 1,6 |
| 11 | 26,1 ± 0,3 | 44 | 29,0 ± 1,0 | 78 | 44,6 ± 1,6 |
| 12 | 26,2 ± 0,5 | 45 | 29,7 ± 1,0 | 79 | 46,5 ± 1,6 |
| 13 | 26,3 ± 1,4 | 46 | 29,5 ± 1,6 | 80 | 47,0 ± 2,5 |
| 14 | 26,6 ± 1,4 | 47 | 29,0 ± 1,3 | 81 | 30,3 ± 1,4 |
| 15 | 27,9 ± 0,9 | 48 | 29,8 ± 1,9 | 82 | 31,6 ± 0,6 |
| 16 | 25,5 ± 1,3 | 49 | 29,2 ± 1,9 | 83 | 30,5 ± 1,2 |
| 17 | 24,9 ± 1,2 | 50 | 29,5 ± 0,4 | 84 | 30,8 ± 1,1 |
| 18 | 25,8 ± 0,2 | 51 | 35,3 ± 0,9 | 85 | 28,4 ± 2,2 |
| 19 | 26,8 ± 0,8 | 52 | 34,1 ± 0,3 | 86 | 27,8 ± 2,3 |
| 20 | 25,7 ± 0,9 | 53 | 32,5 ± 2,0 | 87 | 30,8 ± 0,7 |
| 21 | 31,3 ± 1,2 | 54 | 35,4 ± 0,4 | 88 | 30,8 ± 1,1 |
| 22 | 32,0 ± 0,2 | 55 | 35,7 ± 1,0 | 89 | 26,3 ± 0,7 |
| 23 | 32,5 ± 1,1 | 56 | 33,7 ± 1,3 | 90 | 25,7 ± 0,6 |
| 24 | 31,4 ± 1,7 | 57 | 34,1 ± 0,5 | 91 | 37,2 ± 1,2 |
| 25 | 31,8 ± 0,8 | 58 | 32,7 ± 0,5 | 92 | 36,5 ± 0,4 |
| 26 | 31,8 ± 0,2 | 59 | 34,6 ± 1,3 | 93 | 37,8 ± 0,8 |
| 27 | 31,4 ± 0,5 | 60 | 34,2 ± 1,3 | 94 | 34,8 ± 0,9 |
| 28 | 31,4 ± 0,5 | 62 | 42,5 ± 1,1 | 95 | 38,3 ± 0,7 |
| 29 | 31,8 ± 1,7 | 63 | 41,4 ± 2,6 | 96 | 37,8 ± 1,0 |
| 30 | 31,3 ± 0,9 | 64 | 43,5 ± 0,8 | 97 | 37,6 ± 1,5 |
| 31 | 39,4 ± 0,8 | 65 | 42,2 ± 1,1 | 98 | 39,0 ± 1,9 |
| 32 | 39,1 ± 1,1 | 66 | 41,4 ± 0,8 | 99 | 37,5 ± 1,7 |
| 33 | 40,3 ± 2,1 | 67 | 43,0 ± 0,8 | 100 | 36,8 ± 2,4 |

Tabelle 7: Rockwell-Härtewerte der Kalibrierproben

Zum Aufbau der Kalibrierung wurden mit einem 3MA-Spezial-Sensor (siehe Abb. 16) für zylindrische Proben (O) und einem 3MA-Prüfgerät je 20 Sweep-Messungen bei einer Magnetisierungsfrequenz von 15 Hz und 50 Hz und einer Magnetfeldaussteuerung von 60 A/cm an den 100 zylinderförmigen Proben aufgenommen. Anschließend wurde aus der so gewonnenen Datenbasis mit den elektromagnetischen Prüfgrößen und den korrespondierenden Oberflächenhärtewerten eine Mustererkennung durchgeführt und durch eine Regressionsanalyse ein Polynom mit maximal quadratischen Termen gebildet. Dieses Polynom erfasst den Prüfgrößen-Zielgrößen-Zusammenhang und ermöglicht somit eine Härteprüfung an zylindrischen Proben.

Nach der Ermittlung des Kalibrierpolynoms wurde dieses auf einen anderen baugleichen 3MA-Spezial-Sensor (E) angewandt. Äquivalent wurde bei der Kalibrierung durch eine Mustererkennung vorgegangen. Hierzu wurden an der Probe Nummer 10 noch Normierungsdaten aufgenommen. Dadurch wurde eine Kalibrierdatenbank geschaffen, die durch eine Nearest Neighbor-Suche eine Mustererkennungskalibrierung bezüglich der Härteermittlung an zylinderförmigen Proben umsetzt. Die Datenaufnahme mit dem baugleichen Sensor wurde identisch zu der Kalibrierdatenaufnahme ausgeführt. In Abb. 29 sind die Ergebnisse, die das Kalibrierpolynom und die Mustererkennung bei Anwendung auf zwei baugleiche Spezial-Sensoren zeigen, dargestellt.

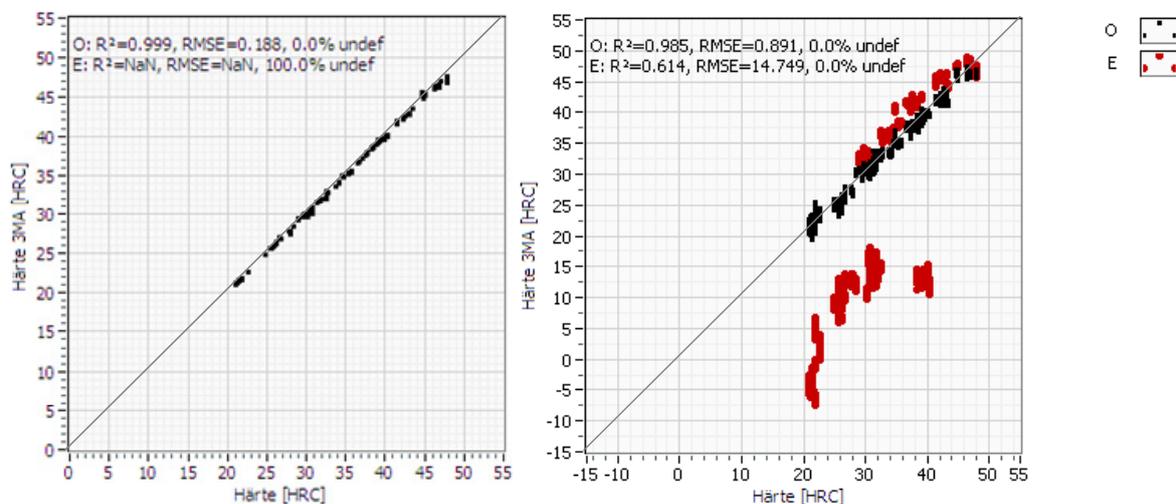


Abb. 29: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms (rechts) des 3MA-Spezial-Sensors O auf einen weiteren 3MA-Spezial-Sensor E, der mit dem gleichen Prüfgerät betrieben wurde

Auch in diesem Beispiel zeigt der zur Kalibrierung verwendete Sensor (O) eine gute Korrelation bezüglich der auf der X-Achse aufgetragenen mittels der Eindringprüfung nach Rockwell ermittelten Referenzwerte und dem auf der Y-Achse aufgetragenen zerstörungsfrei ermittelten Oberflächenhärtewerten. Es zeigt sich aber auch, dass bei der Regressionsanalyse starke Abweichungen bezüglich der Güte der Kalibrierung durch die Anwendung des baugleichen Spezial-Sensors (E) aufgetreten sind. Das Ergebnis der Mustererkennungskalibrierung zeigt

eine sehr gute Korrelation für die Prüfgrößenwerte des Sensors O, mit dem die Mustererkennungskalibrierung angefertigt wurde. Die Prüfgrößenwerte des zweiten Sensors E, die an den gleichen Proben unter identischen Bedingungen aufgenommen wurden, liefern im Gegensatz dazu für alle Messungen keine Zielgrößenwerte (siehe Abb. 29 (links) „100% undef“).

Bei der Verwendung anderer Sensoren beziehungsweise Geräte zur Anfertigung der Kalibrierung und anschließender Anwendung auf die restlichen zur Verfügung stehenden Komponenten, stellen sich vergleichbare Ergebnisse ein.

Anwendung 4: Restaustenitgehaltbestimmung an Vierkantproben

Hier wurde mit Hilfe der 3MA-Prüftechnologie eine Kalibrierung aufgebaut, die es ermöglicht, den Restaustenitanteil an Vierkantproben zerstörungsfrei zu bestimmen. Bei den Vierkantproben handelt es sich um 20x20x160 (mm³) große Proben aus 16 MnCr 5.



Abb. 30: Vierkantproben aus 16 MnCr 5

Zu allen Proben waren die zugehörigen Restaustenitgehalte bekannt. Sie wurden für jede Probe mit Hilfe der Mößbauerspektroskopie in Rückstreugeometrie (CXMS) ermittelt. Diese Röntgenspektroskopie nutzt die Entdeckung der rückstoßfreien Kernresonanzabsorption von γ -Strahlen durch Rudolf Ludwig Mößbauer. Es handelt sich um eine Spektroskopie an Kernzuständen, die empfindlich auf Veränderungen ihrer elektronischen und magnetischen Umgebung reagieren [Mössb1959, Gosne1975]. Dies ermöglicht die Bestimmung des Restaustenitanteils der Proben. In der folgenden Tabelle sind die Restaustenitgehalte den 11 Kalibrierproben zugeordnet. Zusätzlich ist die Streuung des Referenzverfahrens mit angegeben.

| Probe | Restaustenitgehalt [%] |
|-------|------------------------|
| 6.1 | 7,9 ± 1,2 |
| 6.2 | 12,2 ± 0,8 |
| 6.3 | 14,6 ± 0,8 |
| 6.4 | 12,7 ± 0,8 |
| 6.5 | 13,3 ± 0,8 |
| 6.6 | 21,6 ± 0,7 |
| 6.7 | 14,8 ± 0,8 |
| 6.8 | 35,1 ± 0,9 |
| 6.9 | 13,0 ± 0,8 |
| 6.10 | 22,4 ± 0,9 |
| 6.11 | 25,0 ± 0,9 |

Tabelle 8: Restaustenitgehalte der 11 Kalibrierproben

Für diese Kalibrierungen standen mehrere 3MA-Standard-Sensoren und zwei 3MA-Prüfgeräte zur Verfügung. Es handelt sich dabei um fünf Sensoren mit den Bezeichnungen V, 208 A, 209 A, 210 A und V K2. Die beiden 3MA-Prüfgeräte sind mit 1 und 2 bezeichnet. Alle Sensoren sind 3MA-Standard-Sensoren (siehe Kapitel 3.3.1 *Sensorik der elektromagnetischen 3MA-Prüfung* Abb. 13 und Abb. 14), die jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten gefertigt wurden (vergleiche **Anwendung 1** oben).

Die Kalibrierdaten wurden an den 11 Vierkantproben durch jeweils 100 Messungen bei einer Magnetisierungsfrequenz von 100 Hz und einer Magnetfeldaussteuerung von 50 A/cm aufgenommen. Dafür wurden ein 3MA-Standard-Sensor (V) und ein 3MA-Prüfgerät verwendet. Nach der Kalibrierdatenaufnahme wurde unter Einbeziehung der Referenz-Restaustenitwerte eine Kalibrierung durch die Anwendung einer Regressionsanalyse und einer Mustererkennung umgesetzt. Die Regressionsanalyse hat ein Polynom mit maximal quadratischen Termen generiert, dass in Abb. 31 auf den zur Kalibrierpolynomermittlung verwendeten Sensor (V) auf vier weitere 3MA-Standard-Sensoren angewandt wurde. Das Kalibrierergebnis für die Anwendung einer Mustererkennung ist ebenfalls in Abb. 31 dargestellt. Hierzu wurden noch Normierungsmessungen an der Probe 6.8 aufgenommen und in die Kalibrierdatenbank integriert.

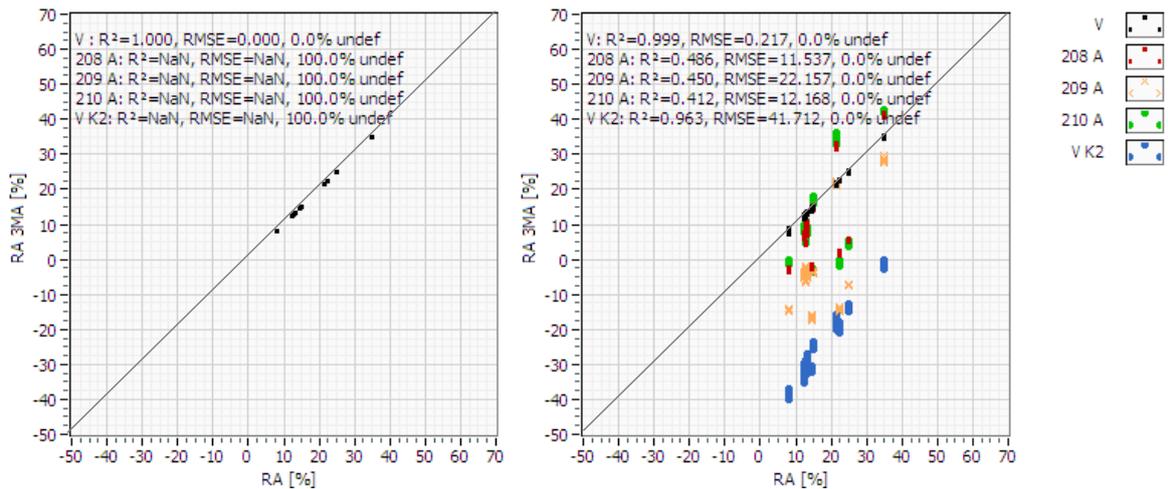


Abb. 31: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen (rechts) des 3MA-Standard-Sensors V auf vier weitere 3MA-Standard-Sensoren, die mit dem gleichen Prüfgerät betrieben wurden

Abb. 31 zeigt deutlich, dass für den Sensor V die Kalibrierergebnisse eine gute Korrelation zu den Referenzwerten zeigen. Für die anderen vier Sensoren (208 A, 209 A, 210 A, V K2) zeigen sich starke Abweichungen bezüglich der Referenzwerte, wenn man das Kalibrierpolynom eines anderen Sensors auf die Prüfgrößenwerte der vier Sensoren anwendet. Für die Mustererkennung werden die Daten der vier anderen Sensoren nicht erkannt, obwohl die Datenaufnahme mit den vier anderen Sensoren äquivalent zur Kalibrierdatenaufnahme mit dem Sensor V ausgeführt und für diese Prüfaufgabe für alle Sensoren mit dem gleichen 3MA-Prüfgerät gearbeitet wurde.

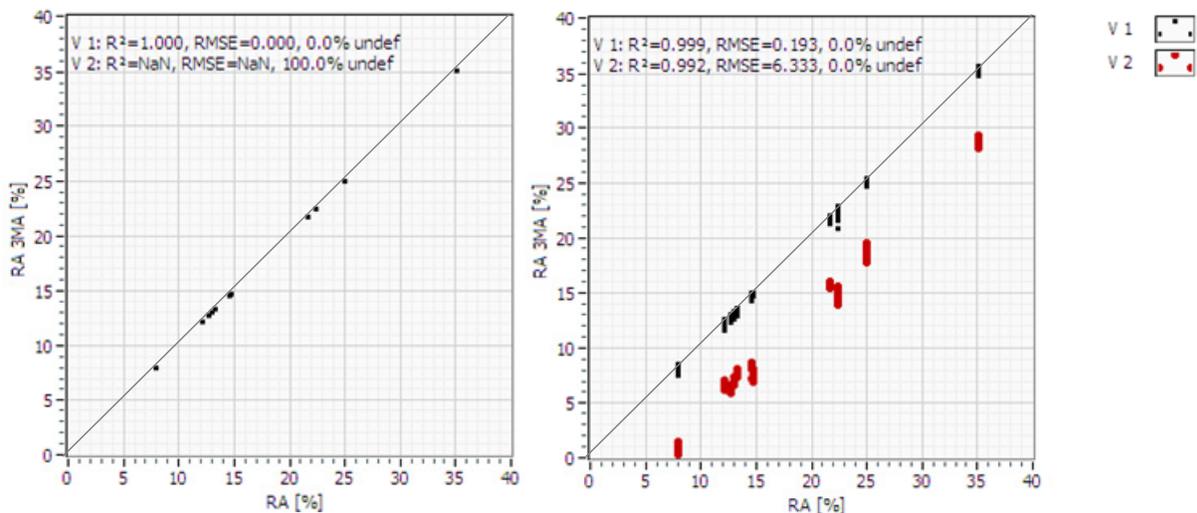


Abb. 32: Ergebnis der Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen (rechts) des 3MA-Prüfgerätes 1 auf ein weiteres 3MA-Prüfgerät 2, welches mit dem gleichen Sensor (V) betrieben wurde

Aus Abb. 32 wird deutlich, dass für eine Regressionsanalyse auch durch einen Gerätewechsel Abweichungen in dem Kalibrierergebnis auftreten können. Bei einer Mustererkennung

kann der Gerätewechsel dazu führen, dass nach einem Wechsel alle Messungen mit dem ausgetauschten Gerät nicht mehr charakterisiert werden können.

Bei der Verwendung anderer Sensoren beziehungsweise Geräte zur Anfertigung der Kalibrierung und anschließender Anwendung auf die restlichen zur Verfügung stehenden Komponenten stellen sich vergleichbare Ergebnisse ein.

Anwendung 5: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerbolzen

Diese Industrieapplikation befasst sich mit einer Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems, die durch Messungen an Common-Rail-Injektor-Ankerbolzen aufgebaut wurde [Tschu2007].



Abb. 33: Ankerbolzen eines Common-Rail-Injektors

Für diese Kalibrierungen standen mehrere 3MA-Prüfgeräte und ein 3MA-Spezial-Sensor zur Ankerbolzenprüfung (siehe Abb. 15 und Abb. 34) zur Verfügung. Es handelt sich dabei um fünf Prüfgeräte mit den Bezeichnungen: 1, 2, 3, 4 und 5.

Zum Aufbau der Kalibrierung wurden mit einem 3MA-Spezial-Sensor und einem 3MA-Prüfgerät jeweils 25 Messungen bei einer Magnetisierungsfrequenz von 250 Hz und einer Magnetfeldaussteuerung von 40 A/cm an den Ankerbolzen aufgenommen. Die 25 Messungen pro Ankerbolzen wurden in jeweils 5x5 Messzyklen aufgenommen. Nach jedem Zyklus wurde die Spezielsensorik geöffnet und der zu vermessende Ankerbolzen in seiner Position innerhalb des Sensors variiert (siehe Abb. 34).

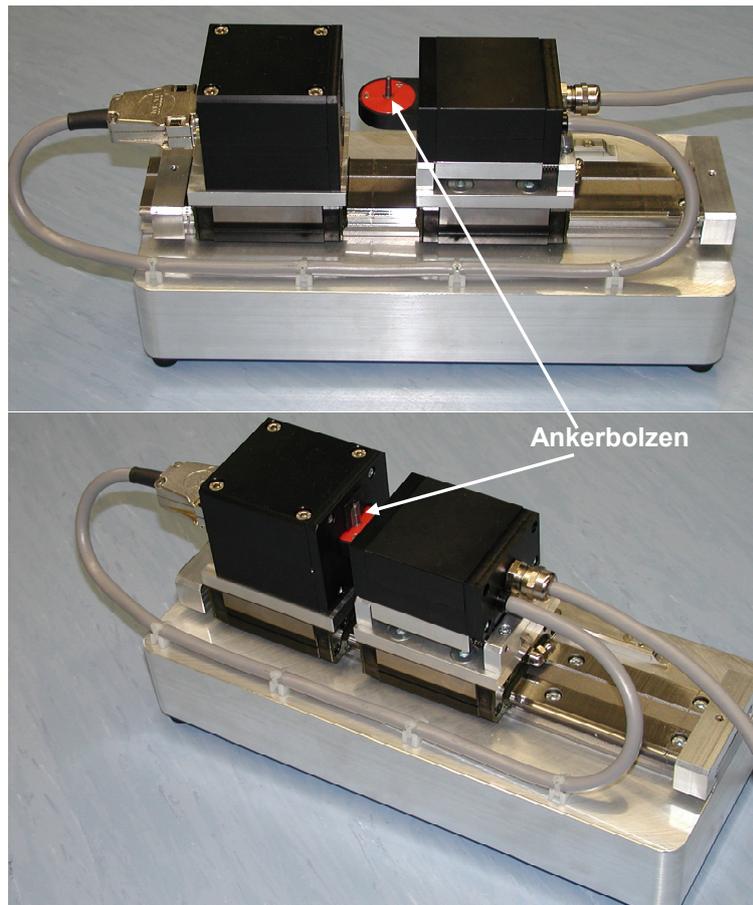


Abb. 34: *Spezial-Sensor zur Ankerbolzenmessung mit eingelegtem Ankerbolzen in geöffnetem und geschlossenem Zustand*

Die betrachtete Zielgröße bei dieser Kalibrierung beziehungsweise diesem Kalibrierprobensatz ist der Restaustenitgehalt in dem Gefüge der Ankerbolzen. Die Variation des Restaustenitgehalts wurde durch unterschiedliche Wärmebehandlungen sichergestellt. Der Kalibrierprobensatz setzt sich aus fünf unterschiedlichen Wärmebehandlungsgruppen bestehend aus unterschiedlich vielen Ankerbolzen zusammen (siehe Tabelle 9). In der folgenden Tabelle sind die Restaustenitgehalte und die Tiefkühltemperaturen (TK-Temperatur) der Kalibrierprobengruppen, sowie die Anzahl der Bolzen pro Gruppe aufgelistet. Für alle Ankerbolzen jeder Gruppe wurde der gemittelte Restaustenitgehalt, der an drei identisch wärmebehandelten Bolzen durch Röntgendiffraktometer-Messungen ermittelt wurde, verwendet.

| Gruppe | Restaustenitgehalt [%] | TK-Temperatur [°C] | Probenanzahl |
|--------|------------------------|--------------------|--------------|
| 1 | $2,6 \pm 0,5$ | -196 | 44 |
| 2 | $2,6 \pm 0,9$ | -100 | 43 |
| 3 | $4,6 \pm 0,6$ | -50 | 44 |
| 4 | $11,3 \pm 1,9$ | 20 | 43 |
| 5 | $5,8 \pm 0,4$ | -70 | 15 |

Tabelle 9: *Restaustenitgehalte der Kalibrierproben*

Nach der Datenaufnahme mit der Spezielsensorik und dem Prüfgerät 1 wurden mit Hilfe von Regressionsanalysen mehrere Polynome gebildet, die den Restaustenitgehalt an Ankerbol-

zen aus den zerstörungsfreien, elektromagnetischen Prüfgrößen der 3MA-Technologie ermittelt. Die Polynome unterscheiden sich in Ihrem Grad und in den an der Polynombildung beteiligten Prüfverfahren. In Abb. 35 sind die Ergebnisse für die Anwendung der Kalibrierpolynome auf die Prüfgrößen des zur Kalibrierung verwendeten Prüfgerätes (1) und vier weiterer baugleicher Prüfgeräte (2, 3, 4 und 5) dargestellt.

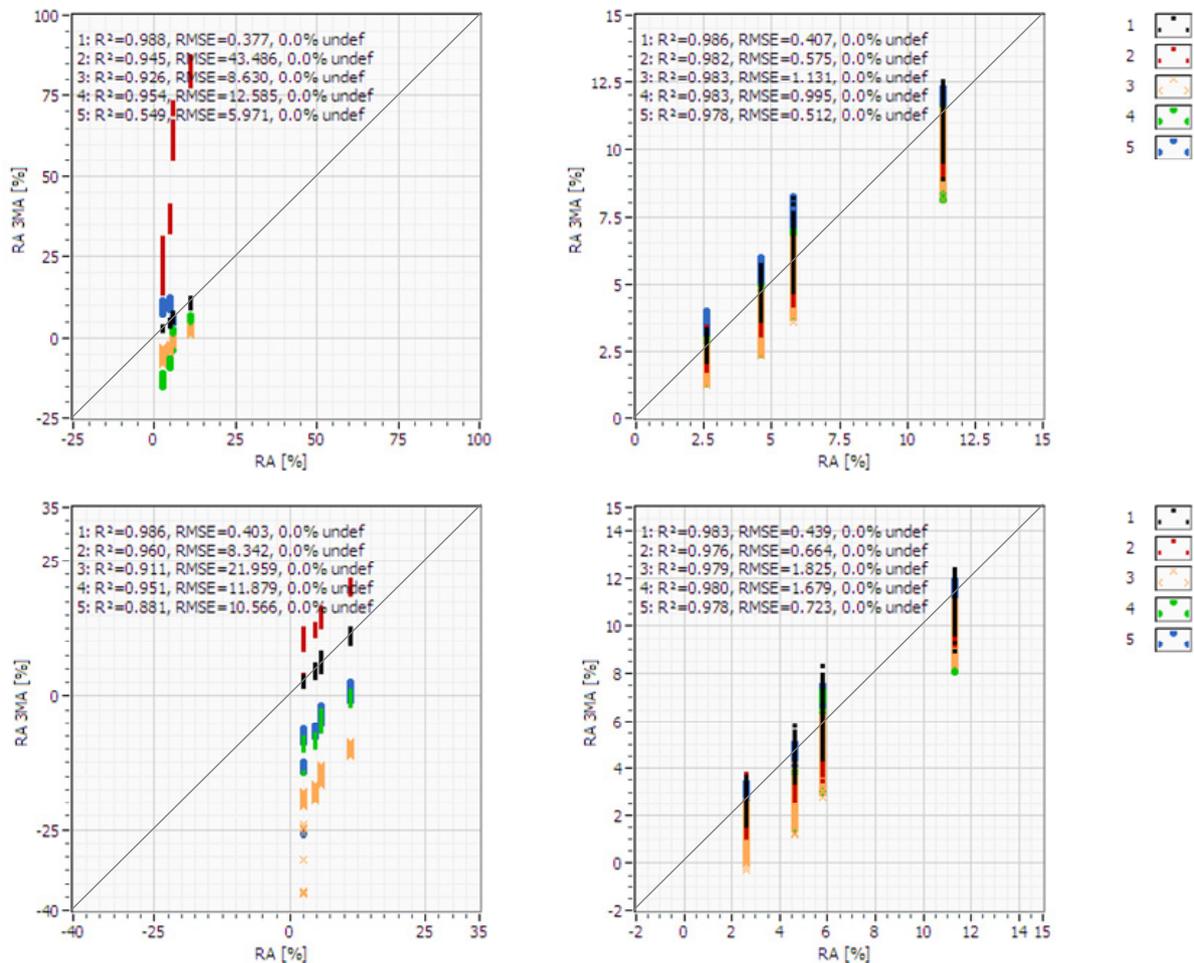


Abb. 35: Ergebnisse für unterschiedliche Kalibrierungen, die mit Hilfe des Spezial-Sensors und dem Prüfgerät 1 angefertigt wurden, angewandt auf die äquivalent zur Kalibrierdatenaufnahme mit vier anderen baugleichen Prüfgeräten (2, 3, 4, und 5) ermittelten Daten des Kalibrierprobensatzes.

In Abb. 35 sind vier unterschiedliche Kalibrierungen auf Messdaten angewandt worden, die mit unterschiedlichen Prüfgeräten an den identischen Kalibrierproben aufgenommen wurden. Im oberen, linken Teil der Abbildung wurde ein Polynom mit maximal quadratischen Termen aus allen vier 3MA-Prüfverfahren ermittelt und auf alle Messdaten angewandt. Der rechte, obere Teil der Abbildung zeigt die Anwendung eines unter Ausschluss der Wirbelstromimpedanzanalyse aber ebenfalls mit maximal quadratischen Termen ermittelten Polynoms auf die gleichen Messdaten. Äquivalent dazu ist im unteren, linken beziehungsweise rechten Teil die Anwendung eines Polynoms mit maximal linearen Termen aus allen vier Prüfverfahren beziehungsweise ohne Verwendung der Daten aus der Wirbelstromimpedanzanalyse dargestellt. Aus Abb. 35 wird deutlich, dass unabhängig von dem Grad des Polynoms und den an

der Polynombildung beteiligten Prüfverfahren das Ergebnis der Kalibrierung für das Prüfgerät 1 und der Spezialsensorik stets gute Korrelationen liefert. Bei Anwendung dieses Polynoms auf andere Prüfgeräte und derselben Spezialsensorik wird der Einfluss der Prüfgeräte deutlich. Es lässt sich erkennen, dass die beiden Ergebnisdarstellungen auf der rechten Seite unabhängig vom Polynomgrad deutlich bessere, wenn auch nicht perfekte Resultate für einen Prüfgeräteaustausch zeigen, als die Darstellungen auf der linken Seite. Dies lässt sich durch den bereits in Kapitel 3.3.3.3.2 *Einfluss eines Geräteaustausches auf die Prüfgrößen* beschriebenen starken Einfluss eines Prüfgeräteaustausches auf die Prüfgrößenwerte der Wirbelstromimpedanzanalyse zurückführen (siehe Abb. 45 und Abb. 46). Dies zeigt sich auch unter Verwendung einer Mustererkennung zur Kalibrierung. Auch hier wird durch die Integration (siehe Abb. 36 links) beziehungsweise durch den Ausschluss der Wirbelstromimpedanzanalyse in die Mustererkennungskalibrierung (siehe Abb. 36 rechts) ein Ergebnisunterschied deutlich, der in Abb. 36 dargestellt ist.

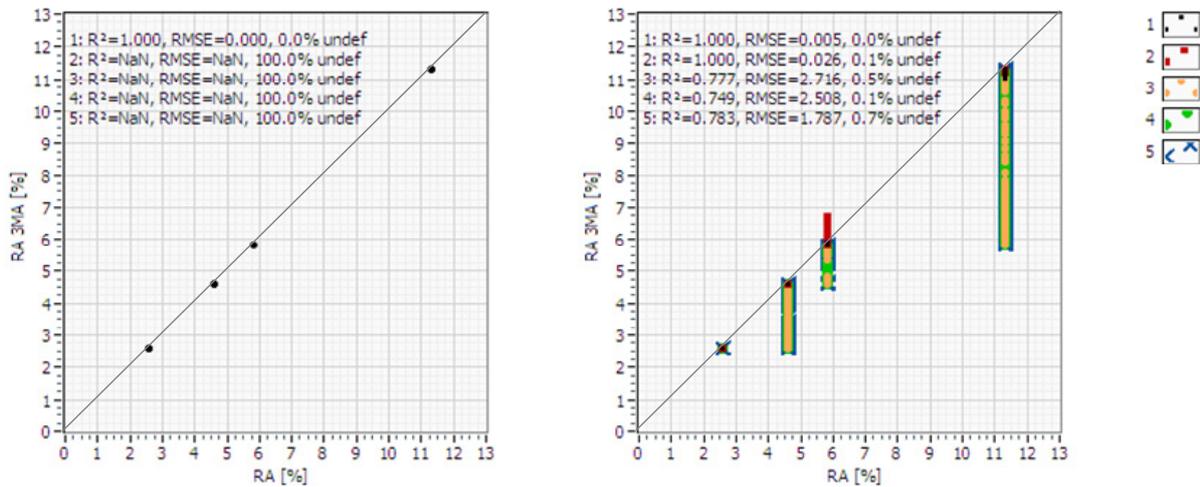


Abb. 36: Kalibrierergebnisse bei Verwendung von Mustererkennungen, die mit Hilfe des Spezial-Sensors und dem Prüfgerät 1 angefertigt wurden, angewandt auf die äquivalent zur Kalibrierdatenaufnahme mit vier anderen baugleichen Prüfgeräten (2, 3, 4, und 5) ermittelten Daten des Kalibrierprobensatzes

Bei der Verwendung anderer Geräte zur Anfertigung der Kalibrierung und anschließender Anwendung auf die restlichen zur Verfügung stehenden Geräte stellen sich vergleichbare Ergebnisse ein.

3.3.3.3 Untersuchungen zum Einfluss eines Prüfsystemkomponentenaustausches auf die elektromagnetischen Prüfgrößen

In Kapitel 3.3.3.1 wurde der Einfluss eines Sensor- und eines Geräte austausches auf eine zugrundeliegende Kalibrierung anhand von Industrieapplikationen gezeigt. Eine Kalibrierung basiert grundsätzlich auf Zusammenhängen zwischen Prüf- und Zielgrößen. Dies bedeutet, dass die Ursache für den Einfluss auf die Kalibrierung auf Veränderungen des Prüfgrößenraumes zurückzuführen ist. Diese Prüfgrößenveränderungen verursachen wiederum ihrerseits, dass ein Kalibrierpolynom aus einer Regressionsanalyse oder einer Ähnlichkeitsbetrachtung resultierend aus einer Mustererkennung bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch zu falschen Zielgrößenwerten führen kann. Da sich bei einem Sensor- beziehungsweise Geräte austausch unterschiedlich starke Einflüsse auf die Kalibrierung einstellen, werden im Folgenden die Einflüsse auf die Prüfgrößen für Sensor- und Geräte austausch separat betrachtet.

3.3.3.3.1 *Einfluss eines Sensor austausches auf die Prüfgrößen*

In Abb. 37 bis Abb. 40 sind für **Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten** die Unterschiede im Prüfgrößenverhalten, die sich an den Kalibrier-Ankerplatten einstellen, für die vier betrachteten Sensoren (V, 208 A, 209 A, 210 A) prüfverfahrenspezifisch über den Restaustenitgehalt dargestellt. Zunächst lässt sich feststellen, dass in allen vier Prüfverfahren Einflüsse des Sensorwechsels deutlich werden.

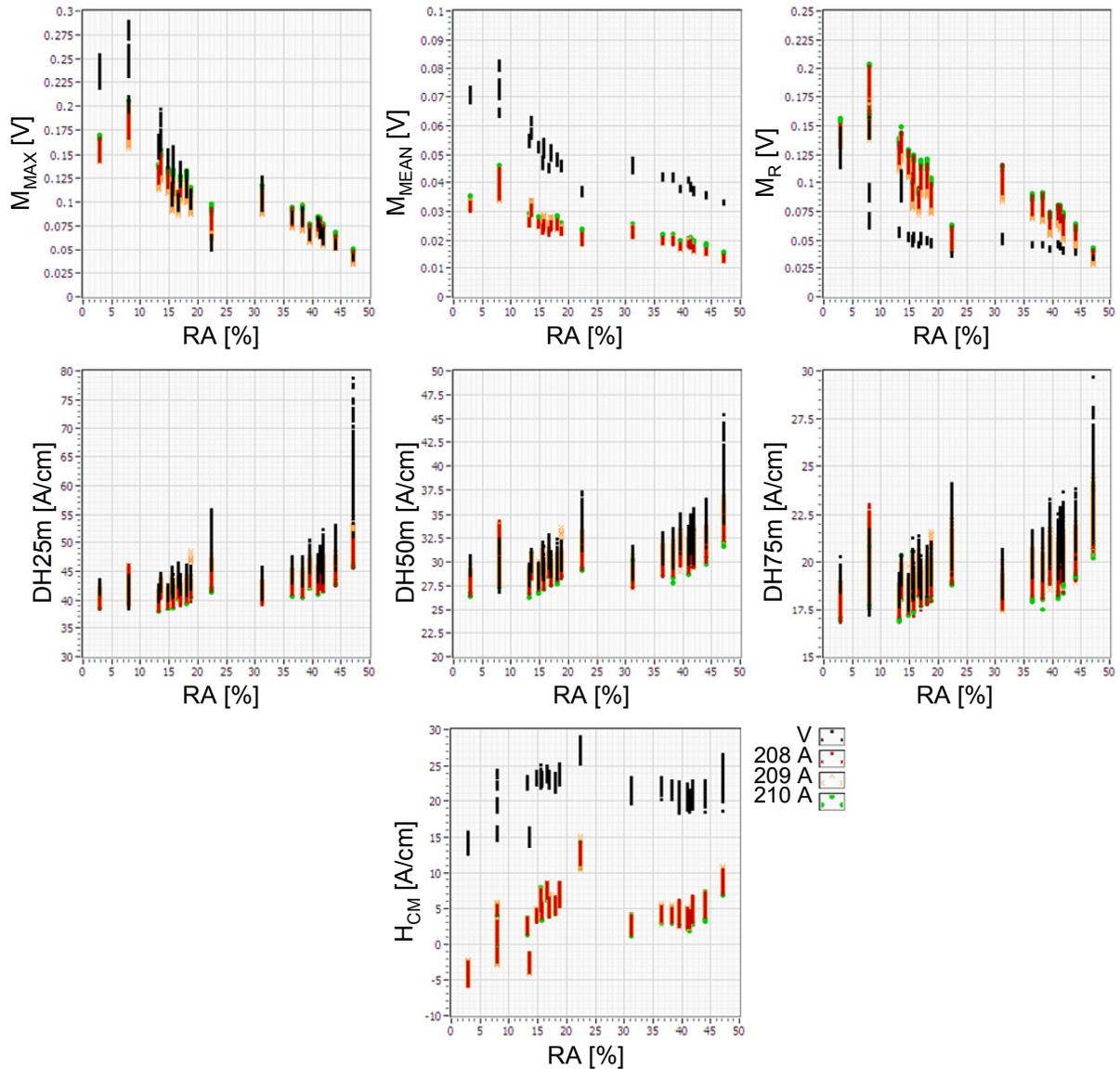


Abb. 37: Verhalten der 7 aus der Barkhausen-Rausch-Analyse abgeleiteten Prüfgrößen im betrachteten Zielgrößenbereich für vier 3MA-Standard-Sensoren an dem gleichen 3MA-Prüfgerät

Im Abb. 37 ist das Prüfgrößenverhalten an den Kalibrier-Ankerplatten für die vier Sensoren anhand der Analyse des magnetischen Barkhausen-Rauschens dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Barkhausen-Rausch-Analyse bedingt durch einen Sensoraustausch Prüfgrößen mit unterschiedlichem Verhalten als Funktion der Zielgröße liefert. So zeigen die Aufweitungen der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (DH_{25m} , DH_{50m} und DH_{75m}) und das Maximum der Profilkurve (M_{MAX}) eine deutlich geringere Beeinflussung durch den Sensortausch als die anderen drei Prüfgrößen. Diese drei Prüfgrößen zeigen eine Art Offset-Verschiebung (M_{MEAN} , H_{CM}) mit einer zusätzlichen Phasen-Verschiebung des Prüfgrößenverhaltens über den betrachteten Zielgrößenbereich (M_R).

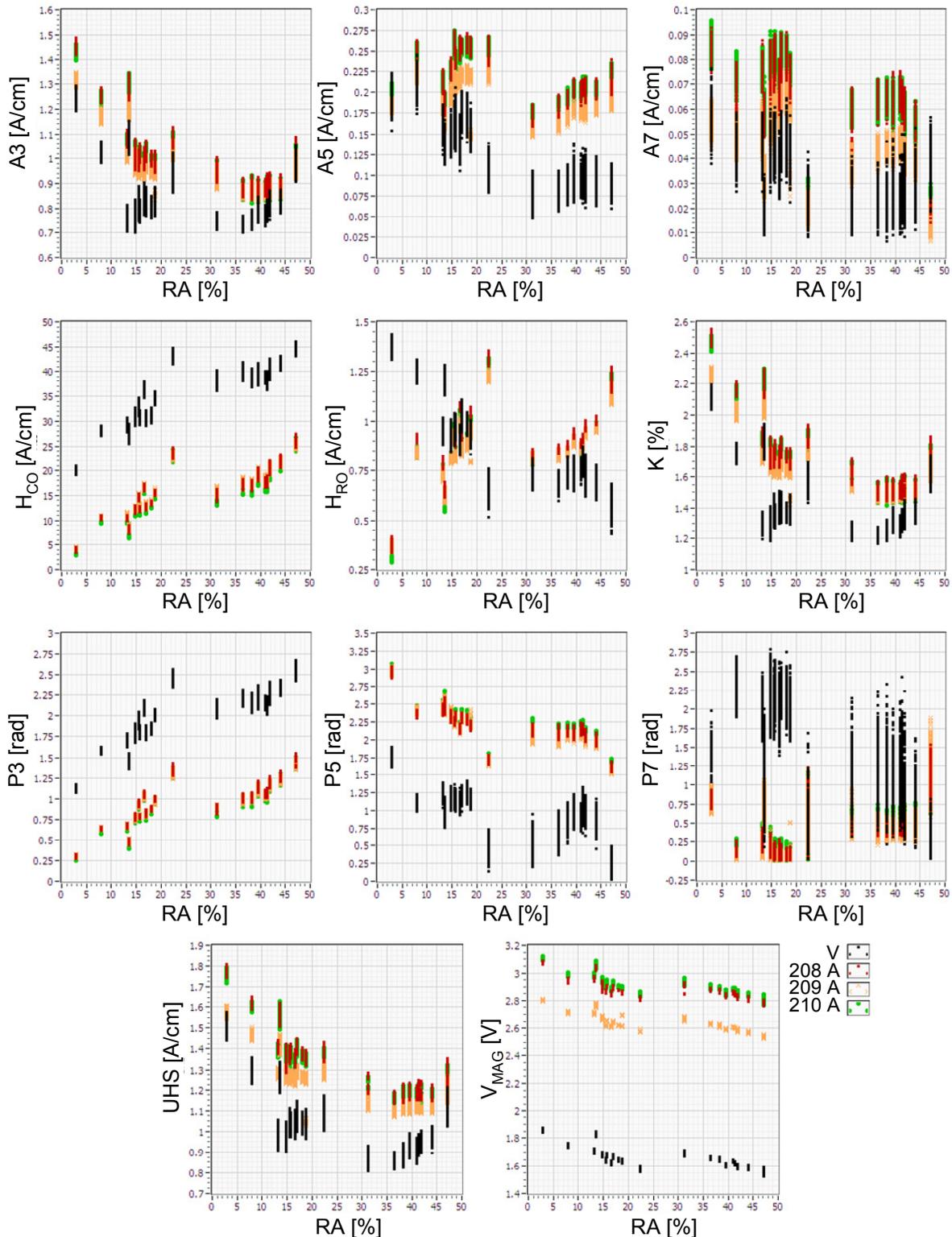


Abb. 38: Verhalten der 11 aus der Oberwellenanalyse des tangentialen Magnetfeldes abgeleiteten Prüfgrößen im betrachteten Zielgrößenbereich für vier 3MA-Standard-Sensoren an dem gleichen 3MA-Prüfgerät

Alle elf aus der Oberwellenanalyse abgeleiteten Prüfgrößen zeigen bedingt durch einen Sensoraustausch im Gegensatz zu den Größen der Barkhausen-Rausch-Analyse eine Beeinflussung des Verhaltens als Funktion der Zielgröße (siehe Abb. 38). Auch für die Oberwellenanalyse zeigen sich als Funktion der Zielgröße Offset-Verschiebungen (zum Beispiel P3,

P_5 , H_{CO} , V_{MAG}) mit zusätzlichen Phasen-Verschiebungen des Prüfgrößenverhaltens. Die Prüfgröße H_{RO} zeigt eine Spiegelung des Prüfgrößenverhaltens, was mit einer Phasenverschiebung von 180° zu vergleichen ist.

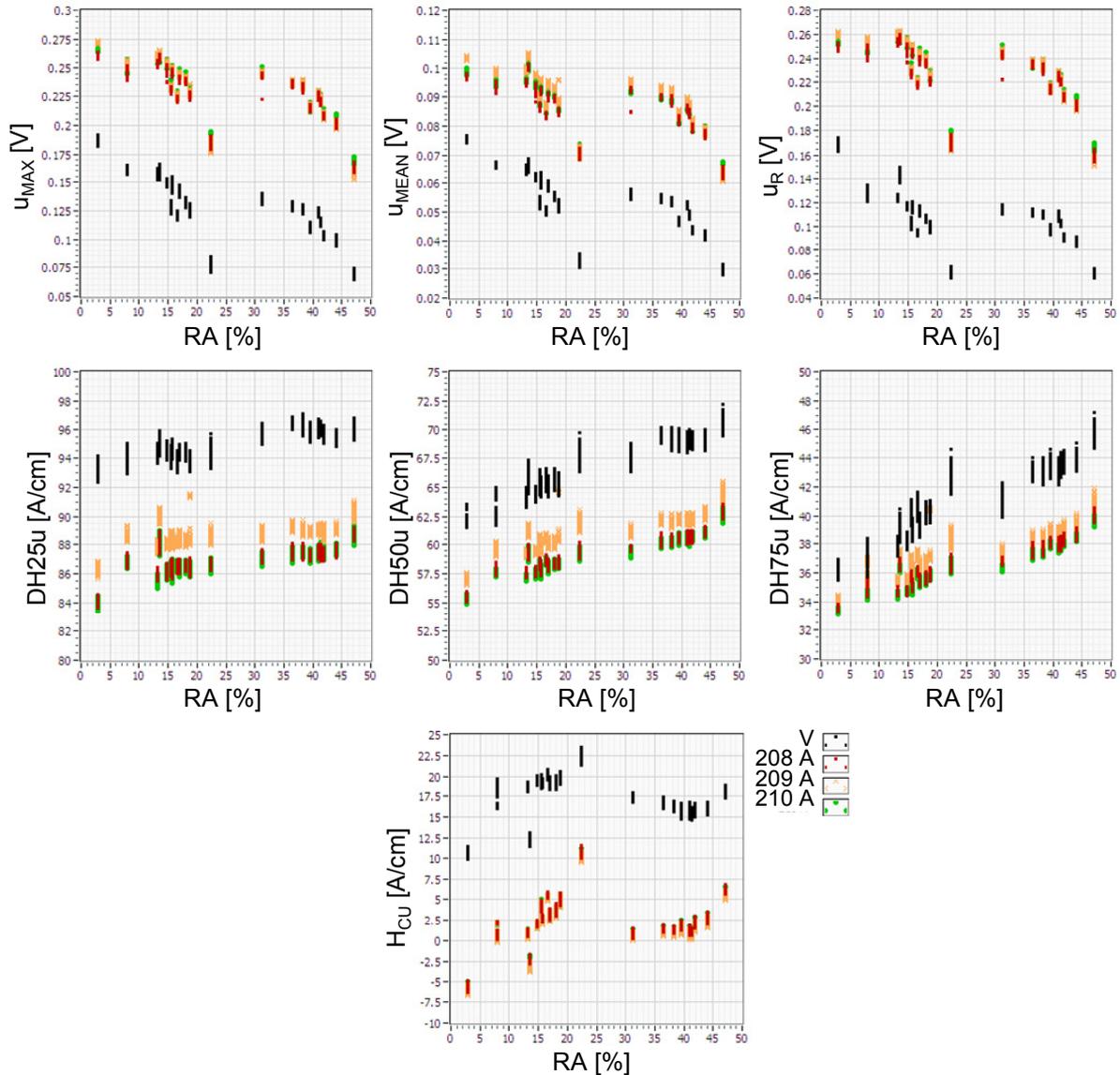


Abb. 39: Verhalten der 7 aus der Überlagerungspermeabilität abgeleiteten Prüfgrößen über den betrachteten Zielgrößenbereich für vier 3MA-Standard-Sensoren an dem gleichen 3MA-Prüfgerät

Das Verhalten der Überlagerungspermeabilitäts-Prüfgrößen zeigt bei Austausch des Sensors für alle 7 Größen ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Offset-Verhalten mit zusätzlichen Phasenverschiebungen.

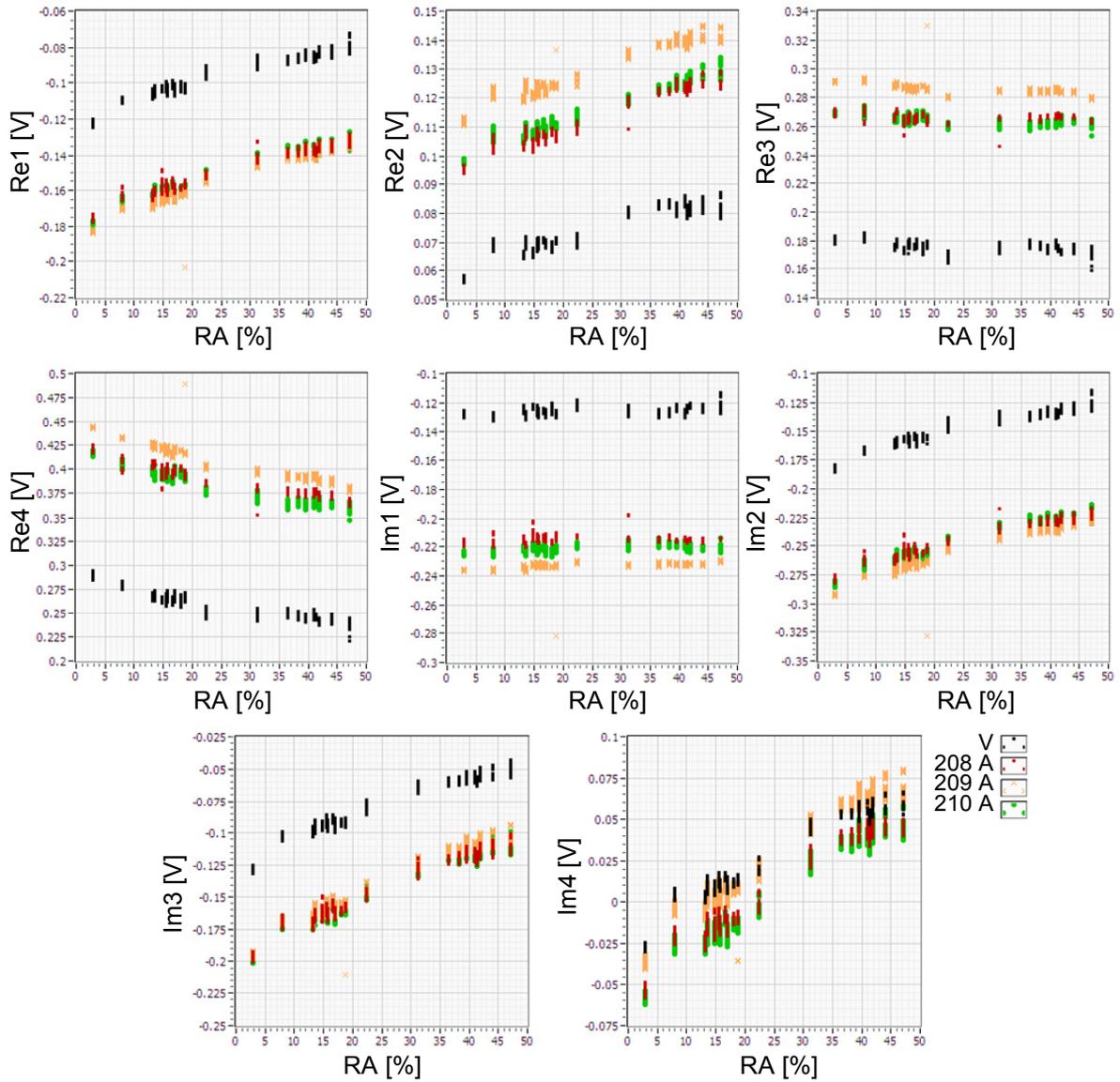


Abb. 40: Prüfgrößenverhalten der vier Realteile- und der vier Imaginärteile aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse über den betrachteten Zielgrößenbereich für vier 3MA-Standard-Sensoren an dem gleichen 3MA-Prüfgerät

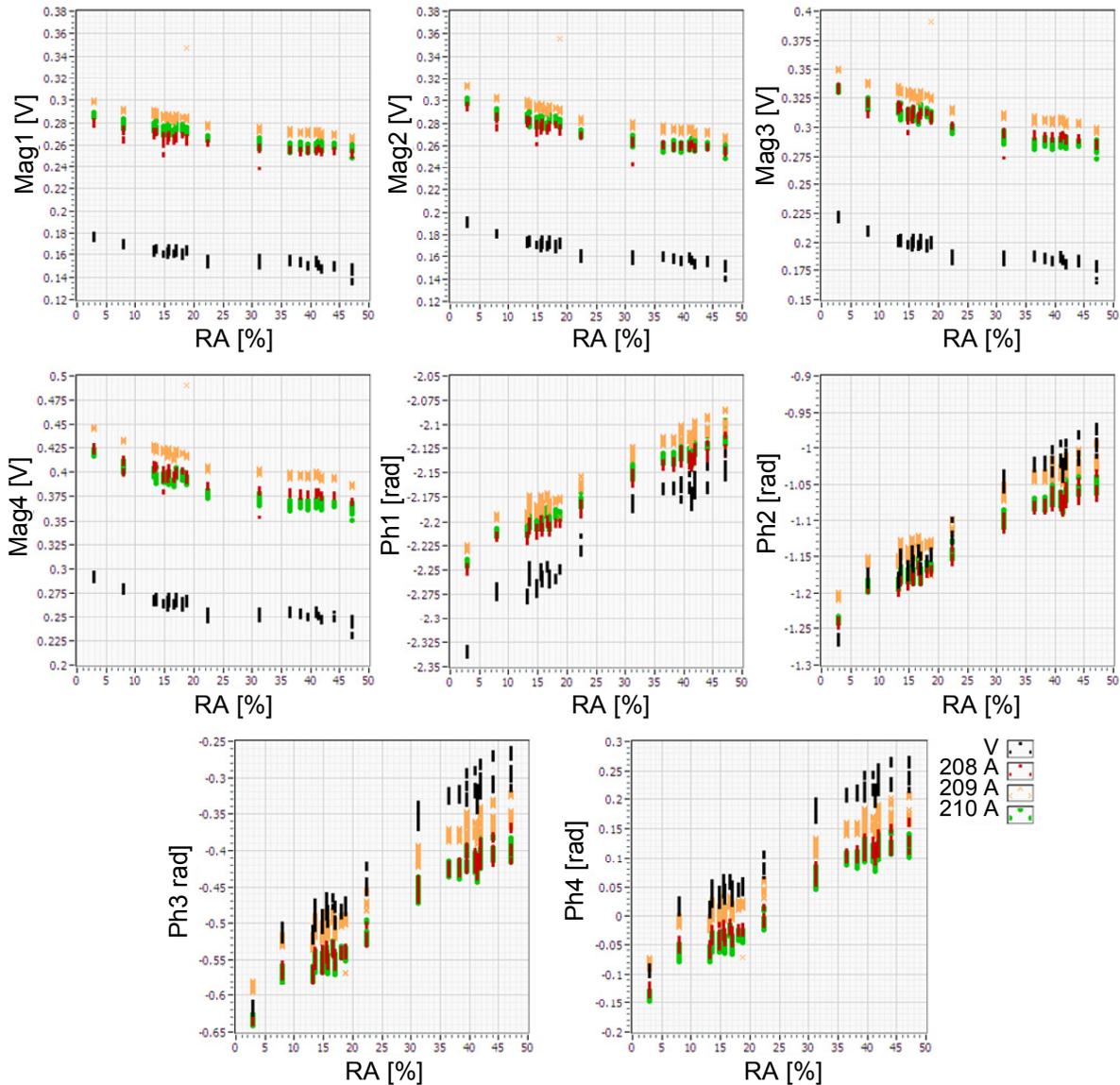


Abb. 41: Prüflingenverhalten der vier Beträge und der vier Phasen aus der Mehrfrequenz-wirbelstromimpedanzanalyse über den betrachteten Zielgrößenbereich für vier 3MA-Standard-Sensoren an dem gleichen 3MA-Prüfgerät

Das Verhalten aller 16 Wirbelstromimpedanz-Prüfgrößen zeigt bei Austausch des Sensors äquivalent zu den Prüfgrößen der Überlagerungspermeabilität ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Offset-Verhalten mit zusätzlichen ebenfalls unterschiedlich stark ausgeprägten Phasenverschiebungen (siehe zum Beispiel Ph1 und Ph2).

3.3.3.3.2 Einfluss eines Geräteaustausches auf die Prüfgrößen

Im Folgenden wird nun das Prüflingenverhalten zweier Prüfgeräte, die mit dem gleichen 3MA-Standard-Sensor (V) betrieben wurden, betrachtet. Die beiden Prüfgeräte sind mit den Ziffern 1 und 2 betitelt. Die Messdaten resultieren aus **Anwendung 2**.

In Abb. 42 bis Abb. 45 sind die aus dem unterschiedlichen Prüfverfahren abgeleitete Prüfgrößen als Funktion der Zielgröße Restaustenitgehalt (RA) für **Anwendung 2** (siehe Kapi-

tel 3.3.3.1) dargestellt. Zunächst lässt sich allgemein feststellen, dass sich der Einfluss eines Gerätetausches geringer als ein Sensortausch auf den Prüfgrößenraum auswirkt.

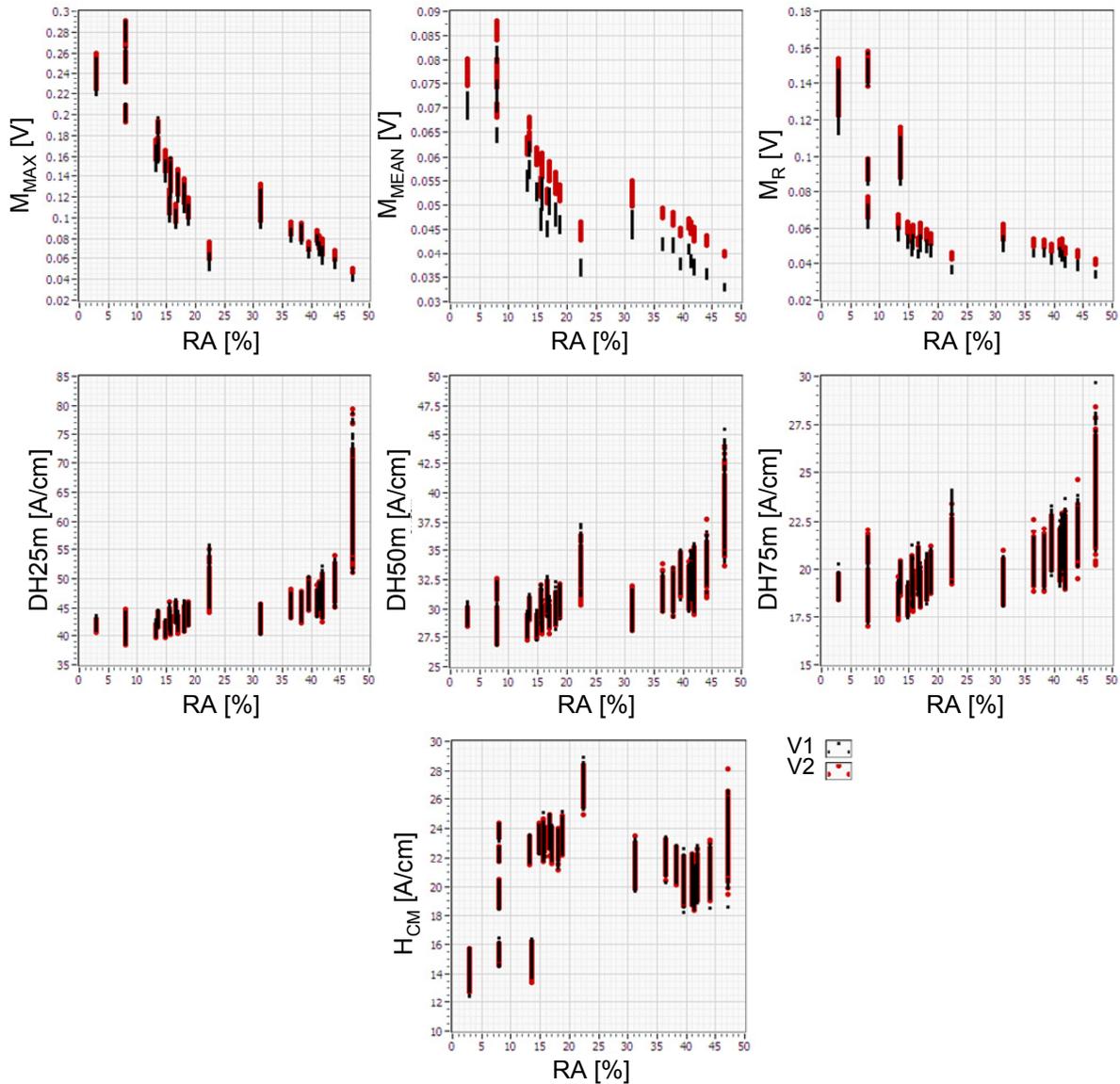


Abb. 42: Verhalten der 7 aus der Barkhausen-Rausch-Analyse abgeleiteten Prüfgrößen über den betrachteten Zielgrößenbereich für einen 3MA-Standard-Sensor an zwei baugleichen 3MA-Prüfgeräten

Die Prüfgrößen der Barkhausen-Rausch-Analyse zeigen lediglich in drei von sieben Prüfgrößen Einflüsse eines Gerätetausches. Die Aufweitungen der Barkhausen-Rausch-Profilkurve (DH_{25m} , DH_{50m} , DH_{75m}) und H_{CM} zeigen nahezu deckungsgleiches Verhalten. Die Prüfgrößen M_{MEAN} und M_R haben nur ein geringes und M_{MAX} ein sehr gering ausgeprägtes Offset- und Phasenverschiebungsverhalten.

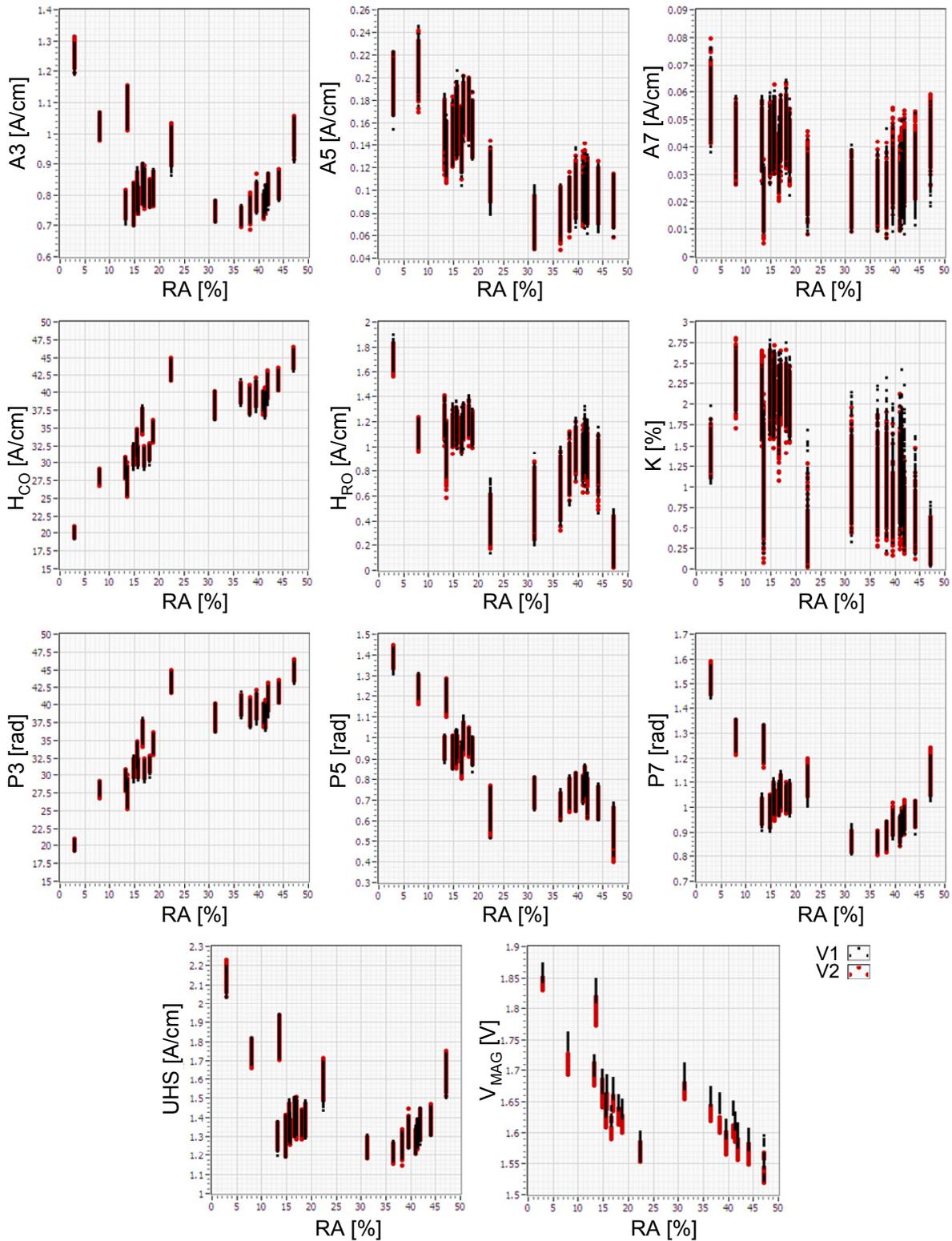


Abb. 43: Verhalten der 11 aus der Oberwellenanalyse des tangentialen Magnetfeldes abgeleiteten Prüfgrößen über den betrachteten Zielgrößenbereich für einen 3MA-Standard-Sensor an zwei baugleichen 3MA-Prüfgeräten

Alle Prüfgrößen der Oberwellenanalyse bis auf die Prüfgröße V_{MAG} werden durch einen Gerätetausch nicht beeinflusst. Sie zeigen deckungsgleiches Verhalten. V_{MAG} zeigt eine leichte Offset- und Phasenverschiebung.

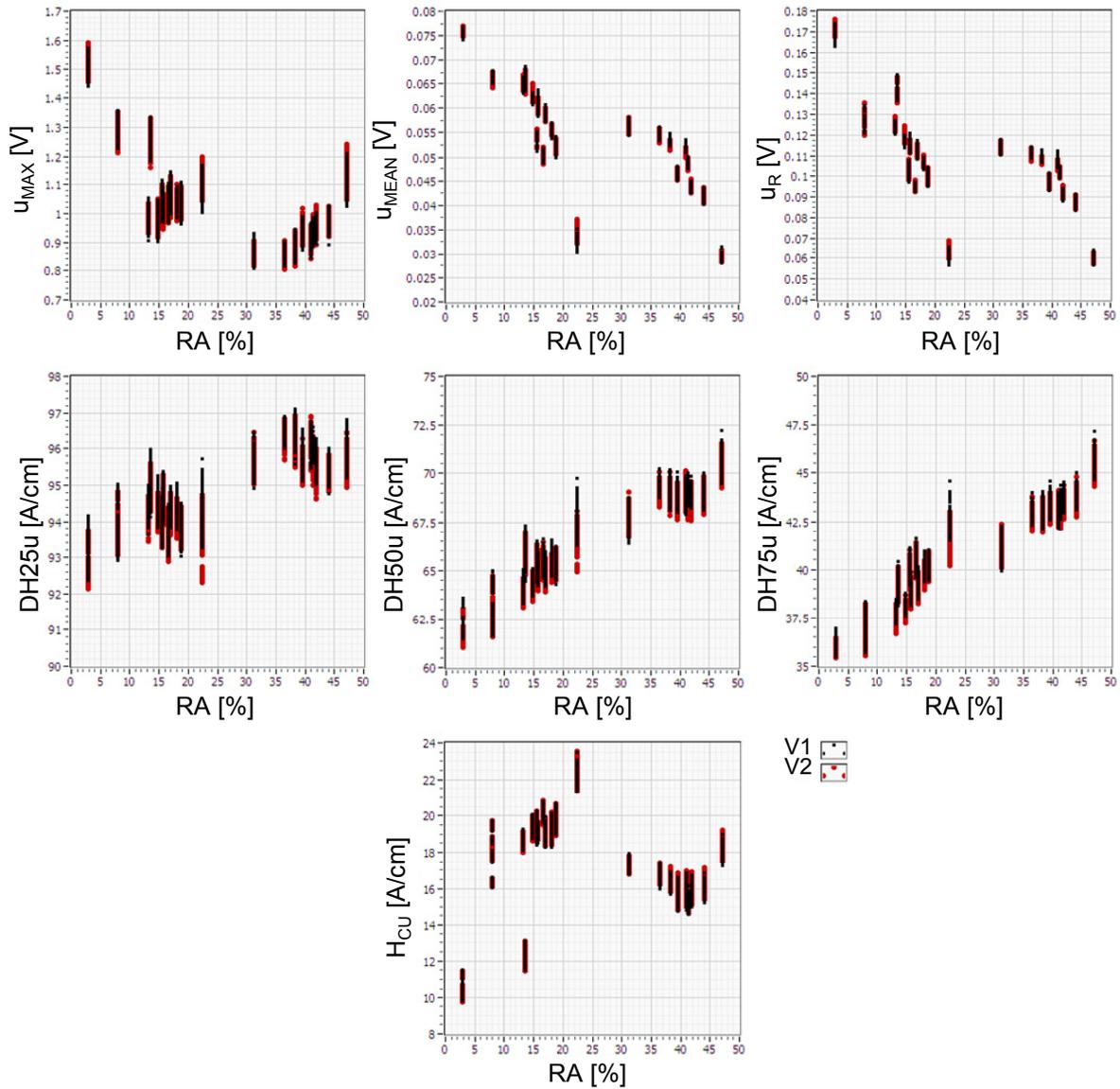


Abb. 44: Verhalten der 7 aus der Überlagerungspermeabilität abgeleiteten Prüfgrößen über den betrachteten Zielgrößenbereich für einen 3MA-Standard-Sensor an zwei baugleichen 3MA-Prüfgeräten

Auch die Prüfgrößen der Überlagerungspermeabilität zeigen sich von einem Gerätetausch unbeeindruckt und zeigen ein nahezu deckungsgleiches Prüfgrößenverhalten.

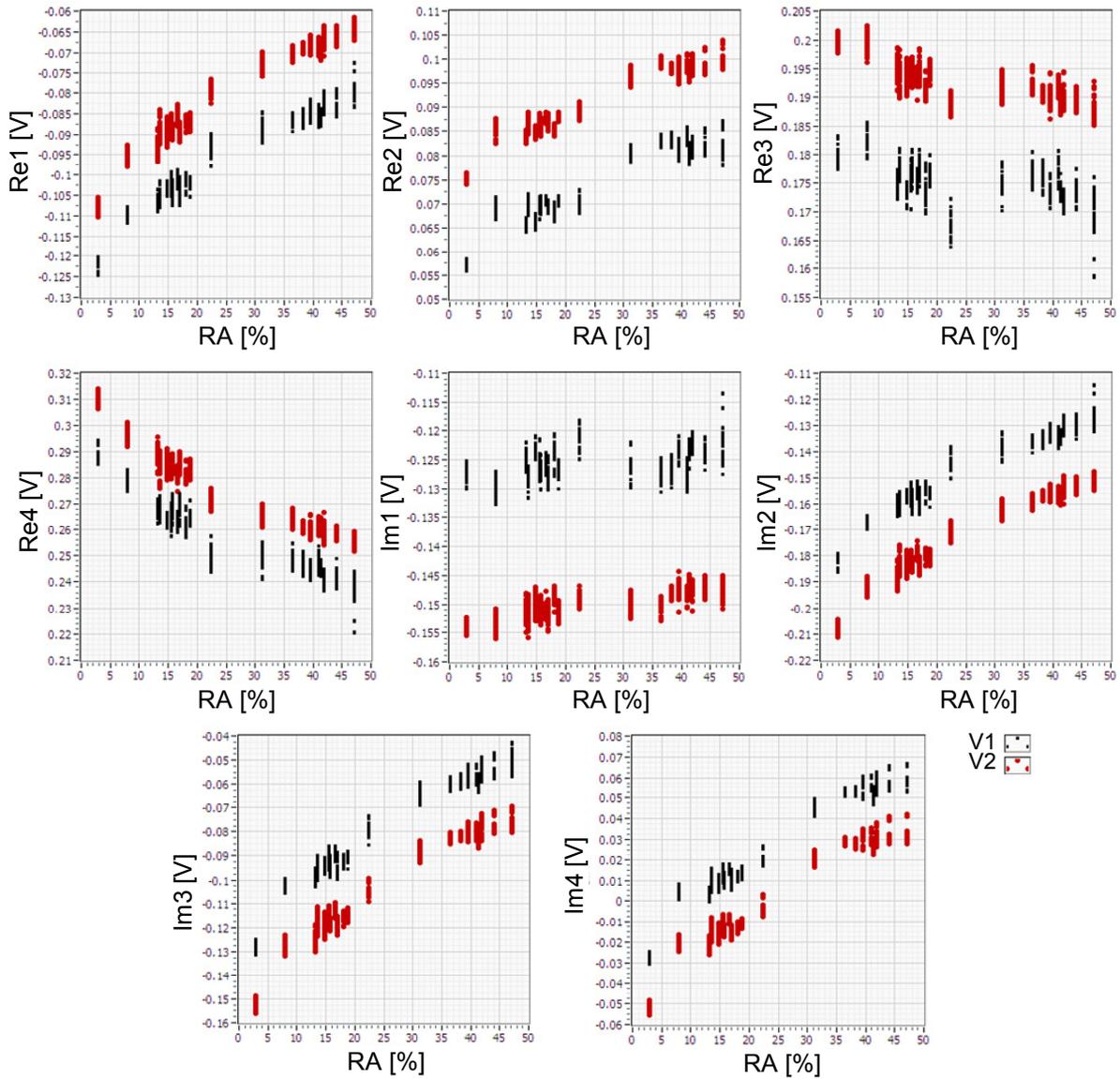


Abb. 45: Prüfgrößenverhalten der vier Realteile- und der vier Imaginärteile aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse für einen 3MA-Standard-Sensor an zwei baugleichen 3MA-Prüfgeräten

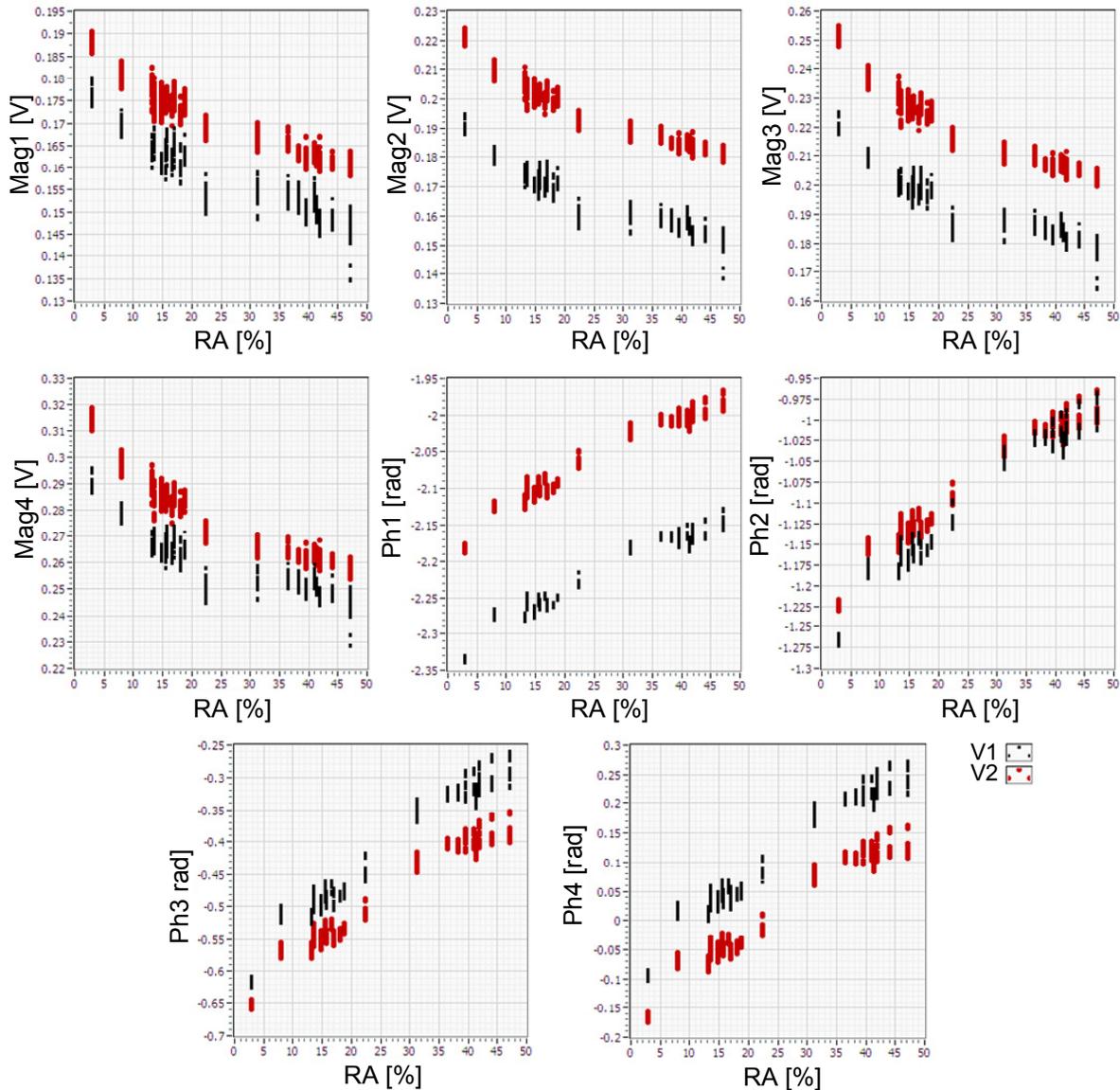


Abb. 46: Prüfgrößenverhalten der vier Beträge und Phasen aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse für einen 3MA-Standard-Sensor an zwei baugleichen 3MA-Prüfgeräten

Im Gegensatz zu den beiden vorher betrachteten Prüfverfahren zeigt die Wirbelstromimpedanzanalyse deutliche Geräteabhängigkeiten. Es wird in allen Prüfgrößen ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Offset- und Phasenverschiebungsverhalten deutlich.

3.3.3.4 Schlussfolgerungen aus den Einflussuntersuchungen

Es sind folgende Schlussfolgerungen aus den Einflussuntersuchungen zu ziehen:

- ➔ Das 3MA-Prüfsystem reagiert durch Prüfgrößenwertänderungen auf unterschiedliche Gefügeeigenschaften wie Oberflächenhärte, Härtetiefe, Restaustenit usw. sowie auf Eigenspannungen (siehe Kapitel 3.3.3.1). Dadurch lassen sich mit dem 3MA-Prüfsystem zerstörungsfreie Prüfaufgaben mit einer hohen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit lösen (siehe Kapitel 3.3.3.2). Bevor das 3MA-Prüfsystem zur zerstö-

rungsfreien Prüfung verwendet werden kann muss zwingend eine Kalibrierung angefertigt werden, die das inverse, mehrparametrische (Zielgrößenbestimmungs-) Problem löst. Ein Austausch einer Prüfsystemkomponente kann zu Abweichungen in den Kalibrierergebnissen führen (siehe Kapitel 3.3.3.2).

- Der Austausch eines Sensors hat im Gegensatz zu einem Prüfgeräteaustausch (siehe Kapitel 3.3.3.2) einen größeren Effekt sowohl auf die Kalibrierung (siehe Kapitel 3.3.3.2) als auch auf den Prüfgrößenraum (siehe Kapitel 3.3.3.3 und vergleiche Kapitel 3.3.3.3.1 und 3.3.3.3.2). Der größere Effekt bei einem Sensoraustausch, lässt sich durch die kaum vermeidbaren Toleranzen bei der Sensorfertigung erklären. Diese könne zum Beispiel dazu führen, dass durch Dickenschwankungen von Keramikschutzschichten oder ähnliches die Hallsonde nicht für alle Sensoren den gleichen Abstand zur Probenoberfläche hat. Wie in [Sziel2009] mit Hilfe einer Finiten-Element-Simulation gezeigt werden könnte, würde dies zu einer Änderung des durch die Hallsonde detektierten, tangentialen Magnetfeldes führen (siehe Abb. 47) und somit das Prüfgrößenverhalten beeinflussen.

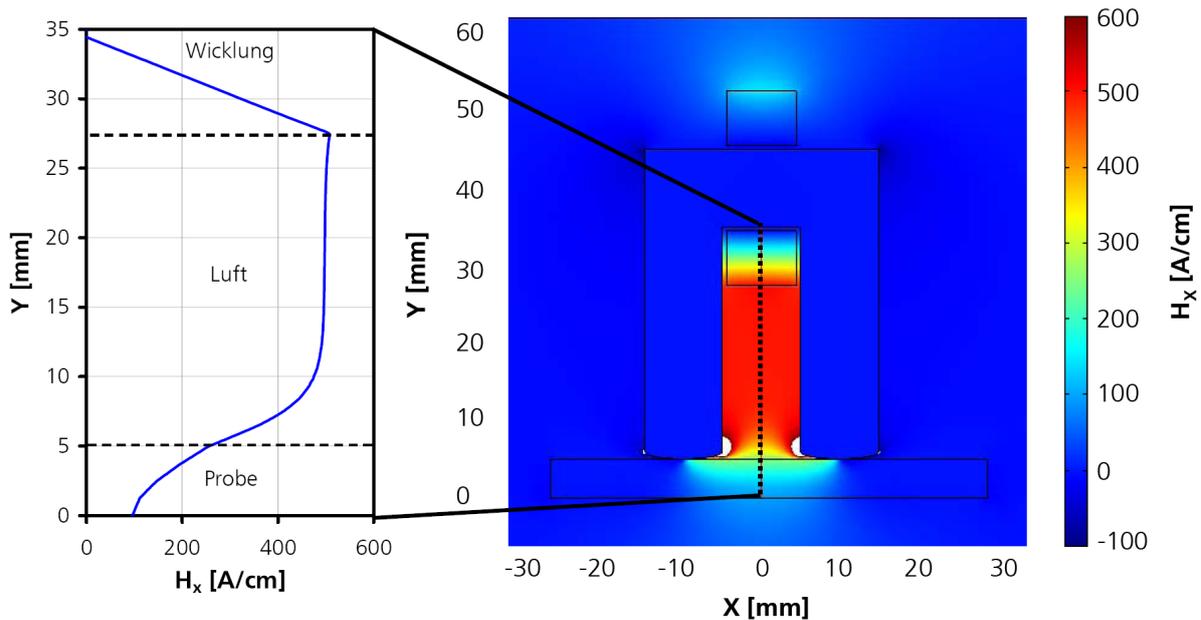


Abb. 47: *Finiten-Element-Simulation der Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke für einen 3MA-Standard-Sensor. Das linke Diagramm zeigt den Verlauf der X-Komponente der Feldstärke entlang der gestrichelten Linie im rechten Bild [Sziel2009]*

- Bei den 3MA-Standardsensoren existieren stärkere Unterschiede im Prüfgrößenraum zwischen den neueren und den älteren Fertigungsdatums als zwischen den neueren Datums untereinander (siehe Abb. 37 bis Abb. 41). Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Hall-Sonden in den Sensoren zurückführen.

- ➔ Bei einem Sensor- oder Prüfgeräteaustausch ist der Effekt auf die Prüfgrößen der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse am stärksten ausgeprägt (siehe Abb. 40 und Abb. 41 sowie Abb. 45 und Abb. 46). Die anderen drei Prüfverfahren haben bei einem Prüfgeräteaustausch deutlich geringere Veränderungen im Prüfgrößenverhalten (siehe Abb. 42, Abb. 43 und Abb. 44).
- ➔ Die Mustererkennung als Kalibriermethode ist deutlich stärker als ein Regressionspolynom von einem Sensor- beziehungsweise Prüfgeräteaustausch betroffen. In vielen Fällen liefert die Mustererkennung nach einem Austausch keine Ergebnisse mehr und kann somit keine Messung mit der ausgetauschten Komponente bezüglich der Zielgröße charakterisieren (siehe Abb. 23, Abb. 24, Abb. 27, Abb. 29, Abb. 31, Abb. 32 und Abb. 36 jeweils links). Dies tritt zum einen auf, weil die Mustererkennung wegen ihrer deutlich schärferen Charakterisierung auf Veränderungen im Prüfgrößenraum stärker reagiert, und zum anderen wegen des mit 16 von 41 Prüfgrößen starken Anteils der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse an dem Prüfgrößenraum. Dieser starke Anteil ist bei der Mustererkennung kritischer (siehe Abb. 36) als bei der Regressionsanalyse (siehe Abb. 35), da die Mustererkennung jede Prüfgröße zur Ähnlichkeitsbetrachtung verwendet und das Regressionspolynom nicht grundsätzlich alle Prüfgrößen aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse im Polynom verarbeitet. Wird die Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse bei der Kalibrierung nicht verwendet, stellen sich für beide Kalibriermethoden nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch geringere Fehlerwerte ein, beziehungsweise werden von einer Mustererkennung mehr Messungen erkannt und charakterisiert (siehe Abb. 35 und Abb. 36).

4 Lösungswege zur Einflussminimierung bei Prüfsystemkomponentenaustausch

Für alle im Folgenden betrachteten Lösungswege wird von gleichen Voraussetzungen ausgegangen. Es wird angenommen, dass eine vollständige Kalibrierung vorliegt. Diese Kalibrierung wurde mit einem speziellen Prüfsystem und einem speziellen Sensor angefertigt. Die dafür notwendigen Kalibrierproben sind vollständig zugänglich. Dadurch ist gewährleistet, dass beim Austausch einer Komponente (Sensor, Prüfgerät) mit der ausgetauschten Komponente an den identischen Messstellen wie zuvor Daten aufgenommen werden können. Die unterschiedlichen Eigenschaften des Werkstoffzustandes der Kalibrierproben müssen sich in den zerstörungsfreien Prüfgrößen abbilden.

Wie bereits in Kapitel 1 *Einleitung* erläutert, ist zur Erfassung der Sensor- beziehungsweise Gerätecharakteristik eine vergleichende Messdatenaufnahme notwendig.

Unter vergleichender Messdatenaufnahme ist hier zu verstehen, dass mit beiden Sensoren beziehungsweise Prüfgeräten unter identischen Messbedingungen Daten an identischen Proben aufgenommen werden müssen. Da aus Anwendersicht, wie zuvor erwähnt, keine vollständige Neukalibrierung mit dem kompletten Kalibrierprobensatz durchgeführt werden soll, wird deutlich, dass nur eine Teilmenge der Proben aus dem Kalibrierprobensatz zur Anpassung verwendet werden darf.

Dabei ist zu beachten, dass frühzeitig die Notwendigkeit einer Anpassung einkalkuliert werden muss. Denn für den Fall, dass an den Messstellen der zur Kalibrierung oder Anpassung verwendeten Proben nach der Datenaufnahme zum Beispiel zwecks Referenzwertbildungen Veränderungen wie Schliffe, Schnitte oder Polierungen vorgenommen werden, besteht keine Möglichkeit mehr, im Nachhinein an identischen Messstellen mit dem anzupassenden Prüfsystem Daten aufzunehmen. Ohne Daten von beiden Sensoren, Geräten oder Prüfsystemen an identischen Proben und Messstellen, ist die Erfassung der Sensor-, Geräte-, oder Prüfsystemunterschiede und damit die Anpassung der jeweiligen Kalibrierung nicht gesichert möglich. In solchen Fällen muss frühzeitig an eine eventuelle Sensor-, Geräte-, oder Prüfsystemanpassung gedacht werden. Es müssen also von vornherein Proben mit Messstellen erhalten bleiben, die sowohl von dem ursprünglich zur Kalibrierung verwendeten Sensor, Gerät oder Prüfsystem, als auch von allen zukünftig darauf angepassten Sensoren, Geräten oder Prüfsystemen verwendet werden können. Dies lässt sich zum Beispiel durch Kalibrierprobenzwillinge gewährleisten.

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Lösungswege, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, verfolgt und verglichen wurden, erläutert. Die Lösungswege lassen sich

grob in zwei Kategorien gliedern und unterscheiden sich durch die Anzahl der zur Anwendung benötigten Proben. Die erste Kategorie benötigt lediglich eine Probe, wohingegen die zweite Kategorie mehrere Proben benötigt. Zur ersten Kategorie zählt der Lösungsansatz, der in Kapitel 4.2 *Anpassung durch Verwendung von Differenz-Prüfgrößen* erläutert wird. Die restlichen Lösungsansätze benötigen mehr als eine Probe. Bevor diese zur Anwendung kommen können, müssen die notwendigen Proben ausgewählt werden. Die Auswahlmöglichkeiten sind in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 beschrieben.

Einleitend werden in Kapitel 4.1 Voruntersuchungen zur Sensitivität der an der Kalibrierung beteiligten Prüfgrößen vorgestellt. Die Sensitivität dieser Prüfgrößen wurde durch eine schrittweise Variation der Prüfgrößenwerte und anschließender Analyse der dadurch veränderten Zielgrößenbestimmung beurteilt. Damit eine Relation zwischen der Sensitivität der Prüfgrößen und den Prüfgrößenwertunterschieden, die sich bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch einstellen, hergestellt werden kann, werden auch diese Unterschiede exemplarisch erfasst.

4.1 Voruntersuchungen zum Einfluss der Prüfgrößenwerte auf die Zielgrößenbestimmung

Um den Einfluss einer Prüfgrößenwertveränderung auf das Kalibrierergebnis festzustellen, wurde am Beispiel von **Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten** eine künstliche Variation der an zwei Kalibrierpolynomen beteiligten Prüfgrößenwerte vorgenommen. Die prozentualen Veränderungen des Kalibrierergebnisses, die sich durch Variation eines Prüfgrößenwertes ergeben, sind in Abb. 48 und Abb. 49 über die prozentuale Variation des Prüfgrößenwertes aufgetragen. In Abb. 48 wurden jeweils der Wert einer Prüfgröße eines Kalibrierpolynoms mit maximal linearen Termen und Abb. 49 mit maximal quadratischen Termen variiert. In beiden Abbildungen wurde exemplarisch eine Messung an einer Probe aus der Kalibrierprobengruppe 1 (Restaustenitgehalt: 47,1 %; siehe Tabelle 6) variiert, die mit dem 3MA-Standard-Sensor V aufgenommen wurde. Die beiden verwendeten Polynome sind in Tabelle 10 aufgeführt.

| Polynom mit maximal linearen Termen | Polynom mit maximal quadratischen Termen |
|---|---|
| 94,37691502046201 | -1005,573164068984 |
| -63,16132737113004*(V _{MAG}) | -389,7581546908930*(u _R) |
| +68,20251108797456*(Ph3) | -143,8829615835244*(V _{MAG} ²) |
| -3,630270493358972*(P5) | +1182,233492398723* V _{MAG} ⁻² |
| -103,5108183006858*(M _R) | -1,222531732531785*(P5 ²) |
| +0,2191142180669799*(DH25m) | -168,7297800557470* M _{MEAN} ⁻² |
| +810,5778403585238*(u _{MAX}) | +1502,837392573942*(u _{MAX} ²) |
| -1584,623222809280*(u _{MEAN}) | -0,06515555365692854*(H _{CU} ²) |
| -1,474348804892878*(H _{CU}) | +0,01719231446832190*(DH75u ²) |
| +1,722446470086580*(DH75u) | -77,13016511979883* Ph3 ⁻² |

Tabelle 10: Kalibrierpolynome

Die Kalibrierergebnisse, die sich für alle Ankerplatten bei Verwendung eines Polynoms mit maximal linearen bzw. maximal quadratischen Termen ohne künstliche Variation einstellen, sind in Abb. 26 dargestellt.

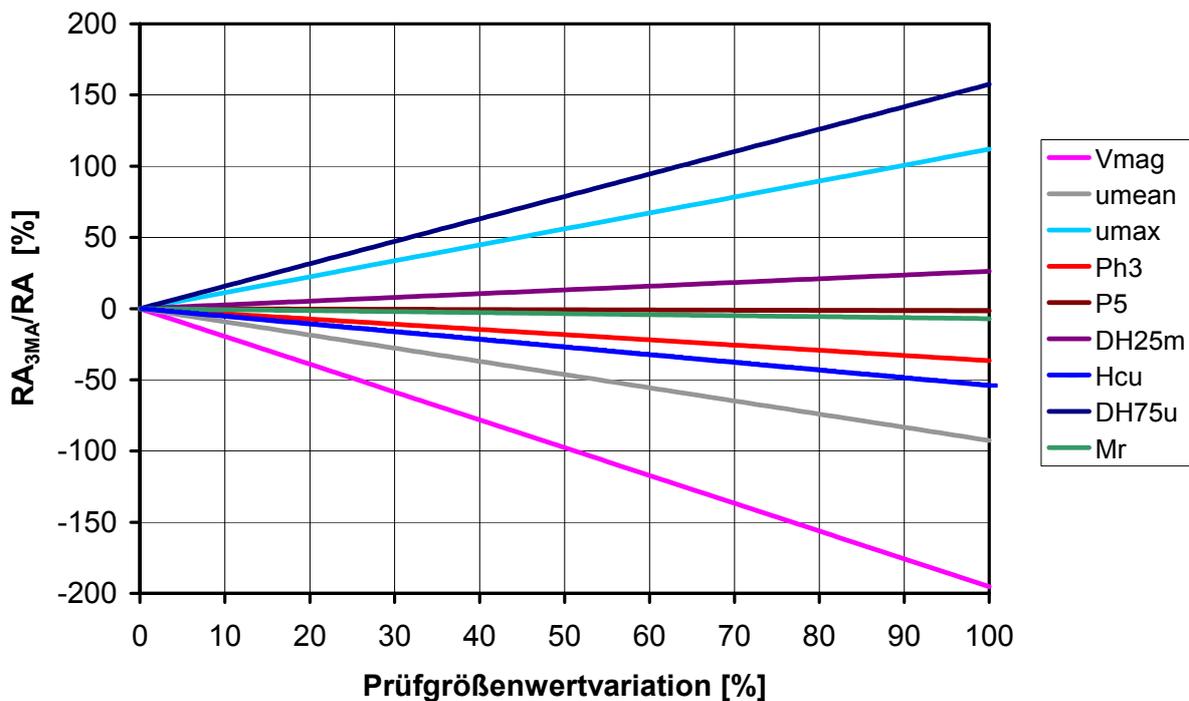


Abb. 48: Ergebnisschwankung bei Prüfgrößenwertvariation eines Kalibrierpolynoms mit maximal linearen Termen

Aus Abb. 48 wird deutlich, dass in diesem Beispiel bereits Prüfgrößenwertvariationen von 10 % zu Ergebnisabweichungen von bis zu ca. 20 % führen können. Eine hundertprozentige Ergebnisschwankung kann sich hier ab 50 % Variation einstellen.

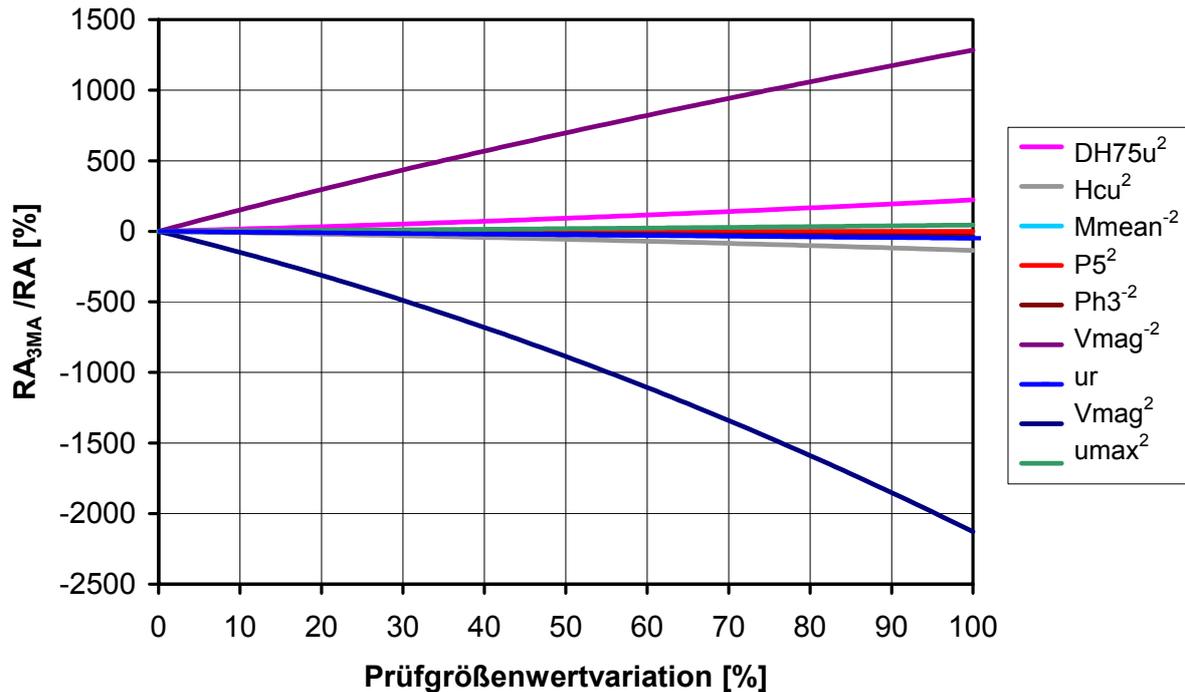


Abb. 49: Ergebnisschwankung bei Prüfgrößenwertvariation eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen

In Abb. 49 sind die Einflüsse einzelner Prüfgrößenwerte wegen des dort verwendeten höheren Polynomgrades stärker ausgeprägt als in Abb. 48. Für dieses Kalibrierpolynom mit maximal quadratischen Termen kann sich bei 10 % Prüfgrößenwertvariation eine Abweichung von bis zu ca. 150 % einstellen. Die hundertprozentige Ergebnisabweichung kann hier bereits ab ca. 6,5 % Variation auftreten.

Der Einfluss der an der Kalibrierung beteiligten Prüfgrößen an der Ergebnisschwankung ist abhängig von dem Koeffizienten und der Potenz innerhalb des Kalibrierpolynoms sowie von dem Wertebereich der Prüfgröße. Es besteht die Möglichkeit, dass sich bei einer Veränderung mehrerer Prüfgrößenwerte die Variationen im günstigsten Fall gegenseitig wegen ihrer unterschiedlichen Trends kompensieren. Im Umkehrschluss kann aber auch eine ungünstige Überlagerung mehrerer Trends zu einer stärkeren Ergebnisverfälschung führen.

In [Sziel2009] konnte eine Methode entwickelt werden, mit der der Einfluss von Prüfgrößen drifts auf das Kalibrierergebnis minimiert werden kann. Durch diese Methode können die in Abb. 48 und Abb. 49 gezeigten Ergebnisschwankungen ohne Austausch einer Prüfsystemkomponente verringert werden. Diese Methode muss jedoch bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch nicht zwingend den gleichen Effekt auf die Kalibrierergebnisse haben. Denn durch einen Prüfsystemkomponentenaustausch können, wie in Kapitel 3.3.3.3 gezeigt, sprunghafte Änderungen und Verschiebungen innerhalb des Prüfgrößenraumes auftreten. Zur Verdeutlichung sind in Abb. 50 die prozentualen Prüfgrößenwertunterschiede von drei Sensoren (208 A, 209 A, 210 A) zu dem zur Kalibrierung verwendeten Sensor (V) über die

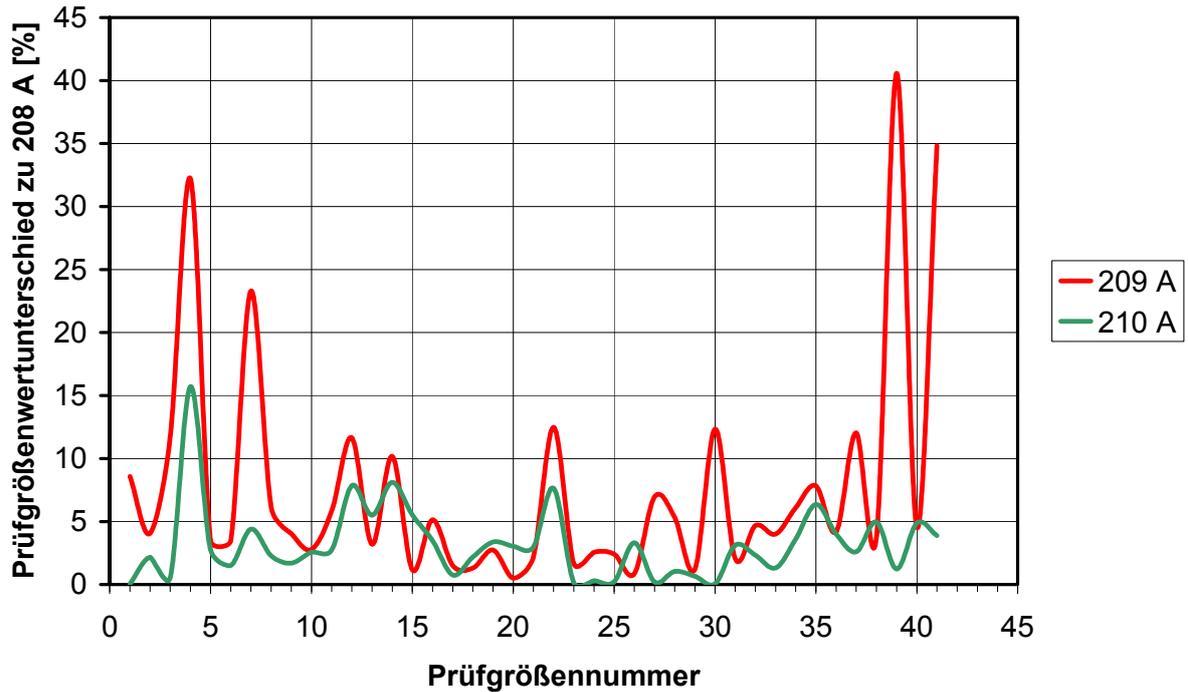


Abb. 51: Prozentuale Prüfgrößenwertunterschiede zum Sensor 208 A für zwei Sensoren und alle 41 Prüfgrößen

Aber auch diese im Vergleich zu Abb. 50 geringeren Unterschiede können, wie in Abb. 48, Abb. 49 und Abb. 77 gezeigt, zu einer Verschlechterung des Kalibrierergebnisses führen.

Diese Voruntersuchungen verdeutlichen die starke Sensitivität einzelner Prüfgrößenwerte des 3MA-Prüfsystems auf die Zielgrößenbestimmung. Es wird deutlich, dass durch diese Sensitivität die Lösung des Mehrparameterproblems zur Zielgrößenbestimmung erschwert wird. Zusätzlich zeigt sich, dass durch einen Prüfsystemkomponentenaustausch die Prüfgrößenwertunterschiede so stark sein können, dass es zu mehr als hundertprozentigen Ergebnisschwankungen führen kann. Durch derartige Vergleiche des Prüfgrößenverhaltens bei Prüfsystemkomponentenaustausch kann festgestellt werden, ob eine Anpassung der Kalibrierung vorgenommen werden sollte. Zeigen sich Abweichungen, die durch die Prüfgrößenwertvariation zu nicht tolerierbaren Abweichungen in der Ergebnisbildung führen können, sollte eine Anpassung der Kalibrierung vorgenommen werden. Der Vergleich kann, wie in den vorherigen Abbildungen, mit Hilfe von Messungen an Kalibrierproben vorgenommen werden.

4.2 Anpassung durch Verwendung von Differenz-Prüfgrößen

Bei elektromagnetischen Messungen haben, wie in den Kapiteln 3.3.3.2, 3.3.3.3 und 3.3.3.4 erläutert, der verwendete Sensor und die verwendete Prüfelektronik einen Einfluss auf die Messergebnisse. Die Charakteristik des kompletten Prüfsystems geht also in die Messungen ein. Um Kalibrierungen auf andere Sensoren, Geräte oder Prüfsysteme übertragen zu können, muss man von dieser Charakteristik unabhängig werden oder die Kalibrierung an die jeweilige Charakteristik anpassen.

Eine Möglichkeit, Kalibrierungen auf Sensoren, Geräte und Prüfsysteme übertragen zu können liegt, in der Verwendung von sogenannten Differenz-Prüfgrößen. Darunter sind Prüfgrößen (p) zu verstehen, die sich aus den Prüfgrößendifferenzen (Δp) zweier Messungen (1,2) ergeben (siehe Gl. 4-1).

$$\Delta p_{j,1} = p_{j,1} - p_{j,2} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Diese Möglichkeit der Anpassung liegt nahe, wenn man sich das Verhalten der Prüfgrößen beim Austausch eines Sensors oder Gerätes genauer betrachtet. So wird in Abb. 52 exemplarisch anhand eines Sensor austausches (**Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten**) verdeutlicht, dass sich dieser in allen Verfahren unter anderem durch Offset-Effekte bemerkbar macht (siehe auch Abb. 37 bis Abb. 41 und Abb. 42 bis Abb. 46).

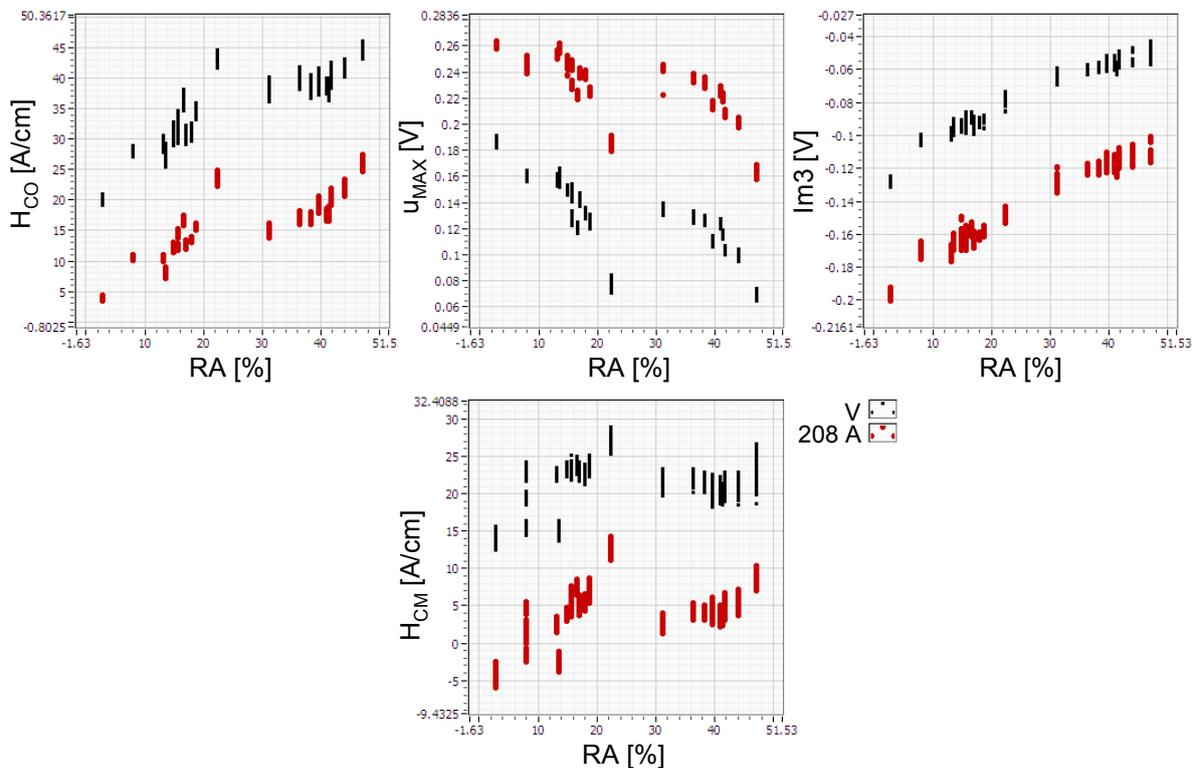


Abb. 52: Einfluss eines Sensor austausches am Beispiel von vier Prüfgrößen

Derartige Offsetverschiebungen können durch eine Offsetkompensation behoben werden. Eine solche Kompensation lässt sich durch die Verwendung der bereits erwähnten Differenz-Prüfgrößen umsetzen. Dazu werden alle verwendeten Prüfgrößen in Differenz-Prüfgrößen überführt, indem für alle Messungen die Prüfgrößen durch Differenzbildung zu einer Referenzmessung umgewandelt werden.

Dieses Vorgehen ist äquivalent zu sogenannten Differenz-Anordnungen von Sensoren zum Beispiel bei der Wirbelstrom- und Barkhausen-Rausch-Mikroskopie [Sziel2004, Altp1998, Altp2000] oder bei Brückenschaltungen in der Messtechnik (zum Beispiel Dehnungsmessung mit einer Voll-, Halb- oder Viertelbrücke). Bei dieser mikroskopischen Anwendung der elektromagnetischen Prüfmethode Wirbelstromimpedanz- und Barkhausen-Rausch-Analyse wird das Signal des mit der Probe in Wechselwirkung gebrachten Sensors von einem zweiten Signal eines in Luft hängenden Referenzsensors subtrahiert. So wird in diesem mikroskopischen Anwendungsfall dafür gesorgt, dass die internen elektronischen Schaltungen die Messsignale mit einer ausreichenden Dynamik verstärken und verarbeiten können.

Wenn die zur Bildung der Differenz-Prüfgrößen verwendete Referenzmessung für jeden verwendeten Sensor beziehungsweise für jedes verwendete Gerät oder Prüfsystem an einer identischen Probe unter den gleichen Messbedingungen durchgeführt wird, kann so der Einfluss eines Sensor-, Geräte- beziehungsweise Prüfsystemtausches minimiert werden. Denn durch die Referenzmessung wird der sensor-, geräte- beziehungsweise prüfsystemabhängige Offset für alle an der Messung beteiligten Prüfgrößen erfasst und somit die Sensorbeziehungsweise Geräte-Charakteristik für das Offsetverhalten ermittelt.

$$P_{DIF,j,l} = P_{j,l} - P_{j,Referenz} \quad \text{Gl. 4-2}$$

In obiger Gleichung ist die Bildung der Differenz-Prüfgrößen unter Verwendung einer Referenzmessung verdeutlicht. Zu der Referenzmessung sei noch erwähnt, dass die verwendeten Prüfverfahren, die verwendete Messposition an der stets identischen Probe und die Einstellungen des Prüfsystems bei der Datenaufnahme für den Einsatz als Referenzmessung immer gleich sein müssen. Zusammenfassend ausgedrückt muss jede Referenzmessung unter den gleichen Rand- und Messbedingungen aufgenommen werden. Nur so kann gewährleistet werden, dass durch die Referenzmessung die Geräte- beziehungsweise Sensorcharakteristik möglichst ohne Störeinflüsse erfasst werden kann. Als Probe für diese Referenzmessung sind verschiedene Optionen denkbar. Es könnte entweder eine Standardprobe zur Referenzdatenaufnahme verwendet werden, die dann für alle Kalibrierungen verwendet würde. Oder es könnte für jede Kalibrierung jeweils eine Probe aus dem zugehörigen Kalibrierprobensatz verwendet werden. Die Verwendung einer Standardprobe hätte den Vorteil, dass eventuell auch schon vor Auslieferung des Sensors eine Aufnahme dieser Referenzmessung unter gesicherten Bedingungen direkt nach der Fertigstellung des Prüfsystems

oder eines Teil des Prüfsystems (Sensor oder Prüfgerät) stattfinden könnte. Allerdings birgt dies auch die Problematik, dass zu diesem Zeitpunkt keine Informationen über die Kalibrierungsaufgabe (Zielgröße, Einstellungen des Prüfsystems, Sweep-Messungen ja/nein, usw.) vorliegen. Es liegen somit auch keine Informationen über das Prüfgrößenverhalten bedingt durch die Datenaufnahme an den Kalibrierproben vor, was es erschwert, die Referenzdatenaufnahme an der Standardprobe repräsentativ für jede Art der Kalibrieranwendung zu gestalten. Wenn die Standardprobe kein äquivalentes Prüfgrößenverhalten bei einem Sensor-, Geräte- oder Prüfsystemtausch zeigen würde, könnten dadurch Störeinflüsse mit in die Anpassung eingebracht werden. Zusätzlich müsste die Referenzmessung für alle möglichen Einstelloptionen des 3MA-Prüfsystems aufgenommen werden. Dies führt unter dem Gesichtspunkt der verwendbaren Sweep-Messungen zu einer erheblichen Menge an Möglichkeiten. Um dies zu umgehen wäre es denkbar, stets die gleiche Einstellung des 3MA-Prüfsystems zur Datenaufnahme an der Standardprobe zu verwenden. Dies erhöht aber wiederum das Risiko der unzureichenden Erfassung der Sensor-, Geräte- oder Prüfsystemunterschiede. Von dieser Problematik kann man sich lösen, indem man unter den gleichen Rand- und Messbedingungen wie bei der Kalibrierdatenaufnahme auch die Referenzmessung an einer der verwendeten Kalibrierproben aufnimmt. So kann gewährleistet werden, dass durch die Referenzmessung die Geräte- beziehungsweise Sensorcharakteristik möglichst ohne Störeinflüsse für die jeweilige Kalibrierung erfasst werden kann. Zusätzlich kann der Aufwand für die Datenaufnahme der Referenzmessung im Gegensatz zum allgemeinen Fall reduziert werden, indem man sich ausschließlich auf die für die Kalibrierung verwendeten Einstellungen des 3MA-Prüfsystems festlegt. Dieses auf die Kalibriereinstellungen festgelegte Aufnehmen der Referenzmessung wäre auch nach der Herstellung vorab mit einer Standardprobe denkbar. Dazu müssten aber zum Fertigungszeitpunkt der Prüfsystemkomponente bereits Informationen über die Randbedingungen und Einstellungen der zukünftigen Kalibrierung vorliegen. Es wäre aber auch, wenn man diese Informationen zum Fertigungszeitpunkt besitzt, nicht gesichert, dass das Verhalten an der Standardprobe dem der Kalibrierproben entspricht.

In Abb. 53 ist exemplarisch verdeutlicht, wie sich die Verwendung von Differenz-Prüfgrößen auf das Prüfgrößenverhalten auswirkt. Als Referenzmessung wurde in Abb. 53 eine Messung an einer beliebig ausgewählten Kalibrierprobe verwendet. Es ist deutlich erkennbar, dass durch die Verwendung derartiger Prüfgrößen auf recht einfachem Weg eine Angleichung des Prüfgrößenverhaltens der beiden Sensoren stattfindet. Verwendet man nun die Differenz-Prüfgrößen in einer Mustererkennung oder in einer Regressionsanalyse zur Kalibrierung, so ist der Sensor- und Geräteeinfluss auf die Kalibrierung durch die Differenz-Prüfgrößen minimiert.

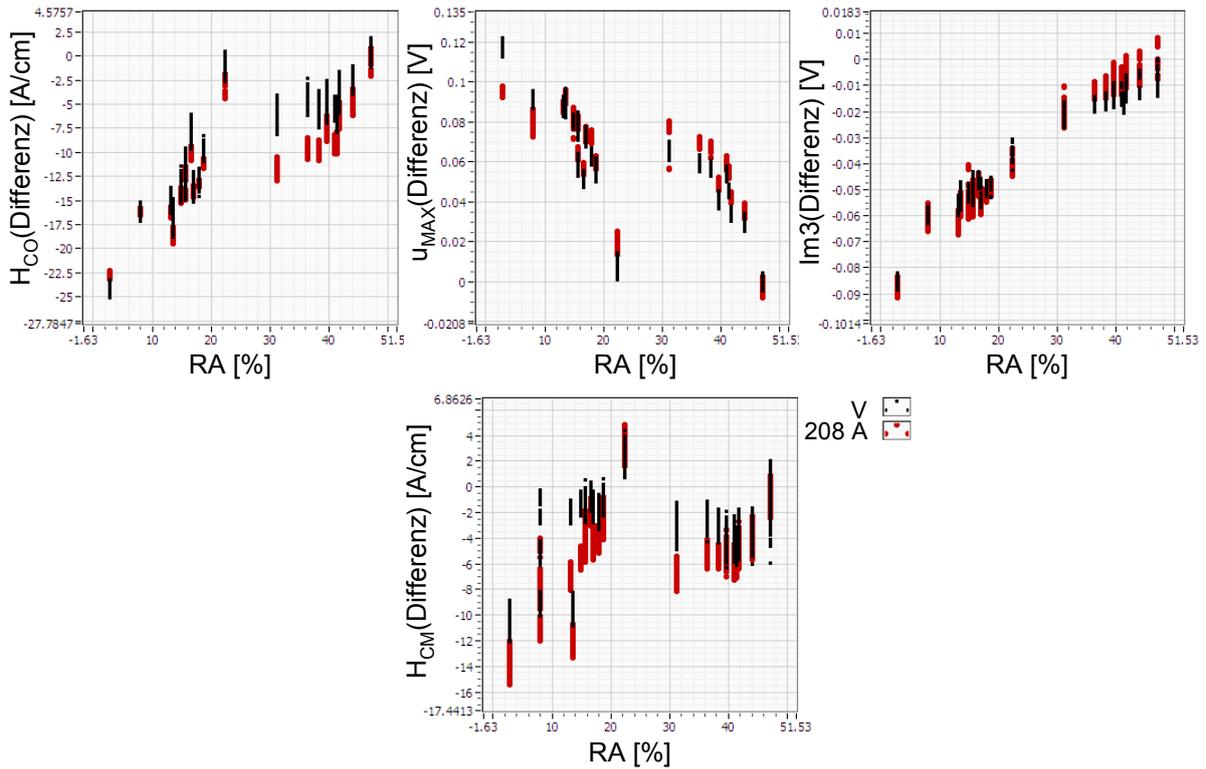


Abb. 53: Einfluss eines Sensoraustausches auf Differenz-Prüfgrößen

Diese Methode der Anpassung hat den Vorteil, dass dadurch keine spezifische Anpassung der Kalibrierung auf einen bestimmten Sensor beziehungsweise ein bestimmtes Gerät erfolgt. Bei äquivalentem Vorgehen werden für mehrere Sensoren, auch alle diese Sensoren gleichberechtigt angepasst. Die gleichberechtigte Anpassung steht in diesem Fall dafür, dass alle äquivalent in Differenz-Prüfgrößen umgewandelte Daten unterschiedlicher Sensoren und Geräte einen Austausch ohne weitere Anpassungen jederzeit möglich machen. Zusätzlich benötigt diese Methode keine spezielle Probenauswahl zur Anwendung, sondern es kann zum Beispiel eine beliebige Kalibrierprobe als Referenzprobe verwendet werden.

4.3 Anpassung durch polynomiale Approximation

Bevor mit einer Anpassung durch polynomiale Approximation, die mehr als eine beliebige Probe für ihre Anwendung benötigt, begonnen werden kann, ist es zwingend notwendig, die Kalibrierproben auszuwählen, mit deren Hilfe eine Anpassung umgesetzt werden kann. Hierzu muss man berücksichtigen, dass zu dem Zeitpunkt, wenn mit einem Prüfsystem und einem Sensor eine Kalibrierung angefertigt wird, noch keine Informationen über die eventuell später folgende Anpassung vorliegt. Es ist also weder bekannt, ob ein Sensor, ein Gerät oder das komplette Prüfsystem ausgetauscht wird, noch welchen Einfluss dieser Austausch haben wird. Es muss also ausgehend von den Kalibrierdaten eine Auswahl der Proben stattfinden, da nur diese zur Verfügung stehen.

Für diese Probenauswahl kann man unterschiedliche Vorgehensweisen verwenden. Zum einen können ausgehend von dem Prüfgrößenverhalten beziehungsweise von den Prüfgrößenbereichen des gesamten Kalibrierprobensatzes eine Probenwahl getroffen werden, zum anderen kann von dem Zielgrößenbereich des Kalibrierprobensatzes ausgegangen werden.

Zusätzlich können in beiden Fällen Einflüsse, die nicht direkt durch die Prüf- oder Zielgrößen erfasst werden, die Probenwahl beeinflussen. Darunter ist zum Beispiel zu verstehen, dass bei der Kalibrierung verschiedene Geometrien, unterschiedliche Wärmebehandlungen oder sonstige unterschiedliche Kalibrierprobentypen durch eine entsprechende Gruppierung und anschließende Probenauswahl berücksichtigt werden.

4.3.1 Probenauswahl ausgehend vom Prüfgrößenraum

Eine Möglichkeit der Findung einer Probenauswahl für eine spätere Anpassung ist die Analyse des Prüfgrößenraumes, welcher durch die Datenaufnahme an den Kalibrierproben aufgespannt wird. Darunter ist zu verstehen, dass der durch die Datenaufnahme an dem Kalibrierprobensatz entstandene Wertebereich für jede Prüfgröße untersucht wird. Es wird also der Betrag eines jeden Prüfgrößenvektors im durch die Kalibrierung aufgespannten Prüfgrößenraum betrachtet. Für eine möglichst gute Abdeckung des Prüfgrößenraumes sind diejenigen Proben zu ermitteln, die den Prüfgrößenvektor am besten beschreiben. Hierzu ist es in einem ersten Schritt notwendig, die den beiden Extrema (Maximum und Minimum) jeder Prüfgröße zugeordneten Kalibrierproben zu ermitteln. Als mindestens notwendigen zweiten Schritt ist die Kalibrierprobe zu ermitteln, die im mittleren Wertebereich der Prüfgrößen liegt. So lässt sich eine Grundabdeckung durch Stützstellen an drei Positionen für die Prüfgrößen gewährleisten. Durch weitere Schritte kann eine gleichmäßige Verteilung von Stützstellen über die Prüfgrößenbereiche erfolgen.

Hierbei ist zu beachten, dass bei diesem Vorgehen nicht gezwungenermaßen für alle Prüfgrößen die gleichen Kalibrierproben zum Beispiel das Maximum oder Minimum des Prüfgrößenbereiches darstellen. Dies ist anhand der Prüfgrößen u_{MAX} und DH_{25m} an einem Beispiel in Abb. 54 verdeutlicht.

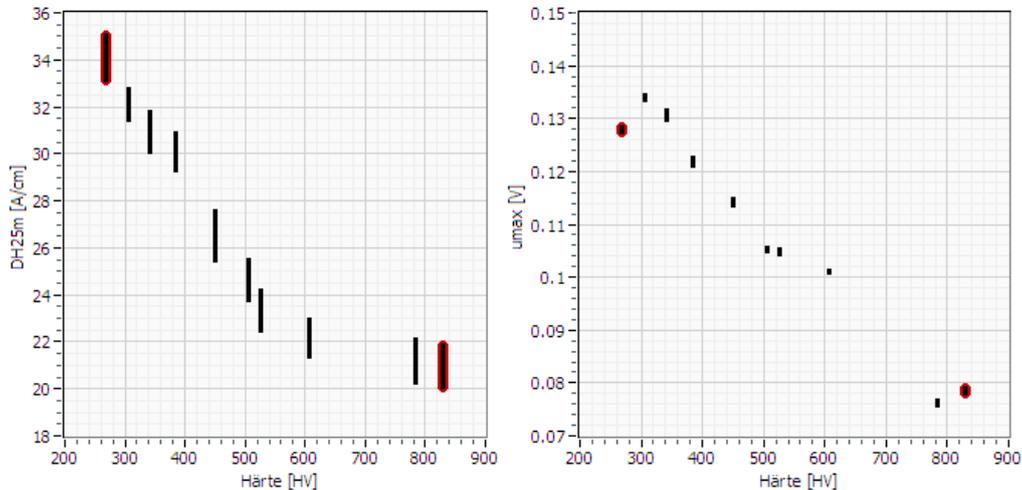


Abb. 54: *Beispiel für die unterschiedliche Lage zweier einzelner Kalibrierproben über den Wertebereich zweier Prüfgrößen*

Im linken Teil von Abb. 54 stellen die beiden Proben die Extrema des Prüfgrößenbereiches dar. Im rechten Teil ist dies für die gleichen Proben jedoch nicht der Fall. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer gewichteten Auswahl der Kalibrierproben. Unter dieser gewichteten Auswahl ist zu verstehen, dass berücksichtigt wird, welche Kalibrierproben am häufigsten bei dem schrittweisen Vorgehen für den gesamten Prüfgrößenraum des Kalibrierprobensatzes ausgewählt wurden. Die Proben, die am häufigsten ausgewählt wurden, sind die für den gesamten Prüfgrößenraum am repräsentativsten. Mit Hilfe dieser so ausgewählten Proben kann eine Anpassung erfolgen.

4.3.2 Probenauswahl ausgehend vom Zielgrößenbereich

Eine weitere Möglichkeit der Probenauswahl für eine spätere Anpassung ist eine Auswahl auf Basis des Zielgrößenbereiches der anzupassenden Kalibrierung. Hierfür kann äquivalent zu dem im vorherigen Punkt beschriebenen Ablauf für eine Prüfgröße vorgegangen werden. Es werden also in einem ersten Schritt die zu den Extremwerten des Zielgrößenbereiches gehörigen Kalibrierproben ermittelt. Im nächsten mindestens notwendigen Schritt wird die Kalibrierprobe ermittelt, die im mittleren Wertebereich der Zielgrößen liegt. Durch weitere Schritte kann eine gleichmäßige Verteilung von Stützstellen in Form von dazu zugeordneten Kalibrierproben über die Zielgrößenbereiche erfolgen.

Auch hierbei gilt, dass nicht gezwungenermaßen die Extremwerte der Zielgrößen für alle Prüfgrößen auch deren Extremwerten entsprechen. Dies wird ebenfalls in dem in Abb. 54 dargestellten Beispiel deutlich.

Bei dieser Probenauswahl kann im Gegensatz zur Vorgehensweise ausgehend vom Prüfgrößenbereich keine Gewichtung durchgeführt werden. Jedoch sollten die signifikanten Einflüsse auf den Prüfgrößenraum aus der Zielgrößenvariation herrühren, was dieses Vorgehen sinnvoll und schlüssig macht.

4.3.3 Polynomiale Approximation zur Prüfgrößenraumanpassung

Bei der Anwendung der polynomialen Approximation als weitere Möglichkeit, den Prüfgrößenraum einer Kalibrierung auf andere Sensoren oder Geräte übertragen zu können, wird eine Anpassung des Prüfgrößenraumes vorgenommen. Dies bedeutet, dass der Prüfgrößenraum abhängig von dem anzupassenden Sensor beziehungsweise dem anzupassenden Gerät „umgeformt“ wird. Man kann sich den Prüfgrößenraum als multidimensionalen Raum vorstellen, dessen Multidimensionalität durch die Anzahl der Prüfgrößen gebildet wird. Für jede an der Kalibrierdatenbank beteiligte Prüfgröße entsteht also jeweils eine Dimension in dem Prüfgrößenraum.

Die Umformung des Prüfgrößenraumes kann mit Hilfe von polynomialen Approximationen umgesetzt werden. Darunter ist zu verstehen, dass man das von der Zielgröße und dem verwendeten Prüfsystem abhängige Prüfgrößenverhalten ohne Verlust der Zielgrößenabhängigkeit auf das geänderte Gesamtprüfsystem überträgt. Die Übertragung erfolgt in diesem Fall mittels Polynomen. Diese Anpassung durch Polynome wird deutlich, wenn man das Verhalten einer Prüfgröße zweier Sensoren beziehungsweise Geräte aufeinander bezieht und darstellt. Darunter ist zu verstehen, dass die Prüfgrößenwerte des einen Sensors beziehungsweise Gerätes gegen die entsprechenden Prüfgrößenwerte der gleichen Probe und Messstelle des anderen Sensors beziehungsweise Gerätes aufgetragen werden. Dies ist in Abb. 55 exemplarisch für zwei Sensoren und einem Prüfgerät und in Abb. 56 für zwei Prüfgeräte und einen Sensor an je einer Prüfgröße aus jedem der vier 3MA-Prüfverfahren dargestellt. Um zu verdeutlichen, dass sich das dargestellte Verhalten nicht nur in einem Anwendungsfall zeigt, stammen in Abb. 55 und Abb. 56 jeder dargestellte Prüfgrößengraph aus einer anderen Kalibrierung. Die Kalibrierungen unterscheiden sich in den Proben, in der Zielgröße, in den verwendeten Sensoren und Sensortypen sowie in den Einstellungen bezüglich der Magnetisierungsfrequenz und der Feldaussteuerung des 3MA-Prüfsystems.

In Abb. 55 und Abb. 56 wird deutlich, dass sowohl die beiden Sensoren als auch die beiden Geräte, wenn auch nicht so stark und ausgeprägt wie bei einem Sensortausch, einen Einfluss auf die Prüfgrößen beziehungsweise ein unterschiedliches Prüfgrößenverhalten haben.

Hervorgehoben wird dies durch die zusätzlich eingetragene Winkelhalbierende der dargestellten Koordinatensysteme. Wäre kein Einfluss vorhanden, würden bei dieser Auftragsvariante alle dargestellten Messpunkte auf der Winkelhalbierenden liegen und ein Sensor- oder Geräteaustausch wäre problemlos möglich. Die Darstellungen verdeutlichen, dass, wenn eine Zielgrößenabhängigkeit in einer Prüfgröße vorhanden ist, diese auch für einen anderen Sensor oder für ein anderes Gerät in dieser Prüfgröße vorhanden ist. Jedoch kann die Abhängigkeit in einem anderen Wertebereich liegen und für jede Prüfgröße unterschiedlich stark ausgeprägt sein.

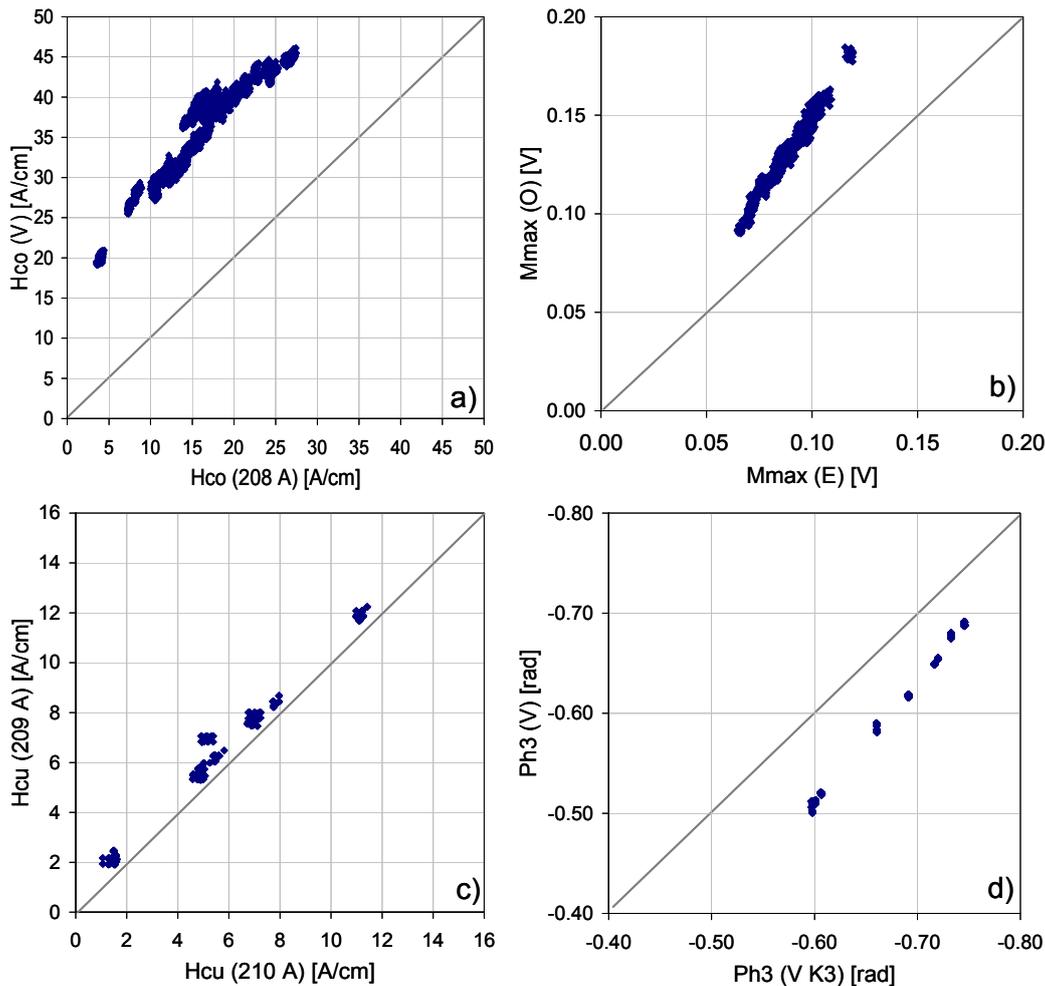


Abb. 55: a) Prüfgröße H_{CO} aus der Oberwellenanalyse für zwei Sensoren (V, 208 A); b) Prüfgröße M_{MAX} aus der Barkhausen-Rausch-Analyse für zwei Sensoren (O, E); c) Prüfgröße H_{CU} aus der Überlagerungspermeabilität für zwei Sensoren (209 A, 210 A); d) Prüfgröße $Ph3$ aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse für zwei Sensoren (V, V K3)

Der andere Wertebereich wird in Abb. 55 a) deutlich. Der Sensor V hat einen Wertebereich in der Prüfgröße H_{CO} von ca. 19 – 47 A/cm, der auf der Abszisse aufgetragene Sensor 208 A hat jedoch an den gleichen Proben einen Wertebereich von ca. 3 – 28 A/cm. Diese unterschiedlichen Wertebereiche verdeutlichen den Offset in der betrachteten Prüfgröße H_{CO} der zwischen dem Sensor V und dem Sensor 208 A vorhanden ist. Allerdings ist bei diesen beiden Sensoren die Stärke der Abhängigkeit ungefähr gleich ausgeprägt. So ergibt sich bei

Sensor V eine Prüfgrößenwertespanne von ca. 28 A/cm und für Sensor 208 A eine Spanne von ca. 25 A/cm. Diese unterschiedlichen Signalspannen lassen sich als eine leichte Phasenverschiebung der beiden Sensoren untereinander auffassen. Diese beiden Beobachtungen zeigen, dass sich das Prüfgrößenverhalten bei einem Austausch unterschiedlich stark in Offset- und Phasenverschiebungen des Prüfgrößenverhaltens über den betrachteten Zielgrößenbereich äußern kann. Aus Abb. 56 wird ähnliches aber nicht so stark ausgeprägtes Verhalten für einen Prüfgeräteaustausch deutlich.

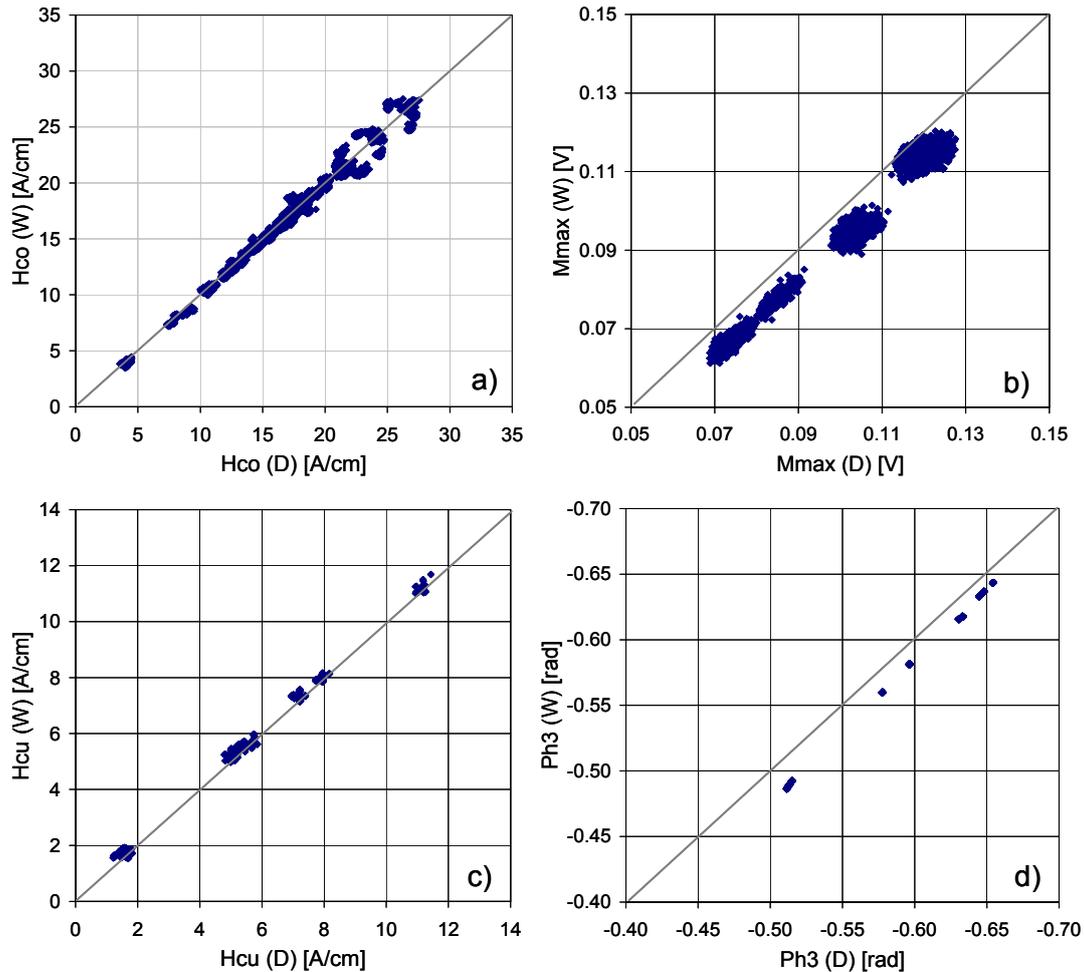


Abb. 56: a) Prüfgröße H_{CO} aus der Oberwellenanalyse für zwei Prüfgeräte (W, D); b) Prüfgröße M_{MAX} aus der Barkhausen-Rausch-Analyse für zwei Prüfgeräte (W, D); c) Prüfgröße H_{CU} aus der Überlagerungspermeabilität für zwei Prüfgeräte (W, D); d) Prüfgröße $Ph3$ aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse für zwei Prüfgeräte (W, D)

Da sich ähnliches Verhalten sowohl bei Sensor- als auch bei Prüfgeräteaustausch für mehrere Anwendungen einstellt (siehe Abb. 55 und Abb. 56), liegt der Schluss nahe, mit einer Anpassung alle möglichen Anwendungen bezüglich eines Prüfsystemkomponentenaustausches anpassen zu können. Deshalb ist in Abb. 57 am Beispiel eines Sensoraustausches das Verhalten je einer Prüfgröße jedes 3MA-Prüfverfahrens für drei unterschiedliche Anwendungen dargestellt. Die jeweiligen Prüfgrößenwerte der drei Anwendungen sind in Abb. 57 in unterschiedlichen Farben dargestellt und jeweils mit einer linearen Trendlinie ergänzt wor-

den. Die linearen Trendlinien verdeutlichen in Abb. 57, dass die einzelnen Anwendungen unterschiedliche Prüfgrößentrendverläufe bei Austausch einer Prüfsystemkomponente zeigen können. Dies ist bedingt dadurch, dass nicht nur die Prüfsystemkomponenten und die Zielgrößenabstufungen einen Einfluss auf das Prüfgrößenverhalten haben, sondern auch anwendungsspezifische Komponenten in dem Prüfgrößenverhalten enthalten sein können. Darunter sind Einflüsse wie zum Beispiel die Probengeometrie, das Mikrogefüge und der Eigenspannungszustand der Proben, aber auch die unterschiedlichen Einstellungen des 3MA-Prüfsystems bezüglich der Magnetisierungsfrequenz und der Magnetfeldaussteuerung, zu verstehen.

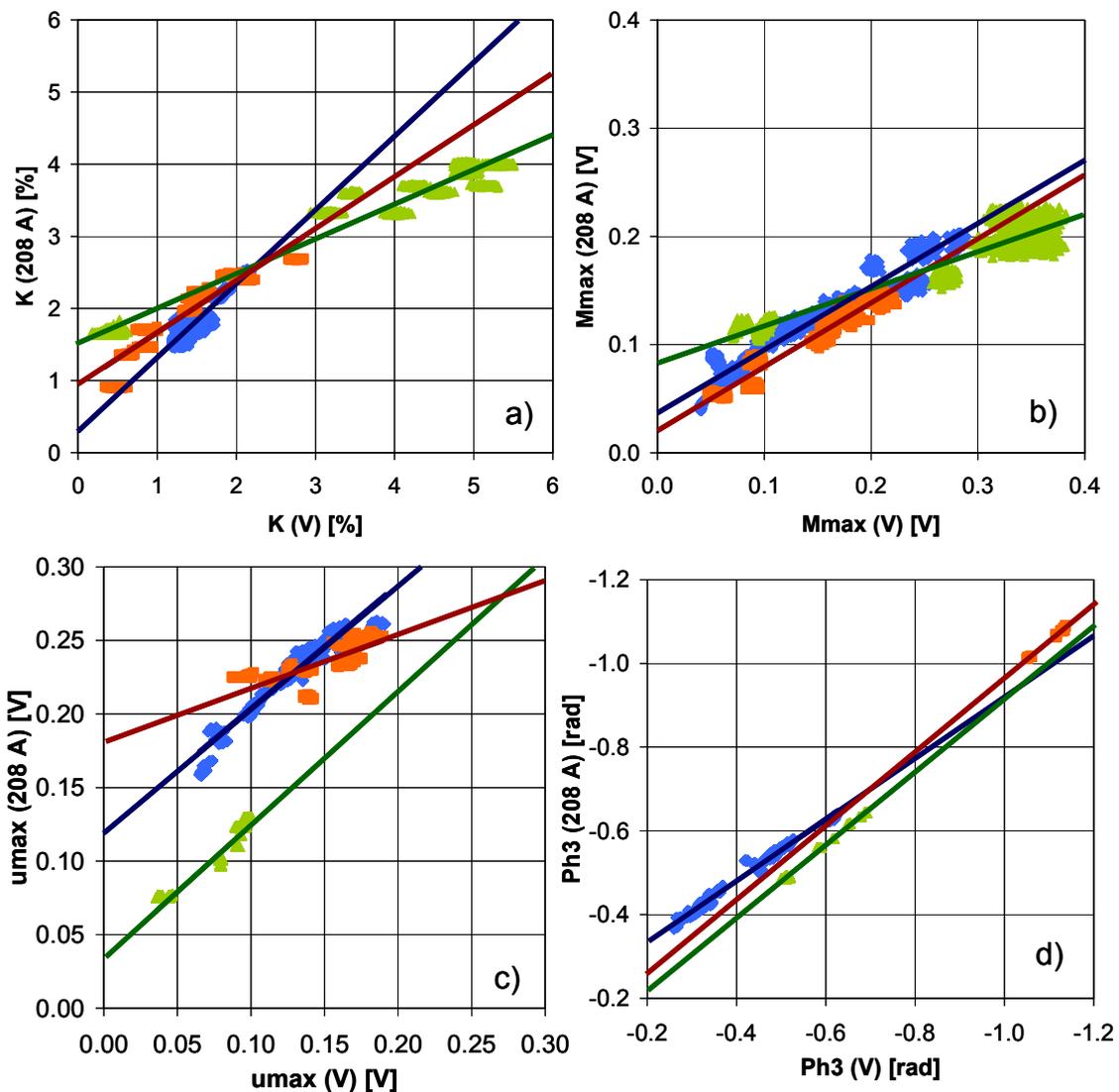


Abb. 57: a) Prüfgröße K aus der Oberwellenanalyse; b) Prüfgröße M_{MAX} aus der Barkhausen-Rausch-Analyse; c) Prüfgröße u_{MAX} aus der Überlagerungspermeabilität; d) Prüfgröße $Ph3$ aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse

Abb. 57 verdeutlicht, dass eine Anpassung der Kalibrierung nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch anwendungsspezifisch durchgeführt werden muss, um ein bestmögliches Ergebnis erlangen zu können.

Da bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch sowohl Verschiebungen der Wertebereiche, also Offsetverschiebungen, aber auch Phasenverschiebungen der Prüfgrößenwerte über den Zielgrößenbereich zweier Sensoren beziehungsweise Geräte auftreten können, müssen beide möglichen Effekte kompensiert werden. Dies lässt sich umsetzen, wenn man äquivalent zu den Darstellungen Abb. 55 und Abb. 56 vorgeht und jede Prüfgröße für sich bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch anpasst. Anders ausgedrückt muss jede Dimension des Prüfgrößenraumes für sich betrachtet werden und auf die korrespondierende Raumdimension des neuen Sensors beziehungsweise Gerätes transformiert werden. Dies wurde für diese Anpassungsmöglichkeit mittels Approximation durch Polynome umgesetzt, die für jede Prüfgröße die Prüfgrößenwerte in den entsprechenden neuen Wertebereich unter Berücksichtigung der eventuell vorhandenen Phasenverschiebung überführt. Die Polynome werden hier durch Fit-Funktionen gebildet.

Dafür werden allgemein die zu fittenden Daten durch ein Polynom in folgender Form beschrieben.

$$f_i = \sum_{j=0}^m a_j x_i^j \quad \text{Gl. 4-3}$$

In Gleichung Gl. 4-3 repräsentiert f den besten polynomialen Fit, x die zu fittenden Daten, a die polynomialen Koeffizienten in der Fit-Funktion und m stellt die polynomiale Ordnung der Fit-Funktion dar. Überführt man diesen allgemeinen Ansatz auf die Anwendung zur Prüfgrößenraumumformung zur Sensor- beziehungsweise Geräteanpassung, ergibt sich folgende Gleichung:

$$PG_{i,2} = \sum_{j=0}^m a_j PG_{i,1}^j \quad \text{Gl. 4-4}$$

In dieser Gleichung steht der Ausdruck $PG_{i,2}$ für die Prüfgröße, die auf den neuen Sensor, das neue Gerät oder das neue Prüfsystem mit Hilfe der korrespondierenden Prüfgröße $PG_{i,1}$ des ursprünglichen, beziehungsweise ersten Sensors, Gerätes oder Prüfsystem gefittet wurde. a sind wie im allgemeinen Fall die polynomialen Koeffizienten der Fit-Funktion und m stellt die polynomiale Ordnung der Fit-Funktion dar. Die Bildung der Fit-Polynome für die Prüfgrößen wird durch die Minimierung der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Methode) optimiert und unter Verwendung der SVD-Faktorisierung generiert (SVD = Singular Value Decomposition). Die Fehlerminimierung erfolgt unter Auswertung des mittleren quadratischen Fehlers MSE (Mean Square Error), der für n Datenpaare folgendermaßen gebildet wird:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (PG_{i,2} - PG_{i,1})^2$$

Gl. 4-5

Die für diese Bildung und Optimierung der Prüfgrößen-Fit-Polynome notwendigen korrespondierenden Datenpaare werden mit Hilfe der bereits in Kapitel 4.3 beschriebenen Methoden zur Probenauswahl und anschließender Datenaufnahme an den ausgewählten Kalibrierproben geschaffen. Die Datenaufnahme mit dem anzupassenden Sensor oder Gerät muss unter den gleichen Bedingungen wie die ursprüngliche Kalibrierdatenaufnahme geschehen. Zur Verdeutlichung der Effizienz beider Methoden zur Probenauswahl sind in Abb. 58 anhand von Beispiel c) aus Abb. 55 beide Methoden zur Auswahl von drei Proben angewandt und das Ergebnis dargestellt worden. Es wird deutlich, dass beide Methoden zu einer repräsentativen Probenauswahl führen, die das Verhalten der beiden Sensoren über den betrachteten Zielgrößenbereich gut beschreiben und somit auch gut für eine Anpassung geeignet sind.

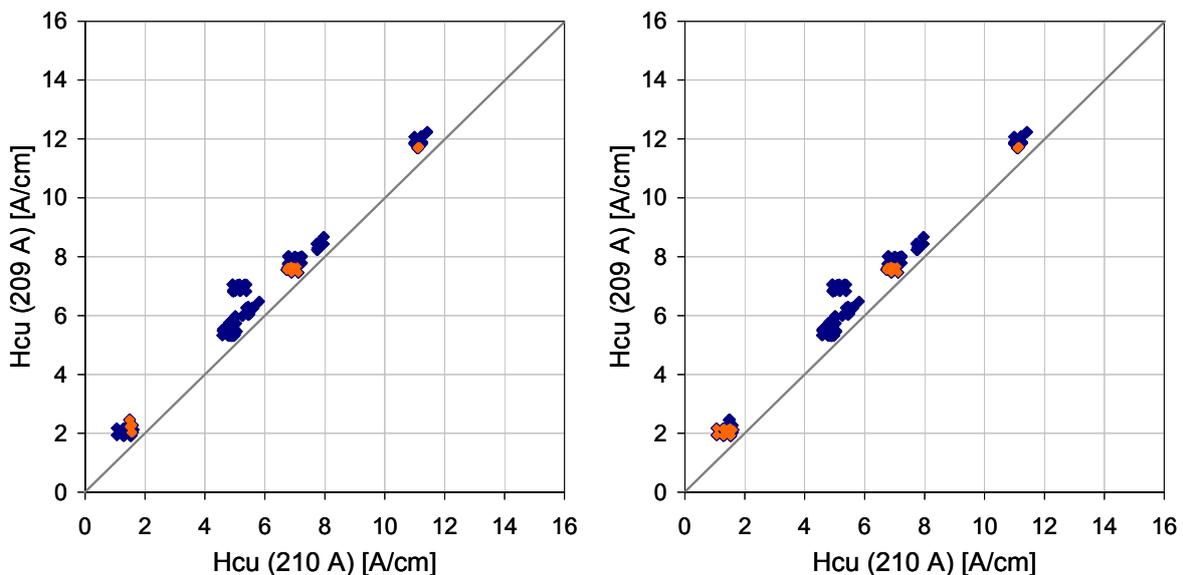


Abb. 58: Prüfgröße H_{CU} für zwei Sensoren (209 A, 210 A) (blau); links: minimale Probenauswahl ausgehend von dem Zielgrößenbereich (orange); rechts: minimale Probenauswahl ausgehend von dem Prüfgrößenraum (orange)

Im Anschluss an die Datenaufnahme mit dem anzupassenden Part des Prüfsystems werden aus der ursprünglichen Kalibrierdatenbank die korrespondierenden Messungen extrahiert und den neu aufgenommenen Messungen zugeordnet. Die so gebildeten Datenpaare stellen die Grundlage für die Bildung der Prüfgrößen-Fit-Funktionen und sind in Abb. 58 für zwei Probenauswahlmethoden in Orange dargestellt. Es wird für jede in der ursprünglichen Kalibrierdatenbank vorhandene Prüfgröße unter Verwendung der gebildeten Datenpaare eine derartige Fit-Funktion gebildet. Im Anschluss daran wird jede Messung in der ursprünglichen Kalibrierdatenbank prüfgrößenspezifisch mit den entsprechenden Fit-Funktionen verrechnet. Dadurch findet eine Anpassung des Prüfgrößenraumes auf das veränderte Gesamtprüfsys-

tem statt, und es wird eine dementsprechende neue Kalibrierdatenbank generiert. Diese neue Kalibrierdatenbank kann dann als Grundlage für eine Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems entweder durch eine Mustererkennung oder durch eine Regressionsanalyse verwendet werden. Der Ablauf bei einer Anpassung einer Kalibrierung nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch durch polynomiale Approximation des Prüfgrößenraums ist in Abb. 59 schematisch skizziert.

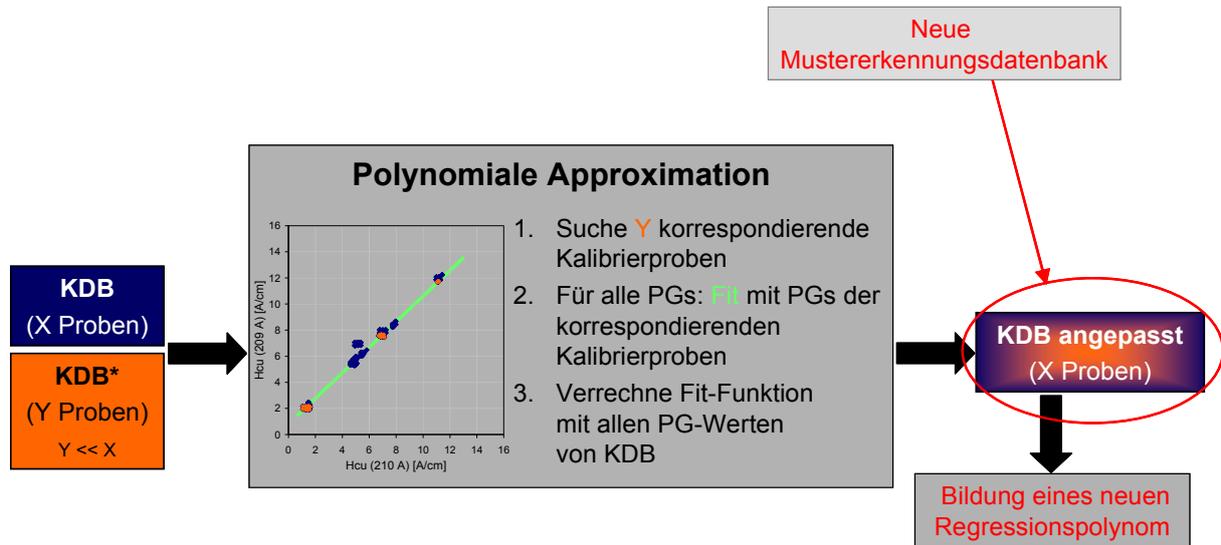


Abb. 59: Schematischer Ablauf einer Anpassung durch polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes

4.3.3.1 Prüfgrößeneinschränkung / Prüfgrößenwichtung

Für Anwendungen, in denen Prüfgrößen existieren, die für zwei Sensoren beziehungsweise Prüfgeräte Unstetigkeiten oder keine Abhängigkeiten in ihrem Verhalten untereinander aufweisen, zeigen sich bei der zuvor beschriebenen Auftragung beziehungsweise Analyse keine eindeutigen Korrelationen (siehe Abb. 60). Dies kann dazu führen, dass innerhalb des Prüfgrößenraumes derartige Dimensionen mit einer unzureichenden Genauigkeit angepasst werden. Um zu vermeiden, dass diese Ungenauigkeiten auch in die Kalibrierung einfließen, wird das Bestimmtheitsmaß aller zusammengehörigen Prüfgrößen gebildet. Die Bestimmtheitsmaße werden mit Hilfe der Daten errechnet, die an den zur Anpassung verwendeten Proben mit der neuen Prüfsystemkomponente aufgenommenen wurden. Die Berechnung erfolgt, indem aus den anzupassenden Kalibrierdaten die Messungen von den Proben gefiltert werden, die auch mit der neuen Komponente des Prüfsystems vermessen wurden. Anschließend können die Korrelationskoeffizienten für jede Prüfgröße berechnet und quadriert werden, um so die Bestimmtheitsmaße zu ermitteln. Durch diese lassen sich die Prüfgrößen ermitteln, die durch die polynomiale Approximation nur bedingt angepasst werden können. In Abb. 60 sind die Bestimmtheitsmaße anhand eines Beispiels für die beiden Auswahlmethoden (orange) und der gesamten Daten (blau) angegeben. Da durch die Auswahl

der Proben für die Anpassung die Prüfgrößenbereiche möglichst gut abgedeckt sind, zeigen sich auch in diesen Teilmengen der Prüfgrößenwerte geringe Bestimmtheitsmaße bei unkorrelierten Prüfgrößen (siehe Abb. 60).

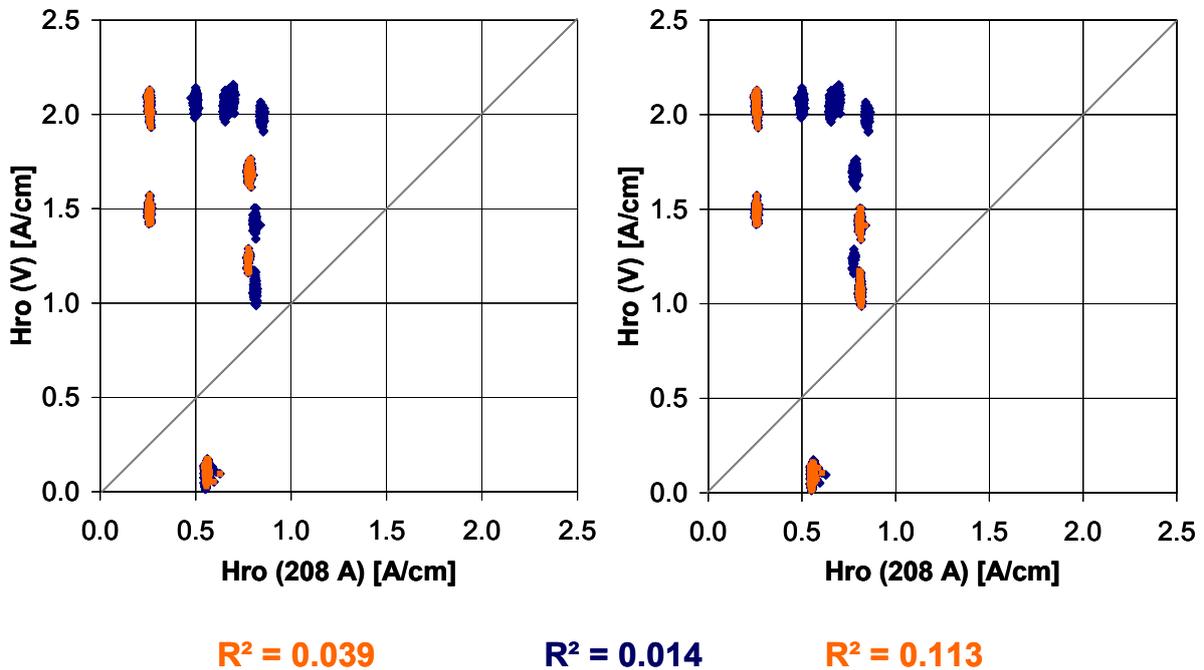


Abb. 60: Prüfgröße H_{CO} aus der Überlagerungspermeabilität für zwei Sensoren (V, 208 A) (blau); links: minimale Probenauswahl ausgehend von dem Zielgrößenbereich (orange); rechts: minimale Probenauswahl ausgehend von dem Prüfgrößenraum (orange)

So lassen sich derartig unkorrelierte Prüfgrößen von der Kalibrierung des 3MA-Prüfsystems nach einer Anpassung für eine Regressionsanalyse ausschließen, indem sie bei der Kalibrierpolynomformbildung nicht verwendet werden.

Bei der Verwendung einer Mustererkennung zur Kalibrierung können die R^2 -Werte direkt in die Kalibrierdatenbank integriert werden. Denn das Bestimmtheitsmaß bietet sich aufgrund seines Wertebereichs von Null bis maximal Eins als Prüfgrößengewicht für eine Kalibrierdatenbank an. Durch eine Wichtung der verwendeten Prüfgrößen besteht die Möglichkeit, ungenau angepasste Prüfgrößen zu unterdrücken beziehungsweise entsprechend ihrer Korrelation zu dämpfen, so dass sie bei der Mustererkennung keinen beziehungsweise einen ihrer Anpassungsmöglichkeiten entsprechend niedrigeren Einfluss haben. Die Erkennung eines Musters innerhalb des Prüfgrößenverhaltens wird durch ungenau angepasste Prüfgrößen erschwert, weil dadurch keine für die Probe charakteristischen Prüfgrößenänderungen (keine eindeutigen Distanzen), ermittelt werden können. Bei dem Mustererkennungsverfahren werden die Distanzen der einzelnen Prüfgrößen zu einer Gesamtdistanz für den jeweiligen Kalibrierdatensatz auf gemittelt. Somit ist der Einfluss einer ungenau angepassten Prüfgröße stets in der Gesamtdistanz, die zur Detektion der nächsten Nachbarn verwendet wird, enthalten (siehe Kapitel 3.3.2.3 *Mustererkennung*). Um zu verhindern, dass derartige Störeinflüsse

die Mustererkennung behindern, können die Werte des Bestimmtheitsmaßes jeder Prüfgröße zur Wichtung der entsprechenden Prüfgrößen verwendet werden. Die Wichtungsfaktoren gehen innerhalb der Nearest-Neighbor-Suche sowie bei der anschließenden Ergebnisbildung in die zugehörigen normierten Prüfgrößen multiplikativ ein (siehe Gl. 4-6).

$$s_{\sigma,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (p_{MUSTER,j,i} - \hat{p}_{MUSTER,j})^2}$$

$$\vec{g}_h = (g_{h,0} \quad \dots \quad g_{h,(n-1)}) = (R_{h,0}^2 \quad \dots \quad R_{h,(n-1)}^2) \quad ; \quad 0 \leq h \leq b_{GP}$$

$$p_{NORM,GEWICHT,a,j,h} = \frac{p_{a,j} \cdot g_{h,j}}{s_{\sigma,j}}$$

$$\vec{p}_{NORM,GEWICHT,a,h} = (p_{NORM,GEWICHT,a,0,h} \quad \dots \quad p_{NORM,GEWICHT,a,(n-1),h})$$

$$\vec{y}_{NORM,GEWICHT,h} = (y_{NORM,GEWICHT,0,h} \quad \dots \quad y_{NORM,GEWICHT,(n-1),h})$$

Gl. 4-6

$$d_{y,GEWICHT,a} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{q=0}^{n-1} g_{h,q}} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} (p_{NORM,GEWICHT,a,x,h} - y_{NORM,GEWICHT,x,h})^2}$$

Wegen der durch den Wertebereich von R^2 ($0 \leq R^2 \leq 1$) bedingten Beschränkung der Gewichte auf Werte zwischen $0 \leq g_{h,j} \leq 1$ kann der Einfluss von unkorreliertem Prüfgrößenverhalten zweier Prüfsystemkomponenten in einer Mustererkennung bewertet beziehungsweise berücksichtigt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit programmierte Modul innerhalb des modularen Messsystems (mms) ermöglicht nach einer Anpassung durch polynomiale Approximation eine direkte Anfertigung einer Regressionsanalyse mit der angepassten Kalibrierdatenbank oder bietet die Möglichkeit, die angepasste Kalibrierdatenbank direkt als Mustererkennungsdatenbank abzuspeichern. Dadurch lässt sich im Anschluss an eine Anpassung problemlos eine für das veränderte Prüfsystem gültige Kalibrierung generieren.

Bei dieser Methode der Anpassung handelt es sich um eine spezifische Anpassung der Kalibrierung auf einen bestimmten Sensor beziehungsweise ein bestimmtes Gerät oder besser gesagt, auf ein bestimmtes Prüfsystem bestehend aus einem Prüfgerät und einem Sensor. Dies bedeutet, dass die Anpassung in der Regel nur für ein Prüfsystem gültig ist. Das bedeutet in diesem Fall, dass bei einem weiteren Austausch einer Prüfsystemkomponente eventuell eine erneute Anpassung auf das veränderte Prüfsystem stattfinden muss.

4.4 Anpassung über eine Optimierung durch genetische Algorithmen

Im Rahmen von Neuronalen Netzen, Mustererkennungen usw. werden oftmals sogenannte Optimierungen des Systems vorgenommen. Die Optimierung erfolgt dann zum Beispiel unter Zuhilfenahme von Trainingsdaten. Mit diesen Trainingsdaten wird das Neuronale Netz oder die Mustererkennung geschult. Es findet sozusagen ein Lernvorgang des Systems statt. Es wird erlernt, sich auf die Trainingsdaten so einzustellen, dass die gewünschten Ergebnisse geliefert werden. In der Regel werden so Verbesserungen in der Ergebniskorrelation erzielt.

Wenn zur Kalibrierung eine Mustererkennung verwendet wird, lässt sich das Anpassungsproblem in ein Optimierungsproblem überführen. Dafür müssen lediglich als Trainingsdaten Messungen verwendet werden, die nach Austausch einer Komponente an den identischen Messstellen der zur Anpassung verwendeten Kalibrierproben aufgenommen wurden wie vor dem Komponententausch. Für den Fall, dass bei der Kalibrierung bereits mehrere Prüfsystemkomponenten wie zum Beispiel Ersatzsensoren zur Verfügung stehen, kann die Datenaufnahme mit den zusätzlichen Komponenten bereits vor einem Austausch geschehen. Mit diesen Daten findet dann eine Optimierung der Prüfgrößengewichte durch genetische Algorithmen statt, was zu einer Anpassung der ausgetauschten Komponente führen soll.

Hierfür konnte die in dem Mustererkennungsmodul des modularen Messsystems integrierte Optimierungsroutine verwendet werden. Der Ablauf von genetischen Algorithmen allgemein und der Ablauf der Gewichtsoptimierung in dem speziell zur Kalibrierung mittels Mustererkennung verwendeten Modul des modularen Messsystems werden nun näher erläutert.

Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen sind eine Klasse nichtlinearer, adaptiver und heuristischer Methoden zur Lösung von Such- und Optimierungsproblemen. Sie basieren auf dem natürlichen Vorbild der Evolution [*Cherv1997*].

In der Natur entwickeln sich über viele Generationen Populationen nach den Prinzipien der natürlichen Selektion und dem „Überleben des Stärkeren“. Indem diese Prinzipien der Natur imitiert werden, können genetische Algorithmen künstliche Populationen generieren und sie einer Evolution unterziehen, deren Ziel es ist, ihnen gestellte Probleme möglichst optimal zu lösen.

Im Allgemeinen laufen genetische Algorithmen in drei Phasen ab, die dann durch mehrere Iterationen zur Optimierung des Problems führen. Zu Beginn des Algorithmus wird eine Population künstlich erzeugt. Diese Population durchläuft anschließend zyklisch iterierend die drei Phasen:

- Erprobung
- Fehlerbewertung
- Populationsanpassung

Die Tauglichkeit der gesamten Population wird anhand eines Problems erprobt. Anschließend wird innerhalb der Fehlerbewertung für jedes Element der Population der problemspezifische Fehler ermittelt. Die folgende Populationsanpassung eliminiert daraufhin die Elemente mit den größten Fehlern aus der Population und ersetzt sie durch Mutationen aus anderen Elementen. Die Mutationen werden je nach Art des Algorithmus durch Kreuzung zweier Elemente, durch Variation der Elementwerte oder durch Kreuzung und Variation von Elementen der Population umgesetzt (siehe Abb. 61).

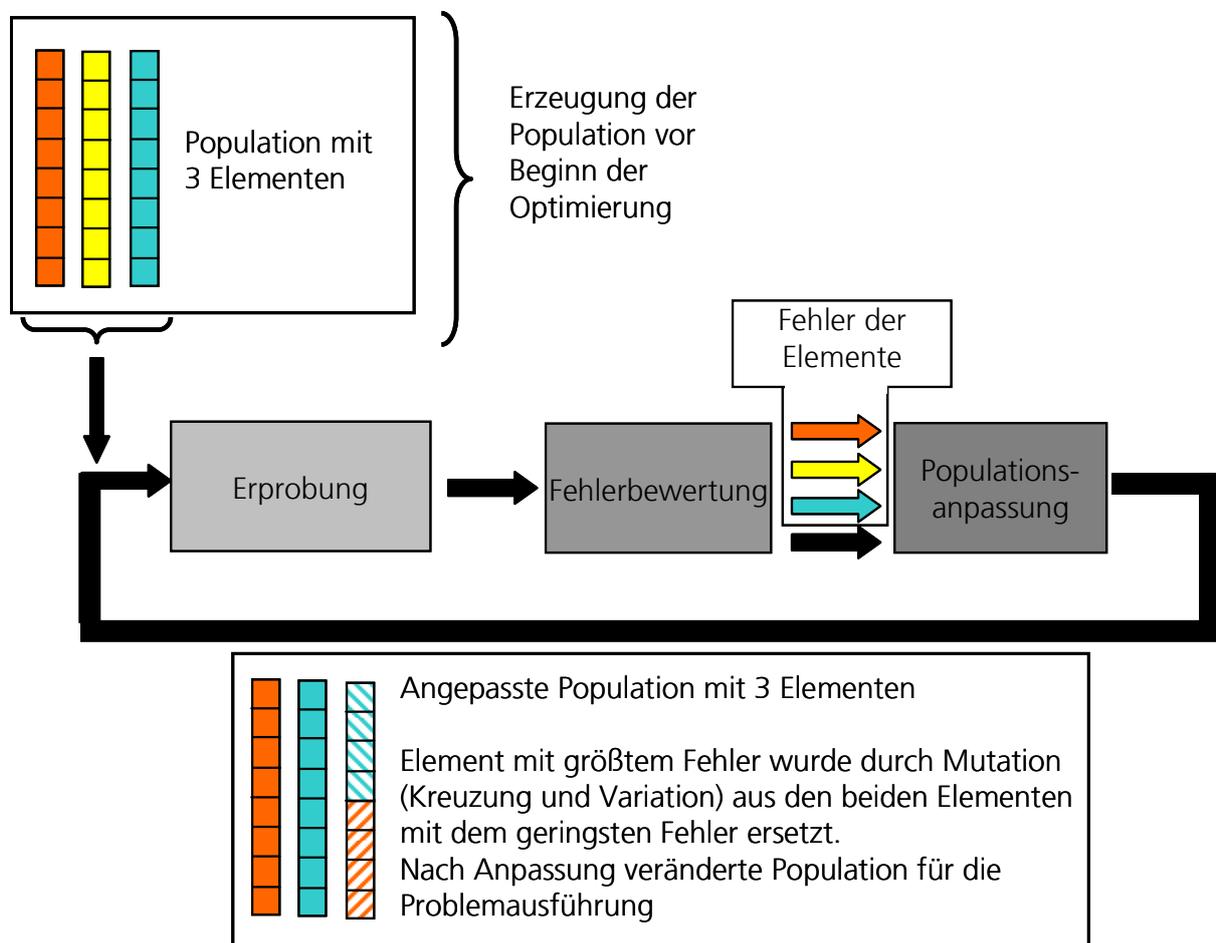


Abb. 61: Schematischer Ablauf eines genetischen Algorithmus

4.4.1 Gewichtsoptimierung durch genetische Algorithmen

In einer natürlichen Umgebung treten einzelne Individuen einer Spezies in Konkurrenzkampf um Ressourcen wie Futter, Wasser usw. Analog zur Natur wird innerhalb des Mustererkennungs-Moduls unter der Spezies ein Feld von Gewichtsvektoren (\vec{g}_h ; $h \in [0; (b_{GP} - 1)]$) verstanden. Dieses Feld wird im Rahmen der Gewichtsoptimierung im Weiteren auch als Gen-Pool (GP) bezeichnet.

$$GP = \begin{pmatrix} \vec{g}_0 \\ \vdots \\ \vec{g}_{(b_{GP}-1)} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Die Gewichtsvektoren haben eine der Anzahl der verwendeten Prüfgrößen entsprechende Dimension. Unter den Individuen der Spezies sind die einzelnen Gewichtsvektoren innerhalb des Feldes zu verstehen. b_{GP} ist die Populationsgröße der Spezies, also die Anzahl der Gewichtsvektoren innerhalb des Gen-Pools [Tsch2004].

4.4.2 Erprobung der Gewichtsoptimierung

Der Konkurrenzkampf ist über die Nearest Neighbor-Suche (siehe Kapitel 3.3.2.3.3) und anschließender Ergebnisbildung aus den nächsten Nachbarn (siehe Kapitel 3.3.2.3.5) umgesetzt. Die Nearest Neighbor-Suche wird mit Hilfe der Daten ausgeführt, die an den ausgewählten Kalibrierproben unter identischen Bedingungen wie die ursprüngliche Kalibrierung aufgenommen werden. Diese Messdaten von den ausgewählten Kalibrierproben werden im Folgenden auch als Trainingsdaten bezeichnet, da mit ihrer Hilfe die Gewichte optimiert beziehungsweise trainiert werden.

Zur Gewichtsoptimierung gehen innerhalb der Nearest Neighbor-Suche sowie bei der anschließenden Ergebnisbildung die Gewichte in die zugehörigen normierten Prüfgrößen multiplikativ ein (siehe Gl. 3-6 und vergleiche Gl. 1-8 und Gl. 1-9). Die Suche wird für jeden Trainingsdatensatz und für jeden Gewichtsvektor innerhalb des Gen-Pools durchgeführt. Die einzelnen Trainingsdatensätze werden dabei als zu erkennende Messungen (y) aufgefasst.

$$s_{\sigma,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (p_{MUSTER,j,i} - \hat{p}_{MUSTER,j})^2}$$

$$\vec{g}_h = (g_{h,0} \quad \cdots \quad g_{h,(n-1)}) \quad ; \quad 0 \leq h \leq b_{GP}$$

$$p_{NORM,GEWICHT,a,j,h} = \frac{p_{a,j} \cdot g_{h,j}}{s_{\sigma,j}}$$

$$\vec{p}_{NORM,GEWICHT,a,h} = (p_{NORM,GEWICHT,a,0,h} \quad \cdots \quad p_{NORM,GEWICHT,a,(n-1),h}) \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$\vec{y}_{NORM,GEWICHT,h} = (y_{NORM,GEWICHT,0,h} \quad \cdots \quad y_{NORM,GEWICHT,(n-1),h})$$

$$d_{y,GEWICHT,a} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{q=0}^{n-1} g_{h,q}} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} (p_{NORM,GEWICHT,a,x,h} - y_{NORM,GEWICHT,x,h})^2}$$

Durch die Beschränkung der Gewichte auf Werte $0 \leq g_{h,j} \leq 1$ kann der Einfluss einzelner Prüfgrößen für die Mustererkennung gedämpft werden, indem man Gewichtswerte < 1 für diese Prüfgrößen verwendet [Tsch2004].

4.4.3 Fehlerbewertung der Gewichtsoptimierung

Nachdem die Nearest Neighbor-Suche für alle Mitglieder des Gen-Pools ausgeführt wurde, erfolgt eine Fehlerabschätzung. Die Bewertung des Fehlers erfolgt über die Wurzel des Fehlerquadrates (RMSE) für jedes Mitglied des Gen-Pools. Die Wurzel des Fehlerquadrates berechnet sich allgemein folgendermaßen:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{t=1}^K (\hat{f}_t - f_t)^2} \quad \text{Gl. 4-9}$$

Die Elemente des Gen-Pools werden nach der Ermittlung ihres RMSE-Wertes mit ihren zugeordneten Fehlerwerten an die Populationsanpassung weitergegeben (siehe Abb. 61) [Tsch2004].

4.4.4 Populationsanpassung der Gewichtsoptimierung

Die Populationsanpassung durchsucht die ihr übergebene Population nach dem Element, dem der größte RMSE-Wert zugeordnet ist. Des Weiteren werden in der Populationsanpassung auch noch die beiden Elemente ermittelt, denen die geringsten RMSE-Werte zugeordnet wurden. Aus diesen Mitgliedern wird ein neuer Bestandteil der Population generiert. Man kann somit die beiden fehlerärmsten Elemente als Eltern des neu zu generierenden Ele-

ments auffassen. Der neue Bestandteil, kann auch als Kind bezeichnet werden. Das Kind wird, nachdem es generiert wurde, das Mitglied des Gen-Pools ersetzen, welches zuvor als am fehlerbehaftetsten erkannt wurde. Dadurch bleibt die Größe des Gen-Pools konstant, und es kann eine erneute Iteration (bestehend aus Erprobung, Fehlerermittlung und anschließender erneuter Populationsanpassung) ausgeführt werden [Tsch2004].

4.4.5 Erzeugen des neuen Elements im Gen-Pool

Die im Mustererkennungs-Modul umgesetzte Mutation des neuen Elements ist durch zufällige Kreuzung der Eltern und zusätzlicher Variation realisiert. Unter zufälliger Kreuzung ist eine Kombination der Gewichtswerte der Eltern untereinander zu verstehen, wobei ein zufälliger Anteil Gewichte aus dem Gewichtsvektor des einen Elternteils und der Rest der Gewichte von dem anderen Elternteil entnommen werden. Durch Kombination der Gewichtswerte der Eltern wird ein neuer Gewichtsvektor (Kind) erzeugt. Anschließend erfolgt eine zufällige, geringfügige Variation der Gewichtswerte des Kindes. Diese Variation wird, abhängig von einer Zufallsschranke, nur für einzelne Prüfgrößengewichte des neuen Gewichtsvektors ausgeführt. Lässt die Zufallsschranke für das jeweilige Prüfgrößengewicht eine Variation zu, so erfolgt diese über einen Zufallsprozess. Diejenigen Prüfgrößengewichtswerte, die durch die Zufallsschranke eine Variation verwehrt bekommen, behalten ihren von den Eltern erhaltenen Gewichtswert. Die Variation erfolgt über einen gaußverteilten Zufallsprozess, um einen breiten Variationsbereich umsetzen zu können und dennoch meist nur geringfügig zu variieren. So wird die Auffindung des globalen Fehlerminimums erleichtert [Tsch2004].

5 Umsetzung der Lösungswege

5.1 Anpassung mittels Differenzprüfgrößen

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben sind für die Anwendung von Differenzprüfgrößen zwei Wege zur Differenzbildung denkbar. Differenzbildung durch Datenaufnahme an einer Standard- oder einer Kalibrierprobe und anschließende Subtraktion der entsprechenden Prüfgrößenwerte zur Bildung der Differenzprüfgrößen. Bei der Verwendung einer Standardprobe wie zum Beispiel die bereits beschriebenen Härtevergleichsplatten sind wiederum zwei Varianten denkbar. Zum einen kann die Standardprobe mit beliebigen, aber immer identischen Einstellungen des 3MA-Prüfsystems vermessen werden. Es kann aber zum anderen auch jeweils eine der Kalibrierung entsprechende Einstellung des 3MA-Prüfsystems bei der Datenaufnahme an der Standardprobe verwendet werden. Im Anschluss folgen diese Szenarien für die unterschiedlichen Anwendungen.

Anwendung 1: Oberflächenhärtebestimmung an Härtevergleichsplatten

Bei dieser Anwendung wurden die Differenzprüfgrößen mittels einer Kalibrierprobe (Nr. 2, 307 HV) gebildet. Diese Kalibrierprobe wurde beliebig ausgewählt. Die an dieser Kalibrierprobe bei einer Messung gewonnenen Prüfgrößen wurden von den korrespondierenden Prüfgrößen der Kalibriermessungen subtrahiert. Die Messung an der beliebig ausgewählten Probe fand identisch zu der Kalibrierdatenaufnahme statt. Anschließend wurden mit dem so entstandenen Differenzprüfgrößen- beziehungsweise Merkmalsraum neue Kalibrierungen mit den bereits beschriebenen Methoden umgesetzt. In Abb. 62 und Abb. 63 sind exemplarisch Ergebnisse unter Anwendung der Kalibrierungen auf alle für diese Anwendung zur Verfügung stehenden Sensoren dargestellt.

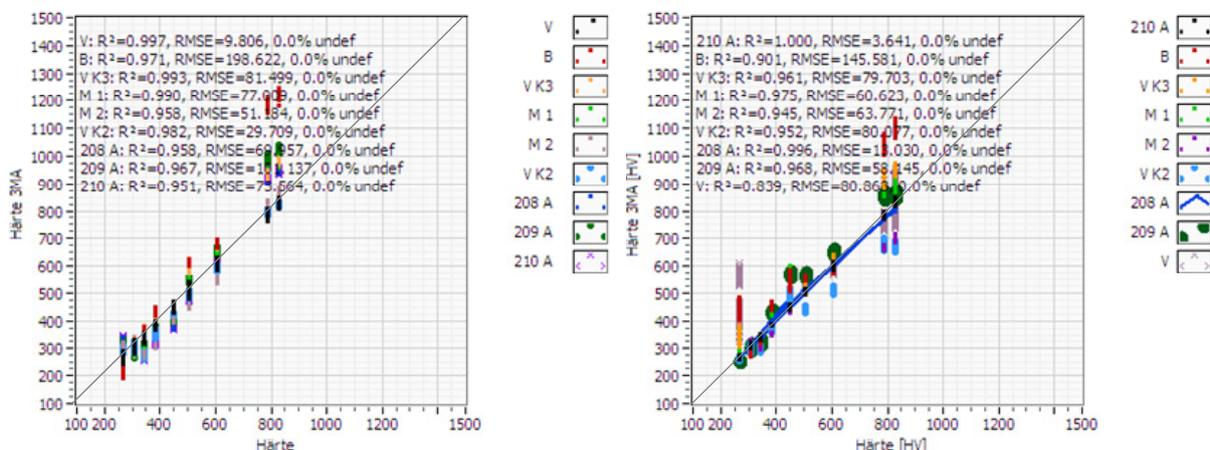


Abb. 62: Ergebnisse bei Anwendung eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen erstellt mit Sensor V (links) und eines äquivalenten Kalibrierpolynoms erstellt mit Sensor 210 A (rechts)

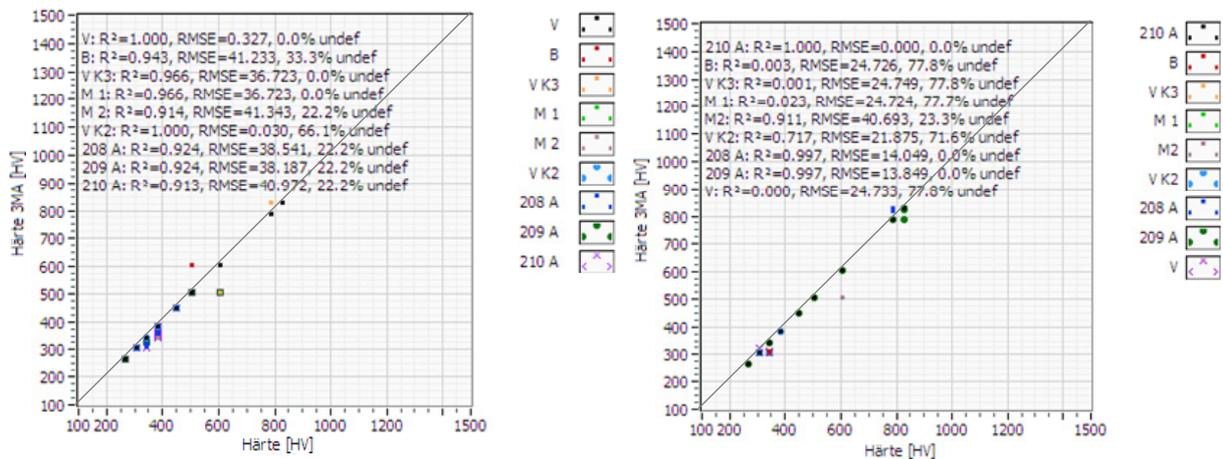


Abb. 63: Ergebnisse bei Anwendung einer Mustererkennung, deren Kalibrierdaten mit dem Sensor V (links) beziehungsweise dem Sensor 210 A (rechts) aufgenommen wurden

Gegenüber dem in Abb. 23 dargestellten Ausgangspunkt zeigen Abb. 62 und Abb. 63 (links) eine deutliche Verbesserung des Kalibrierergebnisses bei Anwendung auf mehrere Sensoren. Die Ausgangssituation für das in Abb. 63 (rechts) dargestellte Ergebnis entspricht der Ausgangssituation für den linken Teil der Abbildung. Auch hier werden ohne Anpassung lediglich die Daten des Sensors, mit dem die Kalibrierdatenbank erstellt wurde, erkannt. Alle Daten der anderen Sensoren liefern kein Ergebnis, so dass für alle nicht an der Kalibrierdatenbank beteiligten „100% undef“ ermittelt wird. Jedoch ist die durch die Differenzgrößenbildung eingetretene Verbesserung nicht für alle Sensoren ausreichend für den Einsatz in der Praxis. So können bei einer Mustererkennung zur Kalibrierung mit Sensor V trotz der Verwendung von Differenzprüfgrößen bei einigen Sensoren (B, M 2, V K2, 208 A, 209 A und 210 A) nicht alle Kalibrierproben erkannt beziehungsweise eincharakterisiert werden, was in Abb. 63 durch die prozentuale Angabe der für die Mustererkennung undefinierbaren Messungen der entsprechenden Messreihe deutlich wird. Für die Sensoren mit der bereits erwähnten neueren Hallsonde untereinander ist die Anwendung der Differenzprüfgrößen hingegen vielversprechend. Denn für den Fall, dass eine Mustererkennung mit Differenzprüfgrößen mit einem dieser Sensoren angefertigt wurde, lassen sich die Sensoren so mit der neueren Hallsonde untereinander vollständig mit einem akzeptablen Fehlerband austauschen (siehe Abb. 63 (rechts) für 208 A und 209 A). Auch für die Verwendung eines aus Differenzprüfgrößen resultierenden Polynoms zur Härtebestimmung wird keine ausreichende Genauigkeit der Kalibrierung bei Anwendung auf mehrere Sensoren erreicht, wenn ein Sensor mit der älteren Hallsonde zur Kalibrierpolynombildung verwendet wurde (siehe Abb. 62 (links)). Für die Sensoren mit der neueren Elektronik-Komponente stellen sich zur Mustererkennung äquivalente Verhältnisse für diese Sensoren untereinander ein (siehe Abb. 62 (rechts) für 208 A und 209 A).

Die Anwendung von Differenzprüfgrößen zur Anpassung zweier Prüfgeräte (1, 2) ist exemplarisch in Abb. 64 dargestellt.

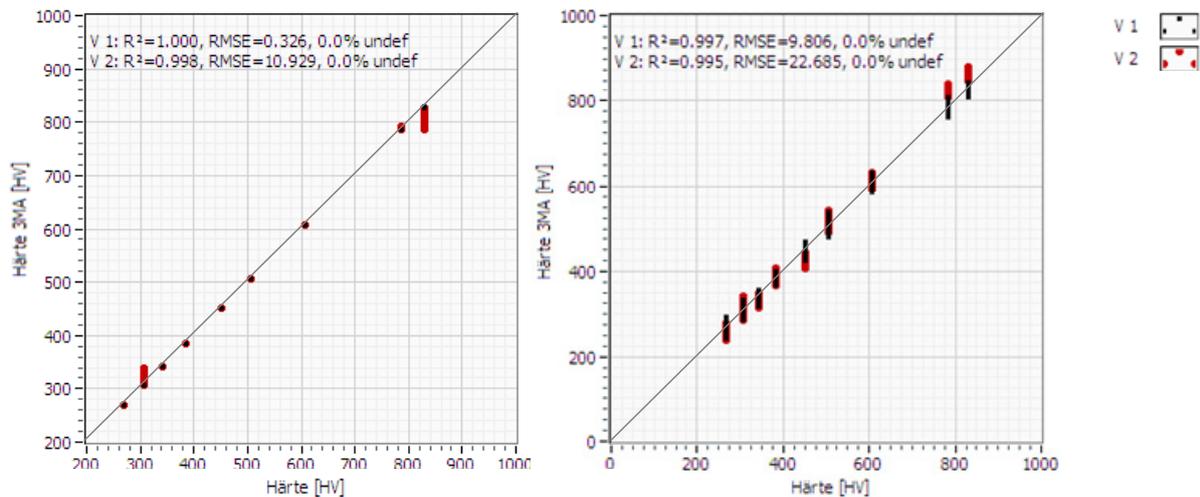


Abb. 64: Ergebnisse bei Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen (rechts), deren Kalibrierdaten mit dem Prüfgerät 1 und Sensor V aufgenommen wurden

Bei dem Vergleich von Abb. 64 und Abb. 24 wird deutlich, dass die Verwendung von Differenzprüfgrößen zu einer deutlichen Verbesserung der Übertragbarkeit einer Kalibrierung auf ein zweites Prüfgerät führt. Die in Abb. 24 (links) dargestellten Kalibrierergebnisse zweier Prüfgeräte bei Verwendung einer Mustererkennung ohne Differenzprüfgrößen zeigt, dass ohne den Einsatz von Differenzprüfgrößen alle Messungen des zweiten Prüfgerätes bei Anwendung auf die Kalibrierung des ersten Prüfgerätes kein Ergebnis liefern. Durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen lassen sich die Daten beider Prüfgeräte vollständig und mit einer ausreichenden Genauigkeit durch eine Mustererkennung eincharakterisieren (siehe Abb. 64 links). Gleiches gilt für die Verwendung eines Polynoms zur Kalibrierung. Auch hier wird durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen eine Anwendung der Kalibrierung auf die Messungen beider Prüfgeräte mit einer ausreichenden Genauigkeit möglich (siehe Abb. 64 rechts).

Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten

Bei der Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten zeigt die Verwendung von Differenzprüfgrößen das in Abb. 65 und Abb. 66 dargestellte Verhalten für vier Sensoren. Die Differenzprüfgrößen wurden durch Subtraktion der an einer Kalibrierprobe der Gruppe 1 (Restaustenitgehalt 47,1 %) unter Kalibrierbedingungen gemessenen Prüfgrößenwerte von den korrespondierenden Prüfgrößenwerten der restlichen Kalibrierproben gebildet.

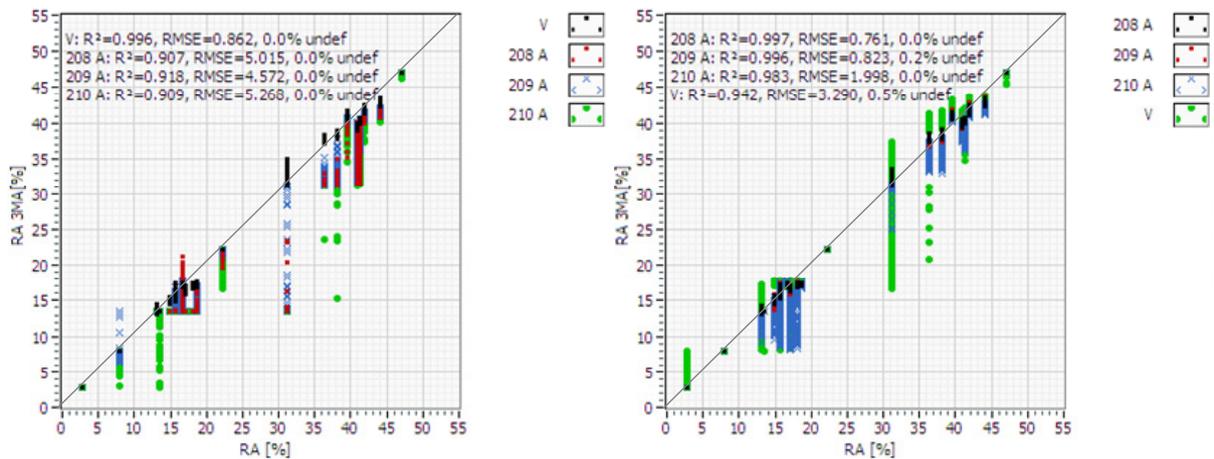


Abb. 65: Kalibrierergebnisse unter Verwendung von Differenzprüfgrößen in der Datenbank einer Mustererkennung für den Sensor V (links) und den Sensor 208 A (rechts)

Wie bei der vorherigen Anwendung an den Härtevergleichsplatten wird auch bei dieser Kalibrierung deutlich, dass sich durch die Differenzprüfgrößen zwar eine Verbesserung gegenüber den Kalibrierergebnissen ohne Verwendung von Differenzprüfgrößen einstellt (siehe Abb. 26 und Abb. 27), jedoch wird dadurch keine ausreichende Genauigkeit der Kalibrierergebnisse für mehrere Sensoren erzielt, wenn ein Sensor ohne die neuere Hallsonde zur Kalibrierdatenaufnahme verwendet wird. Dies zeigt sich in Abb. 65 für eine Mustererkennungskalibrierung und in Abb. 66 für die Verwendung einer Regressionsanalyse zur Kalibrierpolynomermittlung. In Abb. 65 und in Abb. 66 jeweils rechts ist jedoch für die Sensoren 208 A, 209 A und 210 A untereinander ein deutlich besseres Ergebnis zu erkennen. Wenn ein Sensor neuen Baudatums (also mit neuerer Hallsonde; als Beispiel Sensor 208 A in Abb. 65 und Abb. 66 jeweils rechts) zur Kalibrierung verwendet wird, sind die RMSE-Werte für die anderen Sensoren mit neuerer Hallsonde (209 A und 210 A) deutlich geringer als bei Verwendung eines Sensors ohne neuerer Hallsonde (Sensor V in Abb. 65 und Abb. 66 jeweils links), so dass in dieser Anwendung für diese Sensoren eine Austauschbarkeit bei der Verwendung von Differenzprüfgrößen möglich ist.

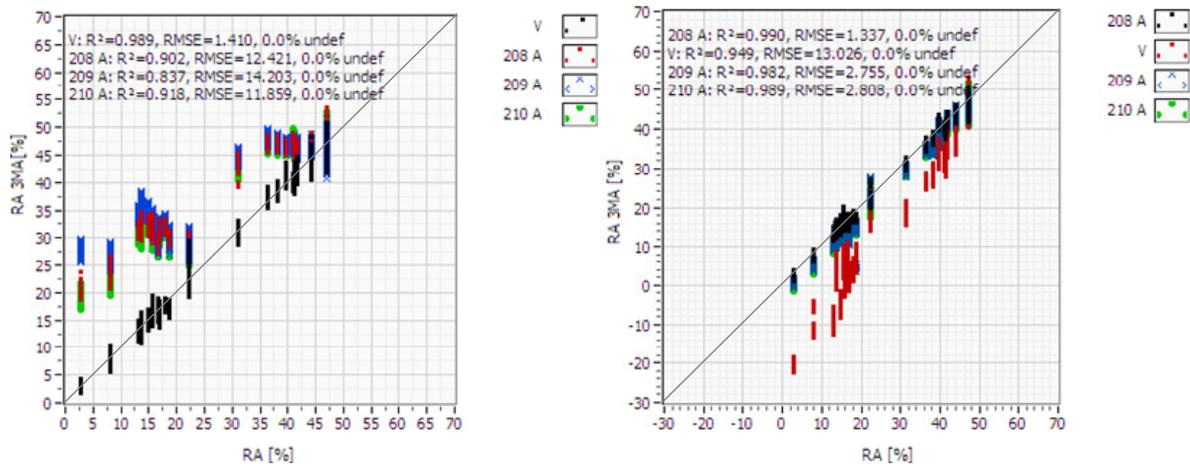


Abb. 66: Ergebnisse bei Anwendung eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen erstellt mit Sensor V (links) und mit Sensor 208 A (rechts)

Eine weitere Option zur Differenzprüfgrößenbildung ist die Verwendung einer Standardprobe zur Aufnahme der Prüfgrößenwerte zur Differenzbildung. In Abb. 67 und Abb. 68 sind die Kalibrierergebnisse bei der Verwendung einer aus **Anwendung 1** bekannten Härtevergleichsplatte (Nr. 2; 307 HV) zur Differenzdatenbildung dargestellt. Die Datenaufnahme an der Härtevergleichsplatte erfolgte unter den in **Anwendung 1** beschriebenen Bedingungen. Es wurde also eine an die Härtevergleichsplatten angepasste Einstellung des 3MA-Prüfsystems (Magnetisierungsfrequenz: 100 Hz; Magnetfeldaussteuerung 35 A/cm) verwendet, die nicht identisch mit den Einstellungen für die Datenaufnahme an den Common-Rail-Injektor-Ankerplatten (Magnetisierungsfrequenz: 250 Hz; Magnetfeldaussteuerung 60 A/cm) ist. Die beiden Ergebnisdarstellungen unterscheiden sich äquivalent zu Abb. 65 in dem Sensor, der zur Kalibrierdatenbankaufnahme verwendet wurde.

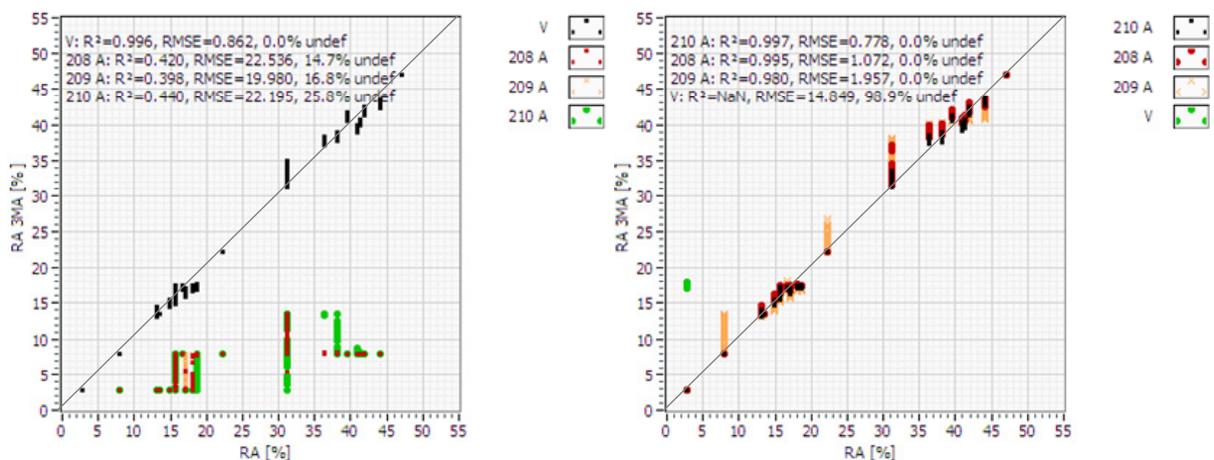


Abb. 67: Kalibrierergebnis unter Verwendung von Differenzprüfgrößen herrührend aus einer Messung an einer Härtevergleichsplatte in der Datenbank einer Mustererkennung für den Sensor V (links) und den Sensor 208 A (rechts)

Für die Verwendung einer Mustererkennung und des Sensors V stellen sich für die drei Sensoren mit neuerer Hallsonde deutlich schlechtere Ergebnisse ein, sowohl was den prozen-

tualen Anteil der undefinierten Messungen als auch die Güte der Kalibrierung selbst angeht. Im umgekehrten Fall sind die aus dem Kalibrierergebnis resultierenden RMSE-Werte für die Sensoren mit neuerer Hallsonde in äquivalenten Bereichen, wie es in Abb. 65 (rechts) der Fall war, in der eine Kalibrierprobe zur Differenzprüfgrößenbildung verwendet wurde. Für den Sensor V, der keine neuere Hallsonde eingebaut hat, sieht das Ergebnis aber entschieden schlechter aus. Denn zuvor wurden in Abb. 65 (rechts) zumindest 99,5 % der gesamten Messungen erkannt und konnten, wenn auch nicht mit der ausreichenden Güte, bezüglich des Restaustenitgehalts eincharakterisiert werden. Bei der Verwendung einer Standardprobe zur Differenzbildung werden nun nur noch 1,1 % der Messungen erkannt, so dass 98,9 % der Messungen undefiniert bleiben.

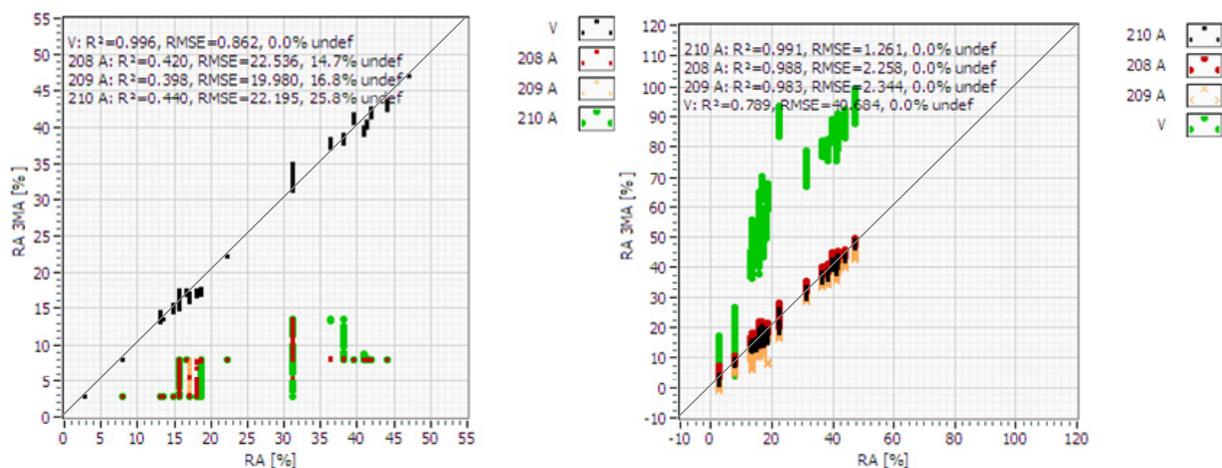


Abb. 68: Ergebnisse bei Anwendung eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen gebildet mit dem Sensor V (links) und dem Sensor 210 A (rechts) unter Verwendung von Differenzprüfgrößen herrührend aus einer Messung an einer Härtevergleichsplatte

Bei der Verwendung einer Regressionsanalyse zur Kalibrierung stellen sich auch bei der Verwendung einer Standardprobe (in diesem Fall einer Härtevergleichsplatte) zur Differenzprüfgrößenbildung ein äquivalentes Verhalten der Kalibrierungen gegenüber der Verwendung einer Kalibrierprobe zur Differenzprüfgrößenbildung bei Anwendung auf andere Sensoren ein.

Für die zuvor unter 4.2 Anpassung durch Verwendung von Differenz-Prüfgrößen erwähnte Option, die Differenzdatenbildung mit einer Standardprobe unter den der Kalibrierdatenaufnahme entsprechenden Einstellungen des 3MA-Prüfsystems, zeigen sich unabhängig von der Kalibriermethode schlechtere Ergebnisse, als die bereits vorgestellten. So führt dies bei einer Mustererkennung dazu, dass lediglich noch die Messungen des zur Kalibrierung verwendeten Sensors erkannt werden. Alle auf diese Kalibrierung angewandten Messungen der anderen Sensoren sind zu 100 % undefiniert. Dieses Ergebnis stellt sich unabhängig vom zur Kalibrierdatenaufnahme verwendeten Sensor ein. Für die Regressionsanalyse stellen sich in diesem Anwendungsszenario größere Fehler beziehungsweise eine schlechtere Güte

der Kalibrierung bei Anwendung auf andere Sensoren ein. Dies lässt sich auf das nicht an die Standardprobe angepasste 3MA-Prüfsystem zurückführen. Denn dadurch können verfälschte Prüfgrößenwerte entstehen, deren Verhalten nichts mit der realen Sensorcharakteristik zu tun haben, und somit kann keine Angleichung der Sensoren erreicht werden. Weil die Geometrie, das Material und die Herstellung der Kalibrierproben sowie der Standardprobe unterschiedlich sind, kann es zu über- und/oder untersteuerten Prüfverfahren (zum Beispiel Magnetfeldstärke zu weit oder zu gering angesteuert) und somit zu verfälschten Prüfgrößen führen.

In Abb. 69 sind die Kalibrierergebnisse für zwei Prüfgeräte (1, 2) bei Verwendung von Differenzprüfgrößen dargestellt, die mit Hilfe einer Kalibrierprobe generiert wurden.

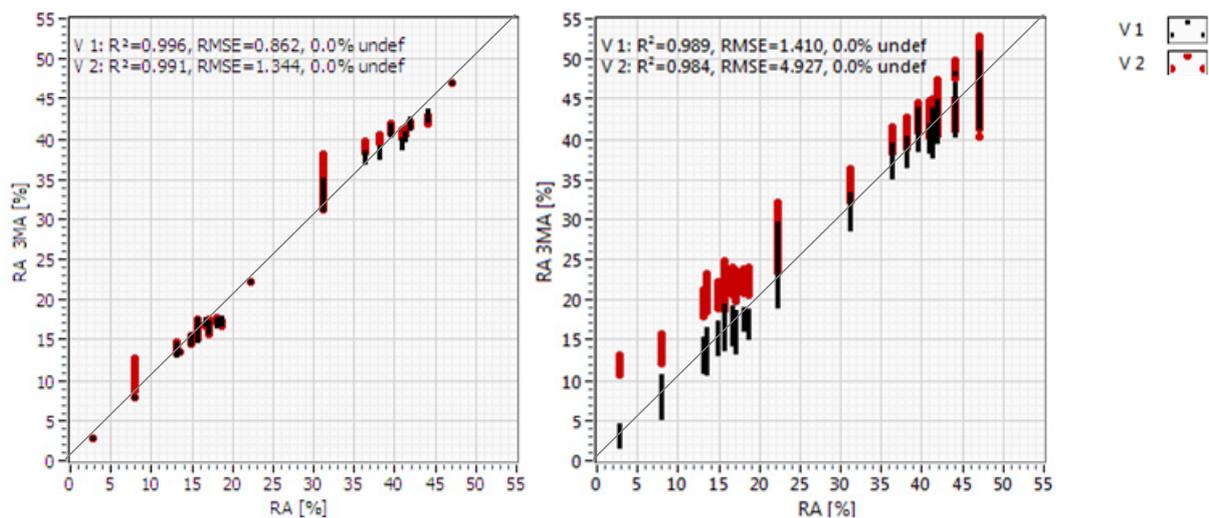


Abb. 69: Ergebnisse bei Anwendung einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen (rechts), deren Kalibrierdaten mit dem Prüfgerät 1 und Sensor V aufgenommen wurden

Abb. 69 verdeutlicht, dass durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen zur Kalibrierung keine Verschlechterung sondern eine Verbesserung der Anpassung einer Kalibrierung auf ein zweites Prüfgerät führt (vergleiche Abb. 69 mit Abb. 28). Denn auch ohne die Verwendung von Differenzprüfgrößen werden in dieser Anwendung beispielsweise bei einer Kalibrierung mittels Mustererkennung alle Messungen des zweiten Prüfgerätes erkannt, jedoch wird durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen ein geringerer RMSE-Wert für die Daten des zweiten Prüfgerätes erzielt (vergleiche Abb. 69 links mit Abb. 28 links).

Anwendung 3: Oberflächenhärtebestimmung an zylindrischen Proben

In dieser Anwendung wurden zwei der in Abb. 16 dargestellten 3MA-Sensoren zur Prüfung von zylindrischen Proben verwendet. Da es sich hier um Spezial-Sensoren handelt, die ausschließlich für den Einsatz an Zylinderproben gefertigt wurden, wurden bei dieser Anwendung keine Daten an Standardproben aufgenommen. Es wurden lediglich unter Kalibrierbedingungen an der Kalibrierprobe Nr. 1 (21,8 HRC) Messungen zur Differenzprüfgrößenbil-

dung mit beiden Sensoren aufgenommen. In der folgenden Abbildung ist das Kalibrierergebnis bei der Verwendung von Differenzprüfgrößen für eine Mustererkennung und Regressionsanalyse, die ein Polynom mit maximal quadratischen Termen ermittelt hat, dargestellt.

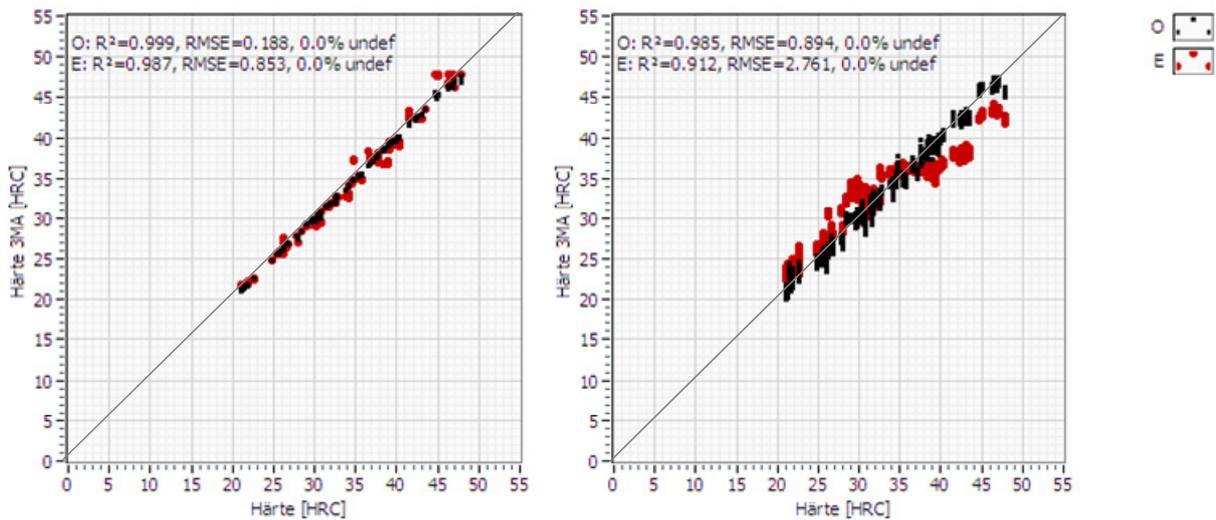


Abb. 70: Kalibrierergebnis unter Verwendung von Differenzprüfgrößen für eine Mustererkennung (links) und für eine Regressionsanalyse (rechts)

Da die beiden Sensoren baugleich und mit der gleichen, neueren Hallsonde ausgestattet sind, ist ihr Verhalten bei der Verwendung von Differenzprüfgrößen ähnlich dem Verhalten der Sensoren 208 A, 209 A und 210 A in den vorherigen Anwendungen. Sie lassen sich durch Verwendung von Differenzprüfgrößen deutlich in ihrem Kalibrierverhalten angleichen (vergleiche Abb. 29).

Anwendung 4: Restaustenitgehaltbestimmung an Vierkantproben

Auch bei dieser Anwendung zeigt sich durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen eine Verbesserung des Kalibrierergebnisses sowohl für eine Regressionsanalyse also auch für eine Mustererkennung als Kalibriermethode. Zur Differenzdatenbildung wurde an der Kalibrierprobe 6.1 (Restaustenitgehalt 7,9 %) unter Kalibrierbedingungen eine Messung mit jedem zur Verfügung stehenden Sensor aufgenommen und von den restlichen Messungen am Kalibrierprobensatz subtrahiert. In Abb. 71 und Abb. 72 sind die aus den Differenzprüfgrößen ermittelten Kalibrierergebnisse dargestellt. Es ist jeweils ein Sensor mit und ohne neuere Hallsonde zur Polynombildung durch Regressionsanalyse beziehungsweise in der Kalibrierdatenbank der verwendeten Mustererkennung verwendet worden. Dadurch wird auch in dieser Anwendung deutlich, dass die Sensoren mit der neueren Hallsonde (208 A, 209 A und 210 A) untereinander homogeneres Verhalten aufweisen als die Sensoren mit der älteren Hallsonde (V und V K2) untereinander und im Mix mit den Sensoren, die mit der neueren Hallsonde ausgestattet sind. Trotzdem ist für jeden Sensor das Kalibrierergebnis gegenüber dem Kalibrierergebnis ohne Verwendung von Differenzprüfgrößen verbessert und für die Sensoren 208 A bis 210 A ausreichend genau (siehe Abb. 31).

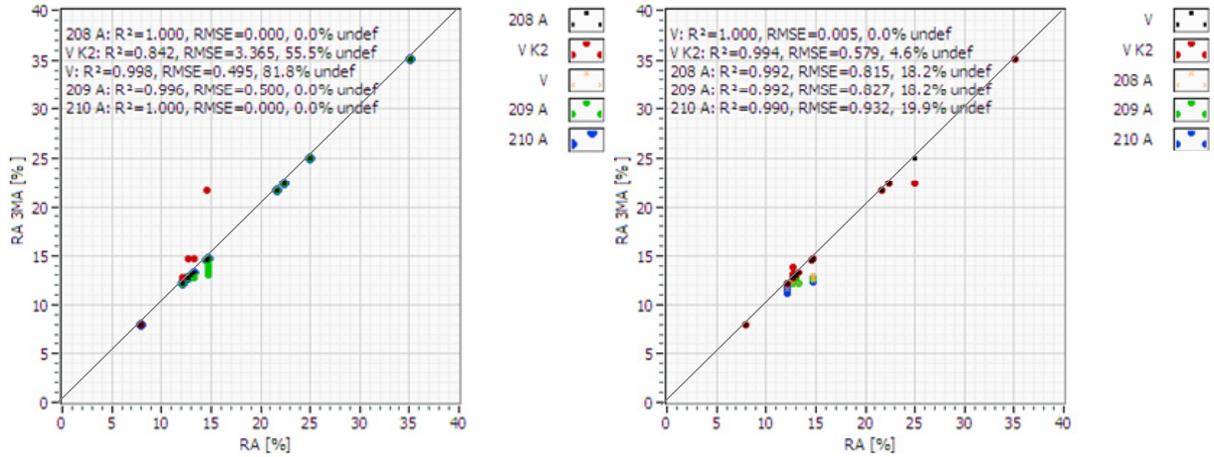


Abb. 71: Kalibrierergebnisse von Mustererkennungen unter Verwendung von Differenzprüfgrößen für den Sensor 208 A (links) und den Sensor V (rechts)

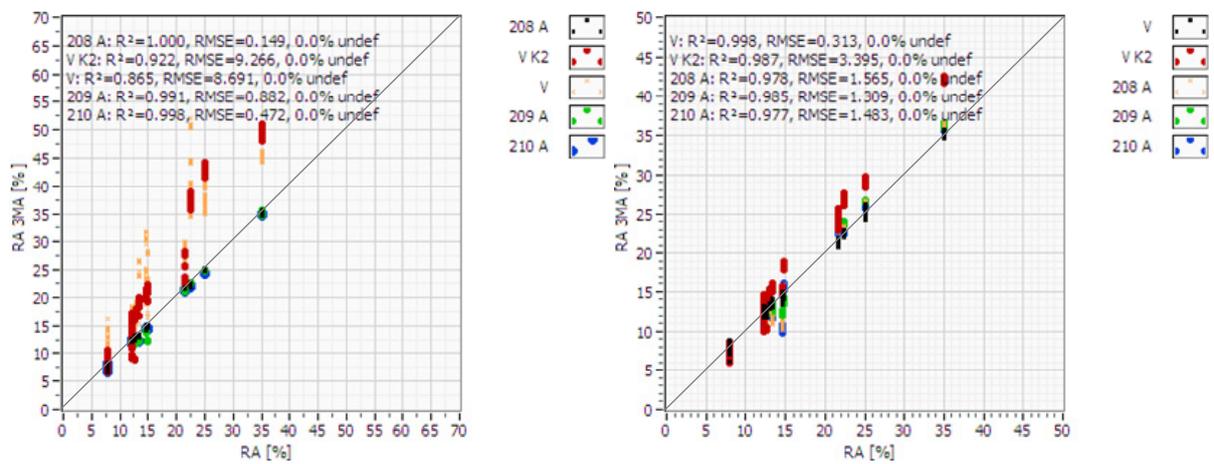


Abb. 72: Kalibrierergebnisse für Regressionspolynome unter Verwendung von Differenzprüfgrößen für den Sensor 208 A (links) und den Sensor V (rechts)

Auch in dieser Anwendung liefert die Verwendung von Differenzprüfgrößen bei der Übertragung einer Kalibrierung auf ein zweites Prüfgerät gute Ergebnisse (siehe Abb. 73).

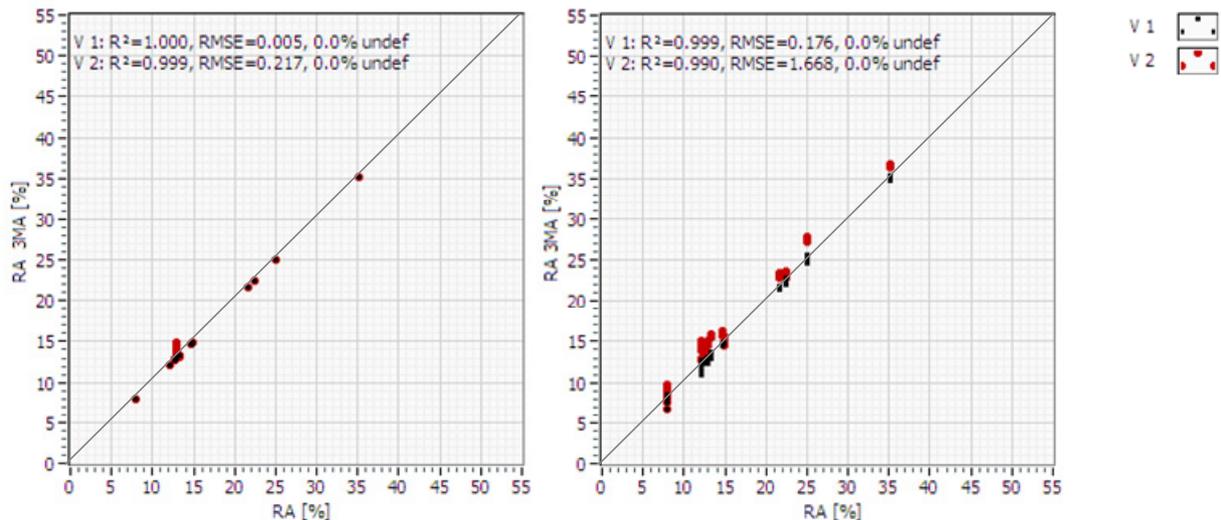


Abb. 73: Ergebnisse einer Mustererkennung (links) und eines Kalibrierpolynoms mit maximal quadratischen Termen (rechts), deren Kalibrierdaten mit dem Prüfgerät 1 und Sensor V aufgenommen wurden

Auch in diesem Fall werden bei einer Mustererkennung als Kalibriermethode alle Messungen des zweiten Gerätes mit einer ausreichenden Genauigkeit eincharakterisiert (siehe Abb. 73 links). Dies war ohne Verwendung von Differenzprüfgrößen zur Kalibrierung nicht der Fall. Ohne Differenzprüfgrößen wurden alle Messungen des zweiten Prüfgerätes nicht erkannt und lieferten somit „100 % undef“ (siehe Abb. 32 links). Für die Verwendung einer Regressionsanalyse als Kalibriermethode stellen sich ebenfalls Verbesserungen durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen ein. So fällt der RMSE-Wert von 6,333 % auf 1,668 % durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen zur Kalibrierung (vergleiche Abb. 32 rechts und Abb. 73 rechts).

Anwendung 5: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerbolzen

Hier wurde zur Bildung der Differenzprüfgrößen die erste Probe aus der Gruppe 1 (Tiefkühlung bei -196 °C und Restaustenitgehalt von 2,6 %) verwendet. Die Ergebnisse, die sich durch die Verwendung der Differenzprüfgrößen für unterschiedliche Kalibrierungen mittels Regressionsanalyse bei einem Geräte austausch einstellen, sind in Abb. 74 und für die Verwendung einer Mustererkennung als Kalibriermethode in Abb. 75 dargestellt.

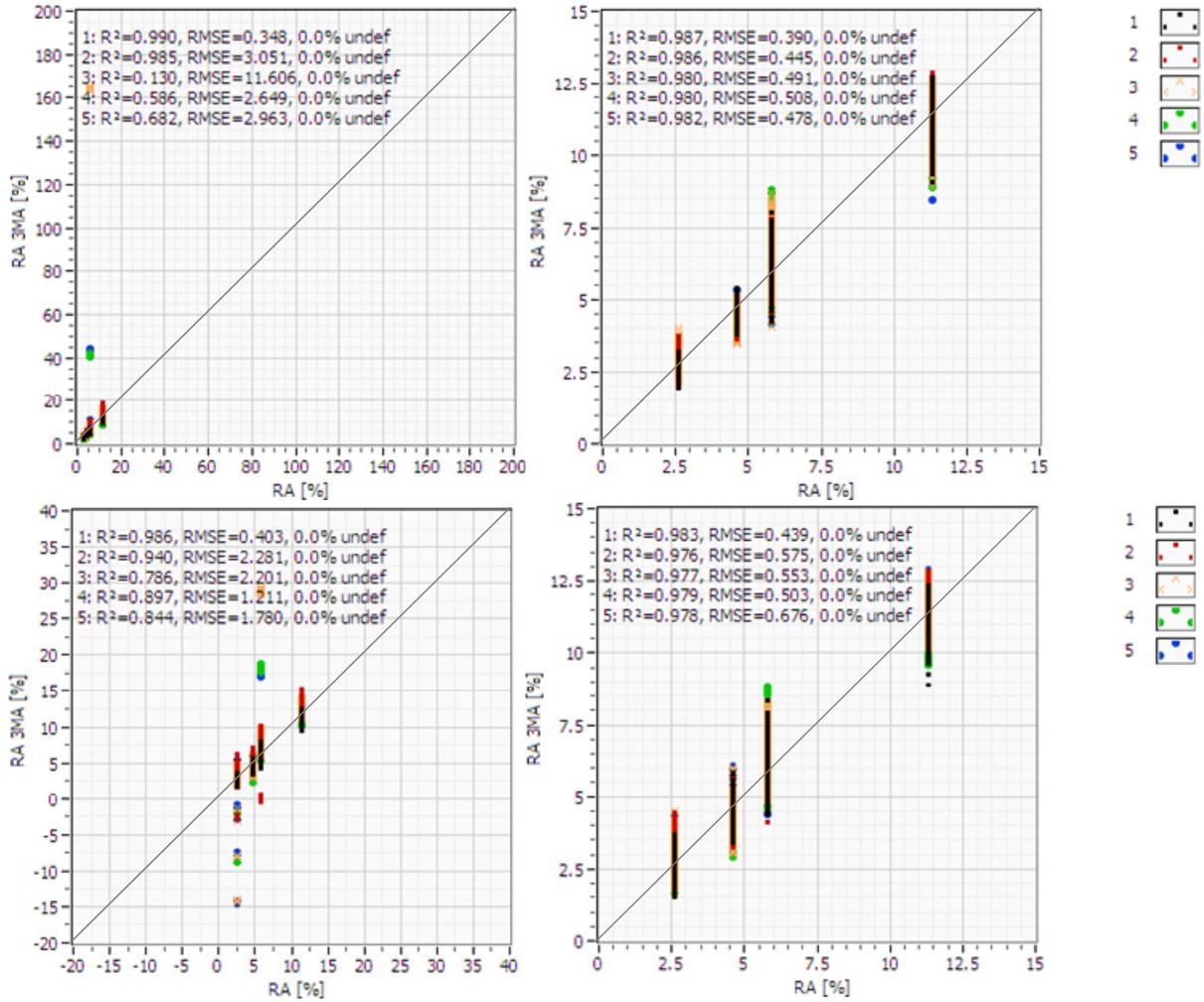


Abb. 74: Links oben: Polynom mit maximal quadratischen Termen aus allen vier Prüfverfahren; rechts oben: Polynom mit maximal quadratischen Termen ohne Verwendung der Daten aus der Wirbelstromimpedanzanalyse, links unten Polynom mit maximal linearen Termen aus allen vier Prüfverfahren; rechts unten: Polynom mit maximal linearen Termen ohne Verwendung der Daten aus der Wirbelstromimpedanzanalyse

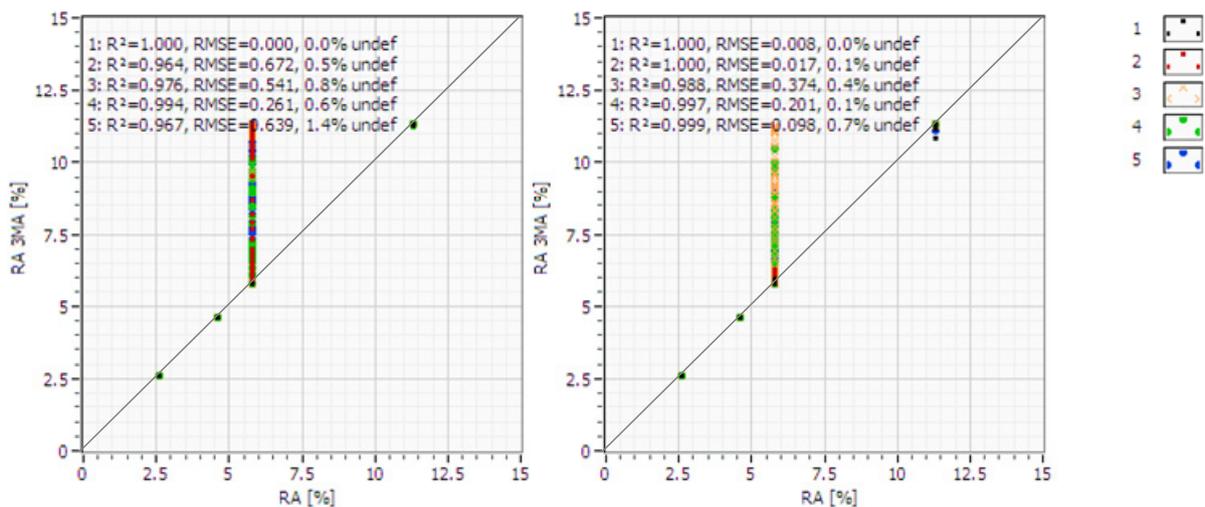


Abb. 75: Links: Kalibrierergebnis bei Verwendung einer Mustererkennung mit allen vier 3MA-Prüfverfahren; rechts: Kalibrierergebnis bei Verwendung einer Mustererkennung ohne Beteiligung der Wirbelstromimpedanzanalyse an der Kalibrierung

Im Vergleich mit Abb. 35 und Abb. 36 wird deutlich, dass durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen eine Verbesserung der Übertragbarkeit einer Kalibrierung auf andere Prüfgeräte erreicht werden kann. Bei Verwendung einer Mustererkennung mit Differenzprüfgrößen zur Kalibrierung findet unabhängig von der Anzahl der Prüfverfahren eine fast vollständige Eincharakterisierung aller Messdaten statt. Lediglich maximal 1,4 % aller Messungen für vier und maximal 0,7 % aller Messungen für drei an der Kalibrierung beteiligte Prüfverfahren können nicht eincharakterisiert werden. Im Gegensatz dazu konnte die Mustererkennung ohne Differenzprüfgrößen mit vier an der Kalibrierung beteiligte Prüfverfahren 100 % der Messdaten von Prüfgeräten, die nicht an der Kalibrierung beteiligt waren, nicht eincharakterisieren. Für Kalibrierungen, die mit Hilfe eines Regressionspolynoms generiert wurden, stellt sich ebenfalls durch die Verwendung von Differenzprüfgrößen eine Verbesserung bei der Anwendung der Prüfaufgabe an mehreren Prüfgeräten ein. Hier wird wie bereits in Abb. 35 deutlich, dass ohne Verwendung der Prüfgrößen aus der Wirbelstromimpedanzanalyse eine Übertragung der Kalibrierung geringere Fehlerwerte bezüglich der Zielgrößenwerte zeigt.

5.2 Anpassung mittels polynomialer Approximation

Bei der Anwendung einer polynomialen Approximation zur Anpassung der Prüfgrößenräume der anzulegenden Sensoren ist vorab eine Auswahl der zur Anpassung verwendeten Proben notwendig. Hierfür sind in 4.3 *Anpassung durch polynomiale Approximation* zwei Optionen erläutert worden. Für alle betrachteten Anwendungen sind beide Auswahloptionen angewandt worden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Anpassung durch polynomiale Approximation des Prüfgrößenraums für die betrachteten Anwendungen vorgestellt.

Anwendung 1: Oberflächenhärtebestimmung an Härtevergleichsplatten

In dieser Anwendung ist mit neun Härtevergleichsplatten die Anzahl der Kalibrierproben recht gering. Dies führt dazu, dass für diese Anwendung lediglich die minimale Anzahl der zur Anpassung zweier Prüfsystemkomponenten durch polynomiale Approximation notwendigen Kalibrierproben analysiert werden kann. Wenn mehr als die drei minimal benötigten Proben zur Anpassung verwendet werden würden, käme dies einer nicht gewollten Datenaufnahme mit der anzupassenden Prüfsystemkomponente an allen Kalibrierproben nahe. Aus diesem Grund wurden hier nur drei Proben über die beiden in Kapitel 4.3 beschriebenen Arten zur Anpassung ausgewählt.

Für die beiden hier exemplarisch betrachteten Sensoren V und 209 A wurden ausgehend vom Zielgrößenbereich die Proben mit den Nummern 1, 6 und 9 ausgewählt. Diese drei Proben decken mit den Härtewerten 268 HV, 505 HV und 820 HV den Zielgrößenbereich ab. Ausgehend vom Prüfgrößenraum wurden für den Sensor V und Sensor 209 A die Proben 1 (286 HV), 7 (606 HV) und 8 (785 HV) von dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Softwaremodul ermittelt. Die beiden Sensoren V und 209 A stellen bei dieser Betrachtung die Sensoren dar, die entweder ausgetauscht oder deren Prüfaufgabe parallelisiert beziehungsweise auf andere Sensoren dupliziert oder übertragen werden.

Mit den anzupassenden Prüfsystemkomponenten wurden an den ausgewählten Proben zur Kalibrierdatenaufnahme äquivalente Messdaten akquiriert und zur Anpassung verwendet.

In den in Abb. 76 gezeigten Diagrammen wird das Verhalten des RMSE-Wertes für die Anwendung der Originalsensordaten auf die mit unterschiedlichen Polynomgraden angepassten Kalibrierungen dargestellt. Bei den dargestellten Kalibrierungen wurden aus den angepassten Kalibrierdaten mit Hilfe von Regressionsanalysen Kalibrierpolynome mit maximal quadratischen Termen gebildet, die eine Härtebestimmung an Härtevergleichsplatten umsetzen sollen. Die Anwendung der Originalsensordaten entspricht der Verwendung von Fremddaten bezüglich der Kalibrierung, da alle in der Kalibrierung verwendeten Daten durch polynomiale Approximation gewonnen wurden und somit die Originalsensordaten in der Kalibrie-

rung nicht vorhanden sind. Die Darstellung wurde sowohl für die Probenauswahl ausgehend vom Zielgrößenbereich (ZG-Proben) als auch vom Prüfgrößenbereich (PG-Proben) vorgenommen. Zusätzlich ist in den Diagrammen der RMSE-Wert für die Anwendung der Originalsensordaten auf die jeweilige unangepasste Kalibrierung eingezeichnet.

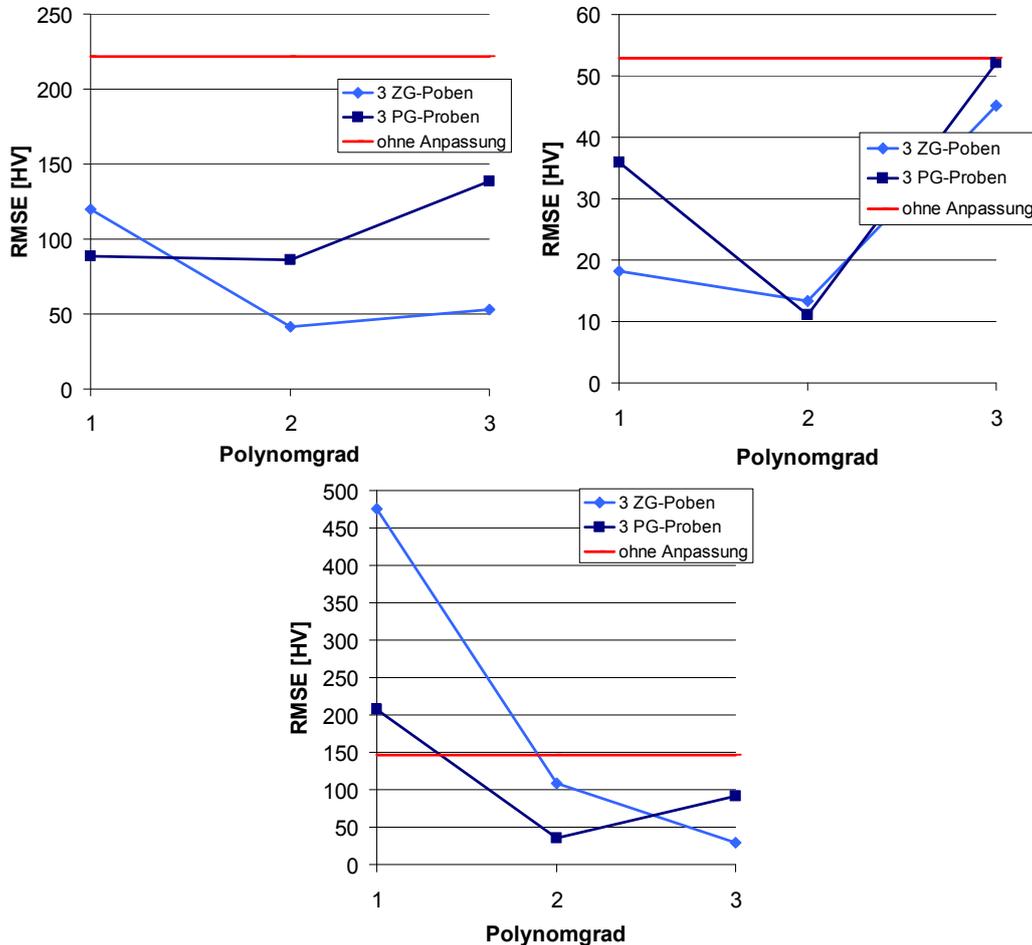


Abb. 76: Fehlerverlauf bei steigendem Polynomgrad für Sensor V angepasst an V K2 (oben links), für 210 A angepasst an 209 A (oben rechts) und für V angepasst an 208 A (unten)

Aus Abb. 76 lässt sich erkennen, dass die Güte der Anpassung durch polynomiale Approximation in dieser Anwendung von der Kombination der zur Anpassung verwendeten Sensoren abhängt. So wird aus dem mittleren Diagramm deutlich, dass für zwei Sensoren der zweiten Generation Polynome ersten und zweiten Grades die besten Anpassungsergebnisse liefern. Vergleichbar verhält es sich bei zwei Sensoren der ersten Generation, wie aus dem linken Diagramm zu erkennen ist. Hier bringt eine Anpassung mittels Polynome ersten und zweiten Grades eine deutliche Verbesserung gegenüber der Anwendung ohne Anpassung. Es zeigt sich auch, dass die Güte der Anpassung schlechter ist, als im mittleren Diagramm. Mischt man allerdings Sensoren aus zwei Generationen, wie dies im rechten Diagramm der Fall ist, stellen sich nicht in jedem Fall für lineare Polynome zur Anpassung ausreichend gute Ergebnisse ein. Erst wenn quadratische Polynome zur Prüfgrößenraumanpassung zum Ein-

satz kommen stellen sich Verbesserungen ein. Die Auswahlmethoden zeigten in dieser Anwendung keine eindeutigen Tendenzen, welche zu bevorzugen ist.

Für alle Anpassungen im Rahmen dieser Anwendung mit anderen Kombinationen oder Umkehrungen der zur Verfügung stehenden Sensoren stellten sich vergleichbare Ergebnisse wie in Abb. 76 ein.

Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten

In dieser Anwendung liegen 21 unterschiedliche Zielgrößengruppen vor. Jede Gruppe besteht hier zwar aus fünf einzelnen Proben, jedoch ist die Zielgröße Restaustenitgehalt (RA) für alle fünf Proben jeder Gruppe gleich. Somit ist die Zielgrößen-Variation zwar größer, trotzdem aber mit der vorherigen Anwendung vergleichbar. Deshalb wurde auch hier lediglich die minimale Anzahl von drei Proben zur polynomialen Approximation verwendet. Die beiden Auswahlmethoden trafen in dieser Anwendung für alle Sensoren die gleiche Wahl. Es wurde jeweils eine Probe aus der Gruppe 1 (47,1 % RA), 11 (22,3 % RA) und 20 (2,8 % RA) entnommen und äquivalent zur Kalibrierdatenaufnahme mit den anzupassenden Sensoren Daten aufgenommen, die zur Anpassung verwendet wurden. In Abb. 77 sind tabellarisch die RMSE-Werte aufgeführt, die sich bei einem Sensortausch sowohl ohne als auch mit einer polynomialen Approximation des Prüfgrößenraums für unterschiedliche Sensorkombinationen an dem Kalibrierprobensatz ergeben. Als Kalibriermethode wurde eine Regressionsanalyse verwendet, die zur Restaustenitgehaltbestimmung jeweils ein Polynom mit maximal quadratischen Termen ermittelt hat. Im Kopf jeder Spalte sind in der ersten Zeile die beiden Bezeichnungen der betrachteten Sensoren angegeben. Hierbei ist zum Beispiel die Angabe „V vs. 209 A“ so zu verstehen, dass der Sensor V durch Sensor 209 A ausgetauscht beziehungsweise die Kalibrierung von V auf 209 A übertragen wird. Darunter ist der RMSE-Wert angegeben, der sich bei dem darüber bezeichneten Sensortausch ohne Anpassung an den Kalibrierproben einstellen würde. Für das Beispiel „V vs. 209 A“ also der RMSE-Wert (182.24 %) der sich bei Anwendung des Kalibrierpolynoms des Sensors V auf die Kalibriermessungen des Sensors 209 A einstellt. Die unter dem Spaltenkopf folgenden RMSE-Werte wurden äquivalent zum Wert im Kopf durch Anwendung eines aus dem zuvor angepassten Prüfgrößenraum gebildeten Kalibrierpolynoms auf die Originaldaten des Sensors 209 A ermittelt. In der untersten Zeile der Tabelle sind die RMSE-Werte angegeben, die vor Austausch mit dem jeweiligen Sensor an den Kalibrierproben erreicht wurden. Für „V vs. 209 A“ ist der RMSE-Wert (1.406 %) der Kalibriermessungen des Sensors V angewandt auf das daraus gebildete Kalibrierpolynom mit maximal quadratischen Termen angegeben (vergleiche Abb. 28 (rechts)). Bei der Approximation des Prüfgrößenraums wurde der Polynomgrad von eins bis drei variiert. Die Sensorkombinationen wurden abhängig davon, ob nur Sensoren der zweiten Generation oder ein Sensor der ersten mit einem der zweiten Generation ausgetauscht wurden, eingefärbt.

| | | V vs. 209 A RMSE [%] (ohne Anpassung) 182.24 | | V vs. 208 A RMSE [%] (ohne Anpassung) 296.547 | | V vs. 210 A RMSE [%] (ohne Anpassung) 310.253 | |
|--------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------|---|--|
| Polynom- grad | RMSE [%] (mit Anpassung) | | RMSE [%] (mit Anpassung) | | RMSE [%] (mit Anpassung) | | |
| | PG-Einschränkung | | PG-Einschränkung | | PG-Einschränkung | | |
| | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | |
| 1 | 4.788 | 2.137 | 2.706 | 2.289 | 3.245 | 3.245 | |
| 2 | 2.263 | 4.085 | 1.668 | 1.668 | 3.335 | 3.335 | |
| 3 | 4.105 | 4.766 | 4.727 | 5.775 | 5.401 | 5.401 | |
| RMSE(V) = 1.406 % | | | | | | | |

1 Sensor der ersten und 1 Sensor der zweiten Generation

2 Sensoren der zweiten Generation

| | | 209 A vs. 208 A RMSE [%] (ohne Anpassung) 14.995 | | 210 A vs. 208 A RMSE [%] (ohne Anpassung) 2.32 | | 210 A vs. 209 A RMSE [%] (ohne Anpassung) 5.028 | |
|------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|--|-----------------------------|---|--|
| Polynom- grad | RMSE [%] (mit Anpassung) | | RMSE [%] (mit Anpassung) | | RMSE [%] (mit Anpassung) | | |
| | PG-Einschränkung | | PG-Einschränkung | | PG-Einschränkung | | |
| | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | |
| 1 | 1.592 | 1.422 | 1.45 | 1.903 | 1.552 | 1.762 | |
| 2 | 1.691 | 1.294 | 1.779 | 2.203 | 1.772 | 1.747 | |
| 3 | 1.824 | 1.825 | 2.593 | 2.585 | 2.163 | 2.163 | |
| RMSE(209 A) = 1.314 % | | | | RMSE(210 A) = 1.141 % | | | |

Abb. 77: RMSE-Werte bei Sensoraustausch

Aus Abb. 77 wird zunächst ersichtlich, dass die RMSE-Werte ohne Anpassung (siehe jeweils im Spaltenkopf) für die Sensoren der zweiten Generation untereinander einen deutlich kleineren Wert annehmen als bei einer Vermischung der Generationen. Dies ist auf den bereits erwähnten Wechsel hin zu einem neuen Hallsondentyp für die Sensoren der zweiten Generation zurückzuführen. Allerdings sind auch die Szenarien praxisnah, in denen die Generationen vermischt werden, denn bei bereits seit geraumer Zeit im Einsatz befindlichen Prüfsystemen können noch keine Sensoren der zweiten Generation verwendet worden sein. Wenn auch diese Systeme mit den Sensoren der zweiten Generation ausgestattet werden sollten, tritt die Vermischung der Generationen auf. Die in Rot gekennzeichneten geringsten Fehlerwerte für die aus den angepassten Kalibrierdaten entwickelten Kalibrierpolynome zeigen, dass für den gelb unterlegten Teil der Tabelle durch ein lineares Polynom zur Prüfgrößenraum-Anpassung die besten Ergebnisse erzeugt werden. Der grüne Teil hat durchschnittlich bei quadratischen Polynomen die kleinsten Fehlerwerte. Alle Fehlerwerte liegen unterhalb derer, die ohne Anpassung erreicht werden (vergleiche Abb. 28). Die Fehlerwerte der angepassten Kalibrierungen liegen für zwei Sensoren der zweiten Generation in etwa im gleichen Bereich wie bei der ursprünglichen Kalibrierung. Bei der Mischung der Sensorgenerationen kann der Fehlerwert um das zwei- bis 2,5-fache steigen.

Bei einer Mustererkennung als Kalibriermethode stellen sich bei einem Sensoraustausch ohne Anpassung abhängig davon, ob es zu einer Mischung der Sensorgenerationen kommt oder nicht, bereits deutliche Unterschiede ein. So werden, wenn Sensoren der ersten und zweiten Generation ausgetauscht werden, ohne Anpassung keine der Messungen des eingewechselten Sensors an den Kalibrierproben von der Datenbank des anderen charakterisiert (100 % undef). Für Sensoren der zweiten Generation untereinander können alle Messungen des eingewechselten Sensors von der ursprünglichen Datenbank mit einem gewissen Fehler eincharakterisiert werden. In Abb. 78 sind exemplarisch zwei die RMSE-Wert-Verläufe über den zur Anpassung verwendeten Polynomgrad aufgetragen. Bei dem linken Verlauf handelt es sich um einen Sensoraustausch zwischen zwei Sensoren der zweiten Generation. Hier konnte in Rot der RMSE-Wert integriert werden, der sich bei dem Sensoraustausch ohne Anpassung an den Kalibrierproben ergibt. Zusätzlich wurde in Grün der Wert eingetragen, der von der ursprünglichen Kalibrierdatenbank an den Kalibriermessungen des ursprünglichen Sensors hervorgerufen wird. In den rechten Verlauf konnte der hierzu äquivalente Wert in Grün aufgenommen werden. Da bei einem Sensortausch unter Mischung der Sensorgenerationen keine Messungen des eingetauschten Sensors erkannt werden, kann kein entsprechender Wert in das Diagramm integriert werden.

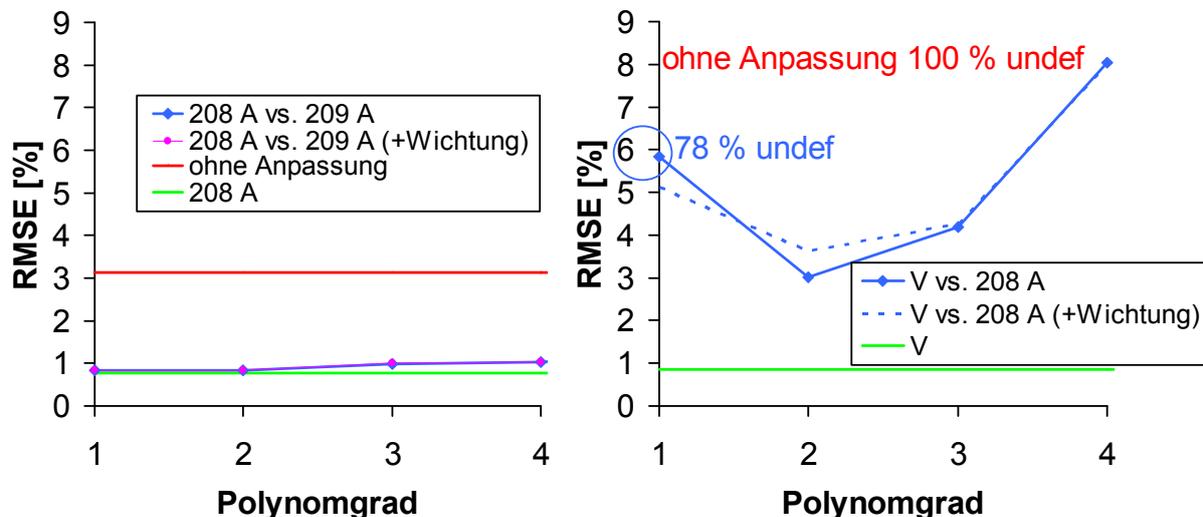


Abb. 78: RMSE-Werte bei Sensoraustausch und Verwendung einer Mustererkennung für zwei Sensoraustauschkombinationen

Abb. 78 (links) zeigt, dass für zwei Sensoren der zweiten Generation bei Austausch und Anpassung des Prüfgrößenraumes durch polynomiale Approximation ein RMSE-Wert erreicht wird, der im Bereich des Wertes der ursprünglichen Kalibrierung liegt. Werden Sensoren wie im rechten Teil der Abbildung aus den zwei Sensorgenerationen ausgetauscht, so wird der ursprüngliche RMSE-Wert der unangepassten Kalibrierdatenbank nicht erreicht. Er kann, wie im rechten Teil exemplarisch zu erkennen, ein Vielfaches des ursprünglichen Wertes annehmen. Das im rechten Teil der Abbildung dargestellte Beispiel für einen Sensortausch weist zusätzlich bei der Verwendung von linearen Polynomen zur Approximation noch 78 %

der Messungen mit dem eingetauschten Sensor (208 A) als undefiniert aus. Dies war jedoch nicht für alle Sensoren der zweiten Generation der Fall. Durch die in Kapitel 4.3.3 *Polynomiale Approximation zur Prüfgrößenraumanpassung* beschriebene Wichtung der Prüfgrößen lassen sich die undefinierten Messungen vermeiden ohne das Ergebnis stark zu verschlechtern. Die Wichtung verursacht, falls keine Mischung der Generationen vorliegt, keine Verschlechterung des Ergebnisses (siehe Abb. 78 (links)).

Für alle Anpassungen im Rahmen dieser Anwendung mit anderen Kombinationen oder Umkehrungen der zur Verfügung stehenden Sensoren stellten sich vergleichbare Ergebnisse wie in Abb. 77 und Abb. 78 ein.

Für einen Prüfgeräteaustausch sind in Abb. 79 exemplarisch für den Sensor V die RMSE-Werte für unterschiedliche Polynomgrade zur Prüfgrößenraumanpassung beim Austausch des Prüfgerätes 1 durch das Prüfgerät 2 dargestellt. Als Kalibriermethode wurde eine Regressionsanalyse (siehe Abb. 79 links) und eine Mustererkennung (siehe Abb. 79 rechts) verwendet. In den beiden Diagrammen wurden ebenfalls die RMSE-Werte eingefügt, die sich im Urzustand mit Sensor V an Prüfgerät 1 und ohne Anpassung bei dem Prüfgeräteaustausch für die jeweilige Kalibriermethode einstellen.

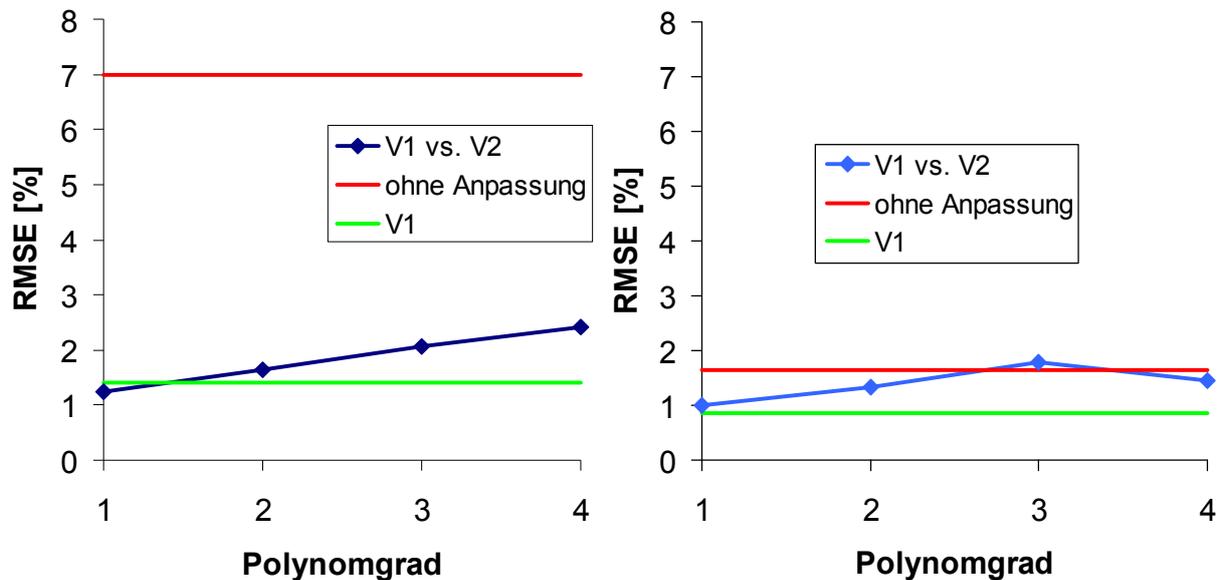


Abb. 79: *RMSE-Werte bei einem Prüfgeräteaustausch für eine Regressionsanalyse (links) und eine Mustererkennung (rechts) als Kalibriermethode*

Aus Abb. 79 wird deutlich, dass durch die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes eine Verbesserung der Kalibrieranpassung unabhängig von der Kalibriermethode bei Prüfgeräteaustausch erreicht wird. Es sollte dabei kein zu hoher Polynomgrad zur Anpassung verwendet werden, da dadurch die Güte der Anpassung abnimmt (siehe Abb. 79). Bei linearen Polynomen zur Anpassung der Prüfgrößenräume stellen sich die besten Ergebnisse bei einem Prüfgeräteaustausch ein. Allerdings kann durch eine derartige Anpassung eine leichte Verschlechterung des RMSE-Wertes der Kalibrierung auftreten (siehe Abb. 79 rechts), die

jedoch immer noch geringer ist als bei einem Prüfgeräteaustausch ohne Anpassung. Für andere Sensoren stellten sich äquivalente Ergebnisse bei einem Prüfgeräteaustausch ein.

Anwendung 3: Oberflächenhärtebestimmung an zylindrischen Proben

Bei dieser Oberflächenhärtebestimmung besteht der Kalibrierprobensatz aus 100 Proben, wobei für jede einzelne Probe der Härtewert in Rockwell bekannt ist. Dies ermöglicht im Gegensatz zu den anderen Anwendungen eine größere Variation der Probenanzahl für die Anpassung. Hier wurden Anpassungen mit drei, sechs, zehn und 20 Kalibrierproben untersucht. Die Auswahl der Proben erfolgte durch die beiden zuvor beschriebenen Auswahlmethoden über den Prüfgrößen- (PG-Proben-Auswahl) und Zielgrößenbereich der Kalibrierproben (ZG-Proben-Auswahl). In der folgenden Tabelle 11 sind die Probenbezeichnungen für die unterschiedlichen Probenanzahlen und Auswahlmethoden aufgelistet.

| Probenanzahl | PG-Proben-Auswahl | ZG-Proben-Auswahl |
|--------------|--|--|
| 3 | 72, 90, 92 | 10, 80, 90 |
| 6 | 2, 6, 72, 89, 90, 92 | 10, 30, 50, 80, 90, 100 |
| 10 | 2, 6, 7, 36, 72, 79, 81, 89, 90, 92 | 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 |
| 20 | 2, 6, 7, 34, 35, 36, 40, 44, 65, 69, 72, 79, 81, 85, 89, 90, 91, 92, 96, 100 | 2, 10, 12, 20, 22, 30, 32, 40, 42, 50, 52, 60, 62, 70, 72, 80, 82, 90, 92, 100 |

Tabelle 11 : Probenauswahl für die unterschiedlichen Probenanzahlen und Auswahlmethoden

Die Mengen wurden ausgehend von der Minimalauswahl bis hin zu 20 % des gesamten Kalibrierprobensatzes variiert. Es wurden nicht noch mehr Proben zur Anpassung verwendet, da für eine praxisnahe Anwendung der prozentuale Anteil der verwendeten Kalibrierproben nicht zu groß werden sollte. An den Kalibrierproben wurden mit beiden zur Verfügung stehenden Spezial-Sensoren Messungen unter Kalibrierbedingungen aufgenommen. Die Messungen an den ausgewählten Proben wurden zur Anpassung verwendet und mit Ihrer Hilfe an den jeweiligen anderen Sensor angepasste Kalibrierungen mit beiden Methoden erstellt. Im Anschluss wurden die Kalibrierungen mit den Messungen des gesamten Kalibrierprobensatzes validiert. Diese sind für die angepassten Kalibrierungen Fremdmessungen, da bei der polynomialen Anpassung alle Daten der anzupassenden Kalibrierung durch Polynome umgeformt werden. Also sind auch die zur Anpassung verwendeten Messdaten nicht in den angepassten Kalibrierdaten enthalten und somit zur Validierung geeignet. Zusätzlich können diese Daten nach der Prüfgrößenraumumformung zur Beurteilung der Anpassungsgüte verwendet werden. Mit Ihrer Hilfe kann entschieden werden, ob der in Kapitel 4.3.3 *Polynomiale Approximation zur Prüfgrößenraumumformung* beschriebene Ausschluss beziehungsweise die Gewichtung von Prüfgrößen, die für zwei Komponenten unkorreliertes Verhalten zeigen, verwendet werden muss.

In Abb. 80 sind die RMSE-Werte, die sich bei Anwendung der Validierdaten (von Sensor E) auf die angepassten Kalibrierungen (des Sensors O) mittels Regressionsanalyse ergeben,

über den zur Anpassung verwendeten Polynomgrad zur Prüfgrößenraumumformung aufgetragen (siehe Abb. 80 links). Für die Kalibrierungen mit den größten Fehlerwerten wurden zusätzliche Kalibrierungen angefertigt. Zu diesen Kalibrierungen wurden nur Prüfgrößen zur Kalibrierpolynombildung durch Regressionsanalyse verwendet, deren Verhalten für zwei Prüfsystemkomponenten ein Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,9 liefert (siehe Abb. 80 rechts). Für alle Kalibrierungen wurden Kalibrierpolynome mit maximal quadratischen Termen ermittelt. Zusätzlich ist in jedem Graph der RMSE-Wert angegeben, der sich ohne eine Anpassung ergibt.

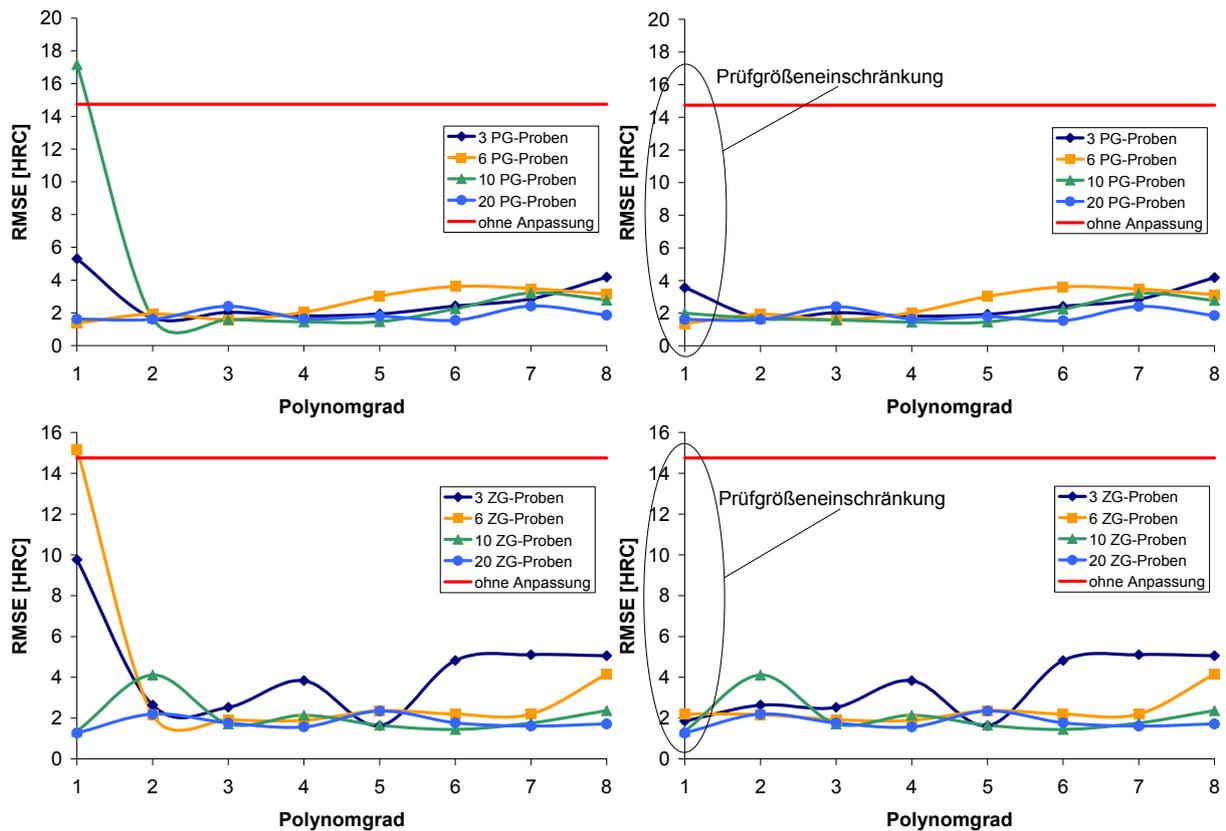


Abb. 80: RMSE-Werte über den zur Anpassung verwendeten Polynomgrad bei Probenauswahl ausgehend vom Prüfgrößenraum (oben) und Zielgrößenbereich (unten)

Es zeigt sich, dass unabhängig von der Auswahlmethode für den linearen Fall Fehlerwerte im Bereich der unangepassten Kalibrierung auftreten. Diese können jedoch durch die Einschränkung der Prüfgrößen zur Kalibrierpolynombildung deutlich verkleinert werden. Die Auswahlmethode ausgehend vom Prüfgrößenraum zeigt ein leicht homogeneres Verhalten über dem Polynomgrad. Der geringste Fehlerwert von 1,286 HRC stellt sich bei der Verwendung von 20 % der Kalibrierproben, bei Auswahl über den Zielgrößenbereich und bei linearen Polynomen zur Anpassung ein. Jedoch liegen auch die meisten RMSE-Werte der anderen Kombinationen im Bereich unter beziehungsweise um die 1,5 - 2 HRC. Dies entspricht im Vergleich zum mit der ursprünglichen Kalibrierung von Sensor O an den Kalibrierproben erreichten RMSE-Wert von 0,891 HRC einer ca. 0,5- bis 2,5-fachen Abweichung (vergleiche

Abb. 29 (rechts)). Die Fehlerwerte liegen jedoch trotz Anpassung im Bereich der Streuung der Referenzwerte, die durch Rockwell-Härteprüfung ermittelt wurden.

Abb. 81 zeigt oben die RMSE-Werte und unten die prozentualen Anteile der nicht erkannten beziehungsweise undefinierten Messungen, die sich bei den angepassten Prüfgrößenräumen ergeben, wenn eine Mustererkennung zur Kalibrierung verwendet wird. Dafür wurden als Normierungsmessungen die angepassten Daten von der gleichen Kalibrierprobe (Probe Nr. 10) verwendet wie im unangepassten Zustand.

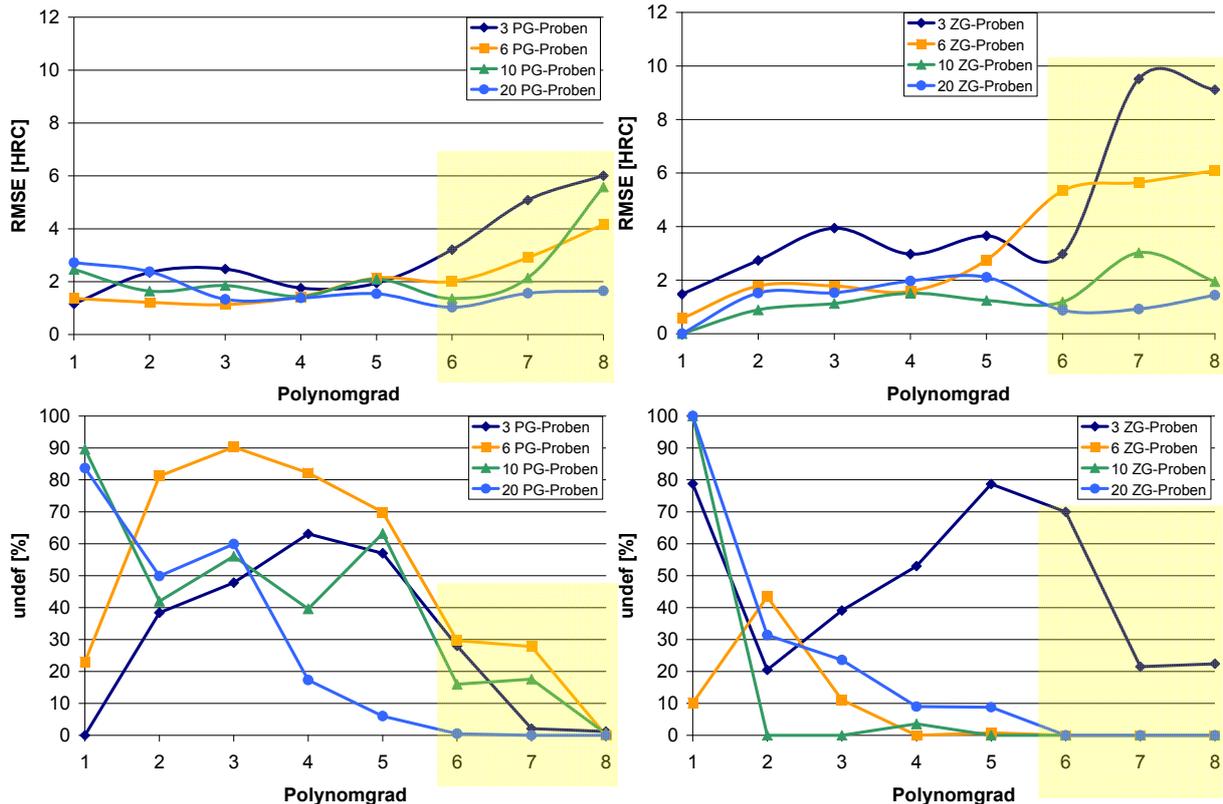


Abb. 81: *RMSE-Werte und prozentualen Anteile der undefinierten Messungen der angepassten Mustererkennungskalibrierungen über den zur Anpassung verwendeten Polynomgrad bei Probenauswahl ausgehend vom Prüfgrößenraum (links) und Zielgrößenbereich (rechts)*

Abb. 81 verdeutlicht, dass die Mustererkennung im Gegensatz zur Regressionsanalyse als Kalibriermethode eine schärfere Trennung der Daten bei der Charakterisierung durchführt. Dies wird deutlich, wenn man die beiden Graphen im unteren Teil von Abb. 81 analysiert. Hier zeigen sich unabhängig von der Probenauswahlmethodik prozentuale Anteile von bis zu 100 % undefinierter Messungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer Mustererkennung der gesamte Prüfgrößenraum zur Eincharakterisierung der Messungen verwendet wird. Dadurch werden alle eventuellen Abweichungen, Ungenauigkeiten usw., die durch die neue Prüfsystemkomponente entstanden sein könnten, mit in die Ergebnisbildung aufgenommen und sorgen so für eine Verschlechterung des Ergebnisses. Unabhängig von der Auswahlmethode werden erst ab dem 6. Polynomgrad alle Proben von den Mustererkennungsdatenbanken eincharakterisiert, denen 20 % der Kalibrierproben zur Anpassung zur

Verfügung standen. Wobei sich in dieser Betrachtung die Probenauswahl über den Zielgrößenbereich günstiger verhält, da bei ihr auch schon bei geringeren Polynomgraden und bei weniger Proben zur Anpassung alle Messungen eincharakterisiert werden. Die minimale Probenanzahl von drei Proben zeigt lediglich für die Auswahl über den Prüfgrößenraum bei linearen Polynomen zur Anpassung gute Ergebnisse. Der niedrigste RMSE-Wert von 0,872 HRC, bei dem gleichzeitig alle Messungen eincharakterisiert werden, ergibt sich bei der Verwendung von 20 % der Kalibrierproben, einem Polynomgrad von sechs und bei einer Probenauswahl über den Zielgrößenbereich (vergleiche Abb. 29 (links)).

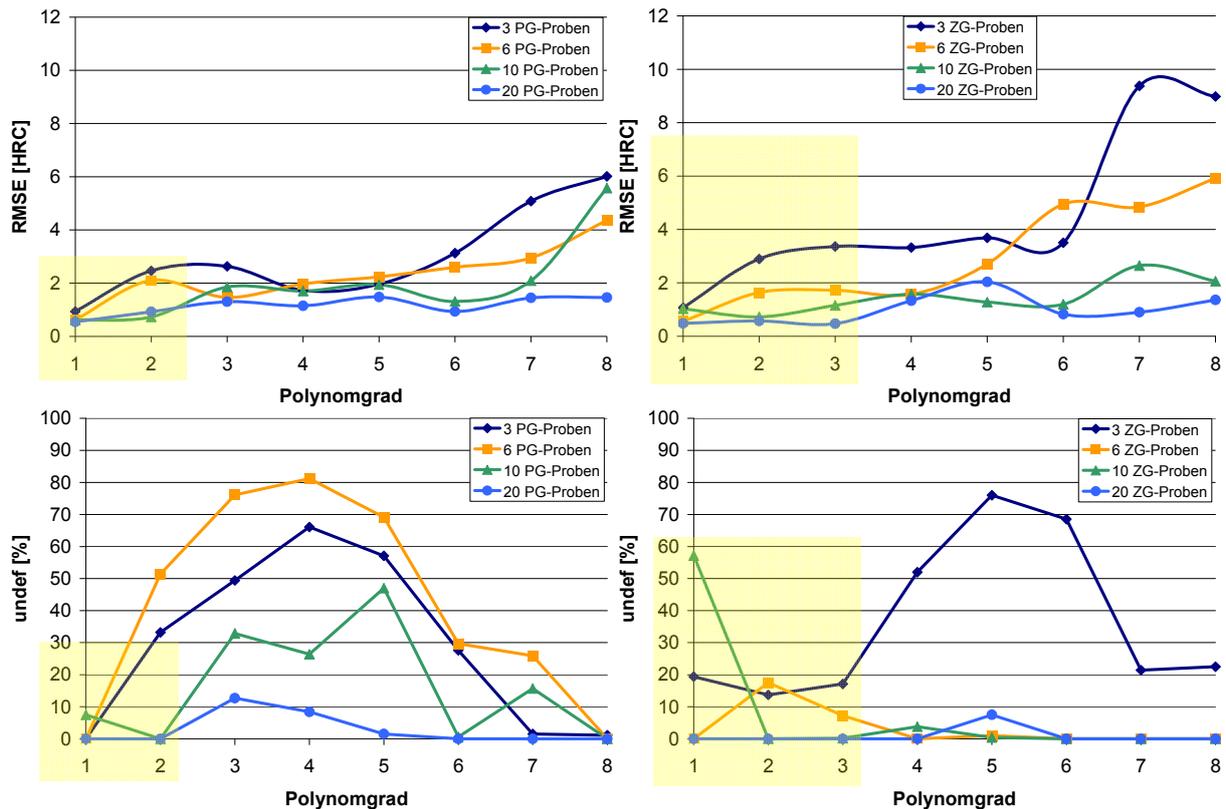


Abb. 82: *RMSE-Werte und die prozentualen Anteile der undefinierten Messungen der angepassten Mustererkennungskalibrierungen mit Prüfgrößenewichtung bei Probenauswahl ausgehend vom Prüfgrößenraum (links) und Zielgrößenbereich (rechts)*

Die Ergebnisse aus Abb. 81 lassen sich durch die Gewichtung mit den R^2 -Werten sowohl für den RMSE-Wert als auch für den prozentualen Anteil der undefinierten Messungen verbessern (siehe Abb. 82). Der minimale RMSE-Wert von 0,472 HRC für alle Messungen stellt sich bei der Verwendung von 20 Proben, bei einem Polynomgrad von drei und bei der Probenauswahl über den Zielgrößenbereich ein (vergleiche Abb. 29 (links)). Jedoch zeigen nach der Gewichtung auch andere Kombinationen geringe RMSE-Werte. So wird zum Beispiel bei der Minimalauswahl dreier Proben ausgehend vom Prüfgrößenraum, für lineare Polynome zur Anpassung ein RMSE-Wert von 0,937 HRC für alle Messungen erreicht (vergleiche Abb. 29 (links)). Durch die Anpassungen wurde der Fehlerwert von 0,188 HRC, den die ursprüngliche Datenbank des Sensors O an den Kalibriermessungen des gleichen Sensors

liefert, nicht erreicht. Die Fehlerwerte liegen jedoch trotz Anpassung im Bereich der Streuung der Referenzwerte, die durch Rockwell-Härteprüfung ermittelt wurden.

Für die Umkehrung der Anpassungen der beiden Sensoren im Rahmen dieser Anwendung stellten sich vergleichbare Ergebnisse wie in Abb. 80 bis Abb. 82 ein.

Anwendung 4: Restaustenitgehaltbestimmung an Vierkantproben

Bei dieser Restaustenitgehaltbestimmung bestand der Kalibrierprobensatz aus lediglich 11 Proben, so dass hier zur Anpassung nur die Minimalanzahl von drei Proben mit den beiden Auswahlmethoden gewählt wurde. Die Auswahl über den Zielgrößenbereich hat die drei Kalibrierproben mit den Bezeichnungen 6.1 (7,9 % RA), 6.8 (35,1 % RA) und 6.11 (25 % RA) ergeben. Für die Auswahl über den Prüfgrößenraum wurden für alle Sensoren bis auf den Sensor V die Proben 6.1, 6.6 (21,6 % RA) und 6.11 ermittelt. Für den Sensor V resultierten aus der Auswahl über den Prüfgrößenraum die Proben 6.1, 6.10 (22,4 % RA) und 6.11. In Abb. 83 sind die RMSE-Werte der angepassten Kalibrierungen bei Anwendung auf die Originalsensordaten unter Variation des Polynomgrades zur Prüfgrößenraumapproximation angegeben. Als Kalibriermethode wurde eine Regressionsanalyse verwendet, die ein Polynom mit maximal quadratischen Termen zur Zielgrößenbestimmung ermittelt hat. Die Formatierung von Abb. 83 ist analog zu Abb. 77.

| | | 209 A vs. V K2 RMSE [%](ohne Anpassung): 136.806 | | | | 208 A vs. V K2 RMSE [%](ohne Anpassung): 24.255 | | | |
|------------------|------------------|--|--------------|--------------|------------------|---|--------------|--------------|--|
| | | RMSE [%](mit Anpassung) | | | | RMSE [%](mit Anpassung) | | | |
| Polynom- grad | 3 ZG-Proben | | 3 PG-Proben | | 3 ZG-Proben | | 3 PG-Proben | | |
| | PG-Einschränkung | | | | PG-Einschränkung | | | | |
| | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | |
| 1 | 5.033 | 5.632 | 3.700 | 3.686 | 2.595 | 2.093 | 1.972 | 1.392 | |
| 2 | 1.456 | 1.201 | 1.046 | 1.045 | 1.934 | 2.334 | 1.617 | 0.708 | |
| 3 | 2.557 | 2.558 | 2.016 | 1.459 | 3.691 | 4.043 | 1.272 | 1.150 | |

| | | V vs. 210 A RMSE [%](ohne Anpassung): 12.178 | | | | V vs. V K2 RMSE [%](ohne Anpassung): 41.712 | | | |
|------------------|------------------|--|--------------|--------------|------------------|---|--------------|--------------|--|
| | | RMSE [%](mit Anpassung) | | | | RMSE [%](mit Anpassung) | | | |
| Polynom- grad | 3 ZG-Proben | | 3 PG-Proben | | 3 ZG-Proben | | 3 PG-Proben | | |
| | PG-Einschränkung | | | | PG-Einschränkung | | | | |
| | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | |
| 1 | 4.588 | 0.969 | 1.333 | 1.241 | 1.144 | 0.706 | 1.593 | 0.629 | |
| 2 | 1.637 | 0.905 | 1.504 | 2.037 | 4.558 | 4.558 | 0.627 | 0.975 | |
| 3 | 1.667 | 1.721 | 1.474 | 1.827 | 2.356 | 2.356 | 1.411 | 1.215 | |

| | | 208 A vs. 210 A RMSE [%](ohne Anpassung): 1.536 | | | | 208 A vs. 209 A RMSE [%](ohne Anpassung): 27.373 | | | |
|------------------|------------------|---|--------------|--------------|------------------|--|--------------|--------------|--|
| | | RMSE [%](mit Anpassung) | | | | RMSE [%](mit Anpassung) | | | |
| Polynom- grad | 3 ZG-Proben | | 3 PG-Proben | | 3 ZG-Proben | | 3 PG-Proben | | |
| | PG-Einschränkung | | | | PG-Einschränkung | | | | |
| | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | ohne | mit | |
| 1 | 1.127 | 1.127 | 0.762 | 0.762 | 1.156 | 1.156 | 1.107 | 1.108 | |
| 2 | 0.530 | 0.530 | 0.640 | 0.657 | 1.320 | 1.319 | 0.761 | 0.761 | |
| 3 | 0.596 | 0.597 | 0.643 | 0.647 | 1.189 | 1.189 | 1.123 | 1.121 | |

1 Sensor der ersten und 1 Sensor der zweiten Generation

2 Sensoren der ersten oder zweiten Generation

Abb. 83: RMSE-Werte bei Sensoraustausch

Alle in Abb. 83 dargestellten RMSE-Werte liegen unterhalb der Werte ohne Anpassung (fett gedruckt in den jeweiligen Spaltenköpfen). Bei den Werten ohne Anpassung fällt wie bereits bei den vorherigen Anwendungen auf, dass zwei Sensoren der zweiten Generation bei einem Austausch gutmütiger reagieren als bei einer Mischung der Sensorgenerationen. Zusätzlich zeigt sich hier aber auch, dass zwei Sensoren der ersten Generation bei einem Austausch ohne Anpassung einen größeren Fehlerwert liefern als zwei der zweiten Generation. Dies lässt sich auf die stabilere und genauere Hallsonde in den Sensoren der zweiten Generation zurückführen. Die geringsten Fehlerwerte, also die besten Ergebnisse nach einer Anpassung, stellen sich im Schnitt für lineare und quadratische Polynome zur Prüfgrößenraumapproximation ein. Vergleicht man die RMSE-Werte der ursprünglichen Kalibrierungen mit denen der angepassten Kalibrierungen, so sind diese schlechter geworden (zum Beispiel für den Sensor 208 A von 0,17 % auf 0,53 % oder 0,761 %, für den Sensor V siehe Abb. 31). Die Fehlerwerte der angepassten Kalibrierungen liegen aber trotz der Verschlechterung

durch die Anpassung im ein- bis circa zweifachen Bereich der Streuung der Referenzmethode (Mößbauerspektroskopie [Mössb1959, Gosne1975]).

In Abb. 84 sind in Diagrammen exemplarisch die Fehlerwerte für den Austausch von vier Sensorkombinationen unter Verwendung einer Mustererkennung zur Kalibrierung über den verwendeten Polynomgrad zur Approximation des Prüfgrößenraumes dargestellt. Die Sensorkombinationen sind in Analogie zu der vorherigen tabellarischen Darstellung jeweils an den Y-Achsen vermerkt. Es wurden zwei Y-Achsen verwendet, um gleichzeitig den RMSE-Wert bei Anwendung der angepassten Kalibrierdatenbanken auf die Originalmessdaten (linke Y-Achse) und die prozentuale Anzahl der dabei nicht erkannten Messungen darstellen zu können. Da für alle Sensorkombinationen in dieser Anwendung bei Verwendung einer Mustererkennung alle Messungen des nicht in der Kalibrierdatenbank vorhandenen Sensors unerkant bleiben, konnte kein Fehlerwert ohne Anpassung in die Diagramme integriert werden. In allen Diagrammen wurden die Fehlerwerte mit und ohne die in Kapitel 4.3.3 beschriebene Wichtung über die Bestimmtheitsmaße angegeben.

Für eine Mustererkennung zeigt sich, dass lineare Polynome zur Prüfgrößenraumapproximation für Sensoren der zweiten Generation den geringsten Fehlerwert bei gleichzeitiger vollständiger Erkennung der Originalsensordaten an den Kalibrierproben liefern (siehe die beiden Diagramme auf der rechten Seite). Falls Sensoren der ersten Generation in der ursprünglichen Kalibrierung verwendet wurden, können sich auch für quadratische Polynome zur Prüfgrößenraumapproximation die besten Anpassungsergebnisse einstellen (siehe die beiden Diagramme auf der linken Seite). Allgemein liegen die Fehlerwerte für die Anwendung der angepassten Kalibrierdatenbank zwischen 0 und ca. 1 %. Dies entspricht in einigen Fällen einer Verschlechterung des Ergebnisses gegenüber den Ergebnissen mit der ursprünglichen Kalibrierdatenbank, liegt aber in jedem Fall im Bereich der Streuung des Referenzverfahrens (vergleiche Abb. 31).

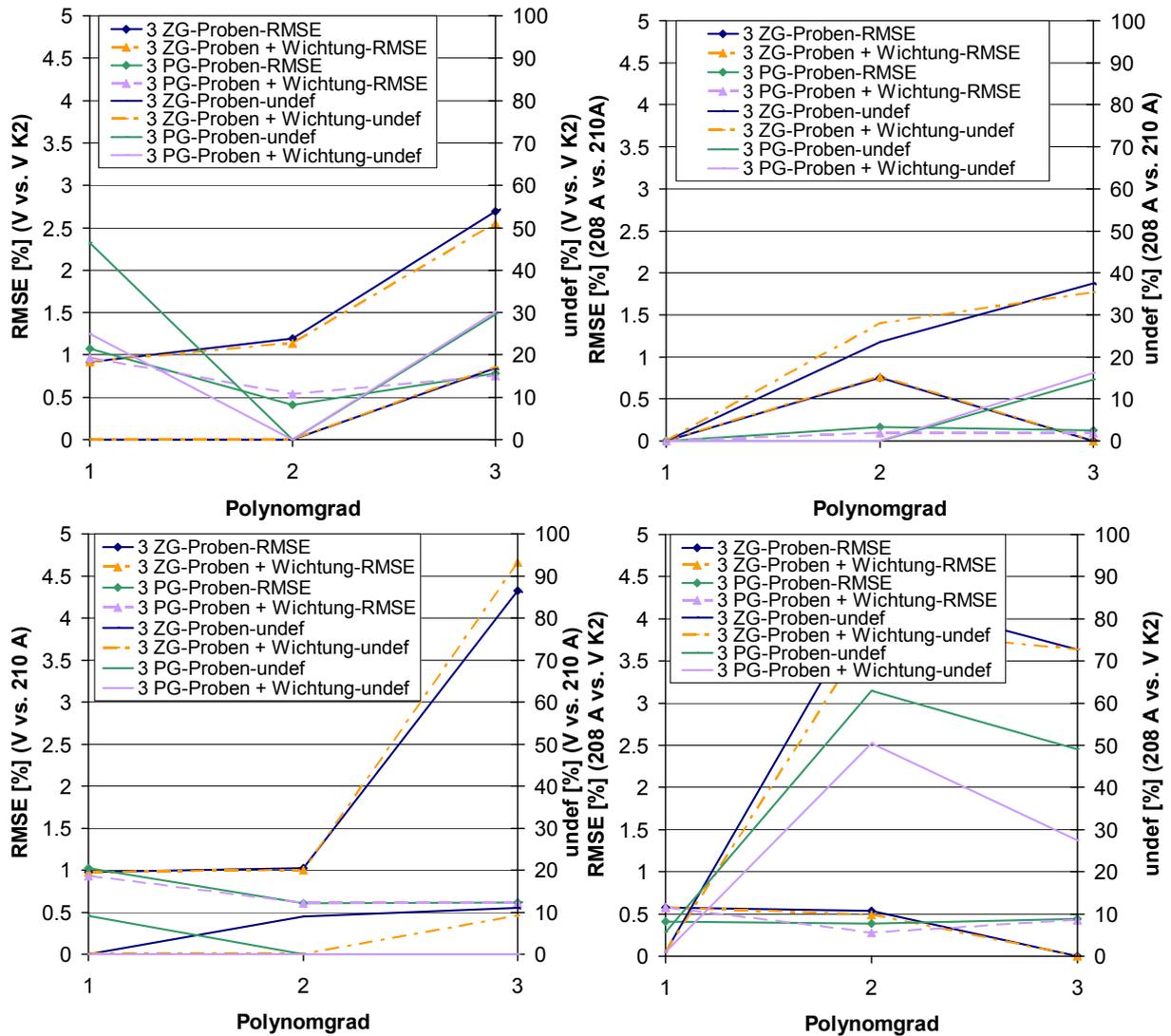


Abb. 84: RMSE-Werte und die prozentualen Anteile der undefinierten Messungen bei Senso-
raustausch

Bei einem Prüfgeräteaustausch stellen sich die in Abb. 85 und Abb. 86 dargestellten Fehler-
verläufe über den zur Anpassung verwendeten Polynomgrad ein.

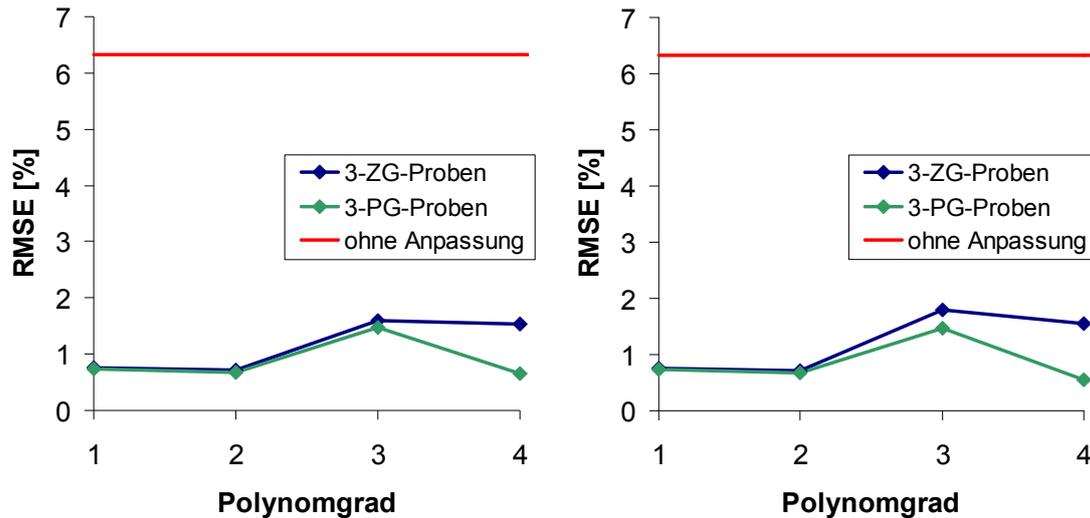


Abb. 85: RMSE-Werte bei Geräte austausch für Kalibrierpolynome mit maximal quadratischen Termen; links: ohne Prüfgrößeneinschränkung; rechts: mit Prüfgrößeneinschränkung

Aus Abb. 85 wird deutlich, dass durch die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes bei einem Geräte austausch unabhängig von der Art der Probenauswahl zur Anpassung eine Verbesserung der Kalibrierungsübertragung erzielt wird. Zusätzlich verdeutlicht Abb. 85 exemplarisch, dass durch die zusätzliche Prüfgrößeneinschränkung bei einem Regressionspolynom zur Kalibrierung keine Verschlechterung des Anpassungsergebnisses stattfindet.

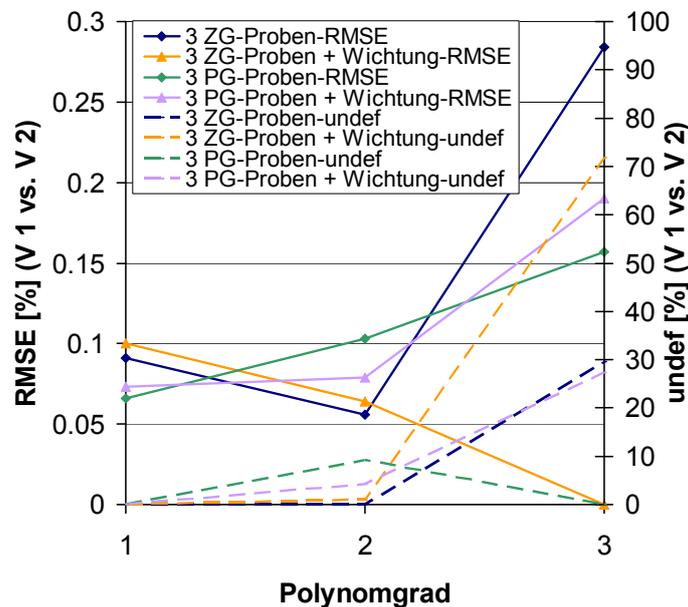


Abb. 86: RMSE-Werte und die prozentualen Anteile der undefinierten Messungen bei Geräte austausch und Verwendung einer Mustererkennung zur Kalibrierung

Äquivalent zu Abb. 85 sind in Abb. 86 die Fehlerverläufe bei einem Prüfgeräteaustausch und anschließender Anpassung durch polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes sowie Verwendung einer Mustererkennung als Kalibriermethode dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einer Kalibrierung mittels Mustererkennung und Anpassung durch Approximation lediglich lineare Anpassungspolynome dazu führen, dass nach der Anpassung in allen betrachte-

ten Fällen eine vollständige Erkennung der Daten mit einem ausreichend geringem Fehlerwert unabhängig von einer Prüfgrößenwichtung und der Auswahlmethode der Proben zur Anpassung stattfindet.

Anwendung 5: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerbolzen

Für diese Anwendung wird im Folgenden lediglich der „worst case“-Fall für eine Anpassung der Kalibrierung nach einem Geräte austausch näher betrachtet (Verwendung aller Prüfverfahren zur Kalibrierung und eines Polynoms mit maximal quadratischen Termen zur Kalibrierung mittels Regressionsanalyse; vergleiche Abb. 35 links oben). Für die hier nicht erläuterten Fälle waren die Anpassungsergebnisse wegen der deutlich geringeren Effekte bei einem Geräte austausch äquivalent zu den Folgenden. In Abb. 87 sind die Fehlerverläufe und die zugehörigen prozentualen Anteile der nicht erkannten Messungen für eine Mustererkennung als Kalibrierermethode über den Polynomgrad der Prüfgrößenraumanpassung dargestellt.

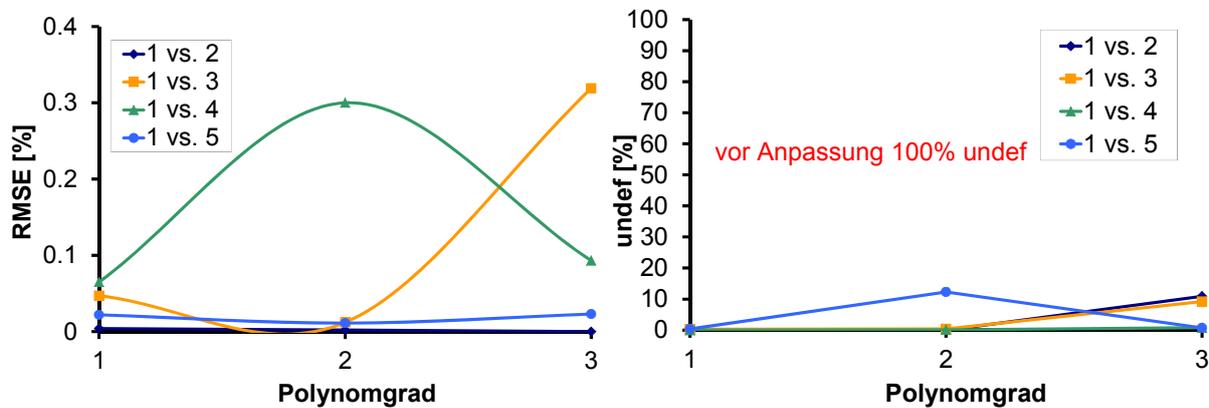


Abb. 87: *RMSE-Werte (links) und die prozentualen Anteile der undefinierten Messungen (rechts) bei Geräte austausch*

Aus Abb. 87 wird deutlich, dass sich nach einem Prüfgeräte austausch durch die Anpassung des Prüfgrößenraumes eine Verbesserung des Kalibrierergebnisses einstellt. Denn zuvor wurden nach einem Geräte austausch 100 % der Messungen von einer Mustererkennung nicht erkannt. Es zeigt sich auch in dieser Anwendung, dass durch eine Anpassung des Prüfgrößenraumes mit linearen Polynomen das beste Ergebnis erzielt wird und alle Messungen an den Kalibrierproben charakterisiert werden können. Bei Verwendung einer Regressionsanalyse als Kalibrierermethode stellen sich bei der Übertragung der Kalibrierung auf ein anderes Prüfgerät durch die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes die in Abb. 88 dargestellten Fehlerverläufe als Funktion des zu Anpassung verwendeten Polynomgrades ein.

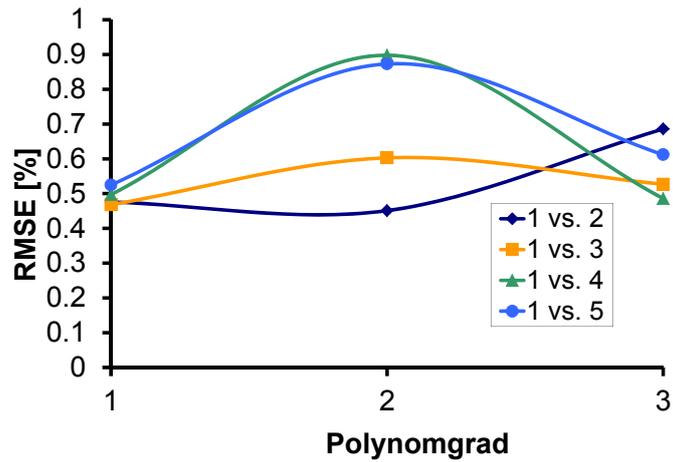


Abb. 88: RMSE-Werte bei Geräteaustausch

Da vor der Anpassung die RMSE-Fehlerwerte der einzelnen Geräte bei Austausch ohne Anpassung zwischen 5,97 und 43,46 % lagen, stellt sich hier durch die polynomiale Prüfgrößenraumanpassung eine deutliche Verbesserung des Fehlerwertes ein (vergleiche Abb. 35 links oben und Abb. 88). Auch in diesem Fall werden die besten Ergebnisse für einen Prüfgeräteaustausch durch eine lineare Approximation des Prüfgrößenraumes erreicht.

5.3 Anpassung mittels genetischer Algorithmen

Bei Anpassung der Prüfgrößenräume zweier anzulegender Prüfsystemkomponenten mittels genetischer Algorithmen ist vorab eine Auswahl der zur Anpassung verwendeten Proben notwendig. Hierfür sind in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 zwei Optionen erläutert worden. Für alle betrachteten Anwendungen sind beide Auswahloptionen angewandt worden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Anpassung durch genetische Algorithmen für eine Auswahl der betrachteten Industrieanwendungen (Anwendung 2,3,4 und 5) vorgestellt. Im Folgenden werden nicht alle Ergebnisse für jede Applikation erläutert, da sich gezeigt hat, dass bei der Verwendung von genetischen Algorithmen im Gegensatz zur Verwendung von polynomialen Approximationen oder Differenzprüfgrößen zusätzliche Randbedingungen auftreten. Darunter ist neben der Spezialisierung des Verfahrens auf Mustererkennungskalibrierungen zu verstehen, dass bei der Anwendung von genetischen Algorithmen keine gesicherte Aussage über die Zeit, die für die jeweilige Optimierung benötigt wird, getroffen werden kann. Da der genetische Algorithmus die Gewichte für die einzelnen Prüfgrößen über eine Zufallsvariation optimiert, kann im Idealfall nach nur einigen Iterationen ein Optimum gefunden werden, aber es ist auch möglich, dass die Optimierung im „worst case“-Fall auch nach Stunden oder Tagen noch keine Lösung gefunden hat (siehe Kapitel 4.4). Da dies für die Anwendung in der Industrie eine zu große Unsicherheit darstellt, lässt sich dieses Verfahren nur dann verwenden, wenn vor Beginn der Kalibrierungsaufgabe mehrere Prüfsystemkomponenten vorhanden sind und eine Mustererkennung als Kalibrieremethode zum Einsatz kommt. Dann könnte bereits nach der Kalibrierdatenaufnahme mit der Optimierung für die zusätzlich vorhandenen Komponenten begonnen werden, und so die Zeit für die Anpassung durch genetische Algorithmen bestmöglich ausgenutzt werden, während das zur Kalibrierung verwendete Prüfsystem bereits arbeitet.

Die im Folgenden erläuterten Ergebnisse wurden durch unterschiedlich lange Optimierungszeiten gewonnen. Die Optimierungen durch genetische Algorithmen wurden für jeden Austausch dann abgebrochen, wenn sich für die verwendeten Kalibriermessungen Ergebnisse einstellten, die ähnlich zu den Ergebnissen vor dem Austausch waren. Die Anzahl der Iterationen, bis die Optimierung abgebrochen wurde, variierte stark. Bei der Anpassung nach einem Prüfgeräteaustausch wurden beispielsweise in einem Fall nach nur 10 und in einem anderen nach ca. 43000 Iterationen abgebrochen. Dies verdeutlicht die bereits oben angesprochene Problematik der nicht abschätzbaren Zeit, die für die Anpassung durch genetische Algorithmen benötigt wird.

Prüfgeräteaustausch für eine Auswahl von Industrieapplikationen

In Abb. 89 ist eine tabellarische Übersicht für die Anpassung durch genetische Algorithmen im Falle eines Prüfgeräteaustausches anhand einer Auswahl der in Kapitel 3.3.3.1 vorgestellten Industrieapplikationen dargestellt. Die tabellarische Übersicht gliedert sich in die Spalten „Prüfgeräte“, „Industrieapplikation“, „Ausgangszustand“ und „3 PG-Proben“. In der ersten Spalte sind die verwendeten Prüfgeräte und in der zweiten die zugehörige Industrieapplikation angegeben. Die dritte und vierte Spalte gliedern sich jeweils in zwei Unterpunkte. In den beiden Unterpunkten werden jeweils der RMSE-Wert und der prozentuale Anteil der von der Mustererkennungskalibrierung nicht erkannten Messungen sowohl für den Ausgangszustand als auch für eine Anpassung angegeben. Zur Anpassung wurde eine Auswahl von drei Proben verwendet, die über den Prüfgrößenbereich ausgewählt wurden. Das jeweils ausgetauschte Prüfgerät und die sich damit ergebenden Werte sind in blauer Schrift dargestellt.

| Prüfgeräte | Industrieapplikation | Ausgangszustand | | 3 PG-Proben | |
|------------|----------------------|-----------------|--------|-------------|--------|
| | | RMSE [%] | %undef | RMSE [%] | %undef |
| V 1 | 2 | 0.862 | 0.00 | 0.777 | 0.00 |
| V 2 | | 1.639 | 0.00 | 1.575 | 0.00 |
| V 1 | 4 | 0.000 | 0.00 | 0.004 | 0.00 |
| V 2 | | NaN | 100.00 | 1.809 | 0.00 |
| 1 | 5 | 0 | 0.00 | 0.206 | 0.00 |
| 2 | | NaN | 100.00 | 0.685 | 0.00 |
| 1 | 5 | 0 | 0.00 | 0.042 | 0.00 |
| 3 | | NaN | 100.00 | 0.497 | 0.00 |
| 1 | 5 | 0 | 0.00 | 0.079 | 0.00 |
| 4 | | NaN | 100.00 | 1.172 | 0.10 |
| 1 | 5 | 0 | 0.00 | 0.087 | 0.00 |
| 5 | | NaN | 100.00 | 0.534 | 0.00 |

Abb. 89: Übersicht über Anpassungen mit genetischen Algorithmen bei einem Prüfgeräteaustausch

Aus Abb. 89 wird deutlich, dass durch genetische Algorithmen eine Mustererkennungskalibrierung nach einem Prüfgeräteaustausch auf das neue Prüfgerät angepasst werden kann. Vor der Verwendung der genetischen Algorithmen wurden außer für **Anwendung 2** nach dem Geräte austausch alle Messungen an den Kalibrierproben von der Mustererkennungsdatenbank nicht erkannt (siehe „NaN“ in Abb. 89 Spalte „Ausgangszustand“). Nach der Anpassung durch die Optimierung mittels genetischer Algorithmen können alle Messungen von der Mustererkennung charakterisiert werden.

Anwendung 2: Restaustenitgehaltbestimmung an Common-Rail-Injektor-Ankerplatten

In dieser Industrieapplikation wurden nach Austausch eines Sensors der ersten Generation mit einem der zweiten Generation ohne Anpassung alle Messungen an den Kalibrierproben nicht erkannt. Wurde ein Sensor der zweiten Generation mit einem der gleichen Generation ausgetauscht, konnten die Messungen an den Kalibrierproben vollständig charakterisiert werden (siehe Abb. 27 (links) und Abb. 90 Spalte „Ausgangszustand“). In Abb. 90 ist der jeweils ausgetauschte Sensor und die sich damit ergebenden Werte in blauer Schrift dargestellt.

| Sensoren | Ausgangszustand | | 3 PG-Proben = 3 ZG-Proben | |
|----------|-----------------|--------|------------------------------|--------|
| | RMSE [%] | %undef | RMSE [%] | %undef |
| 208 A | 0.761 | 0.00 | 0.609 | 0.00 |
| 210 A | 0.933 | 0.00 | 0.975 | 0.00 |
| V | 0.862 | 0.00 | 1.254 | 0.00 |
| 210 A | NaN | 100.00 | 4.004 | 0.00 |
| V | 0.862 | 0.00 | 1.433 | 0.00 |
| 209 A | NaN | 100.00 | 5.801 | 0.60 |
| V | 0.862 | 0.00 | 1.366 | 0.00 |
| 208 A | NaN | 100.00 | 6.699 | 0.10 |

Abb. 90: Übersicht über Anpassungen mit genetischen Algorithmen bei Sensoraustausch für Anwendung 2

Aus Abb. 90 wird deutlich, dass in dieser Industrieapplikation eine Anpassung der Mustererkennungskalibrierung durch genetische Algorithmen möglich war. Es wird jedoch ebenfalls deutlich, dass die Güte der angepassten Mustererkennungskalibrierung von den verwendeten Sensorgenerationen abhängt. So stellt sich bei einer Mischung der Sensorgenerationen stets eine schlechtere Güte der Anpassung ein als bei einem Austausch zweier Sensoren der zweiten Generation (vergleiche Abb. 90 erste Zeile mit den Restlichen).

Anwendung 3: Oberflächenhärtebestimmung an zylindrischen Proben

Da in dieser Industrieapplikation 100 Kalibrierproben zur Verfügung standen, konnte die Anzahl der zur Anpassung verwendeten Proben, wie in Kapitel 5.2, variiert werden. Nach Austausch des Sensors wurden in dieser Anwendung alle Messungen an den Kalibrierproben von der Mustererkennungsdatenbank nicht erkannt (siehe Abb. 29 (links) und „NaN“ in Abb. 91 Spalte „Ausgangszustand“). In Abb. 91 sind die RMSE-Werte und die prozentualen Anteile der nicht erkannten Kalibriermessungen, die sich nach der Anpassung der Mustererkennungsdatenbank durch genetische Algorithmen mit ausgetauschtem Sensor für unterschiedliche Probenanzahlen und -auswahlmethoden ergeben, in blauer Schrift dargestellt.

| Sensoren | Ausgangszustand | | 3 PG-Proben | | 3 ZG-Proben | |
|----------|-----------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef |
| O | 0.188 | 0.00 | 1.285 | 0.00 | 0.364 | 0.00 |
| E | NaN | 100.00 | 2.071 | 0.00 | 1.340 | 0.00 |

| Sensoren | Ausgangszustand | | 6 ZG-Proben | | 6 PG-Proben | |
|----------|-----------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef |
| O | 0.188 | 0.00 | 0.344 | 0.00 | 0.333 | 0.00 |
| E | NaN | 100.00 | 1.309 | 0.00 | 1.806 | 0.00 |

| Sensoren | Ausgangszustand | | 10 ZG-Proben | | 10 PG-Proben | |
|----------|-----------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef |
| O | 0.188 | 0.00 | 0.249 | 0.00 | 1.211 | 0.00 |
| E | NaN | 100.00 | 1.570 | 0.01 | 2.909 | 0.00 |

| Sensoren | Ausgangszustand | | 20 ZG-Proben | |
|----------|-----------------|--------|--------------|--------|
| | RMSE [HRC] | %undef | RMSE [HRC] | %undef |
| O | 0.188 | 0.00 | 0.307 | 0.00 |
| E | NaN | 100.00 | 0.937 | 0.60 |

Abb. 91: Übersicht über Anpassungen mit genetischen Algorithmen bei Sensoraustausch für Anwendung 3

Die tabellarische Übersicht in Abb. 91 zeigt, dass durch die genetischen Algorithmen eine Anpassung der Mustererkennungskalibrierung unabhängig von der Probenauswahlmethodik und -anzahl möglich ist. Es zeigt sich aber auch, dass mit steigender Probenanzahl das Anpassungsergebnis verbessert wird. So stellt sich für den ausgetauschten Sensor E bei Verwendung von 20 Proben zur Anpassung ein RMSE-Wert von 0.937 HRC und bei Verwendung von drei Proben ein Wert von 1.34 bis 2.071 HRC ein. Die Auswahlmethode über den Zielgrößenbereich (siehe Kapitel 4.3.2) zeigte in dieser Applikation für den ausgetauschten Sensor E leicht bessere Anpassungsergebnisse.

Anwendung 4: Restaustenitgehaltbestimmung an Vierkantproben

Wie in den zuvor vorgestellten Anwendungen ist auch für diese Applikation eine tabellarische Übersicht der RMSE-Werte und des prozentualen Anteils der nicht erkannten Messungen für eine Auswahl von Prüfsystemkomponenten in Abb. 92 dargestellt. In dieser Abbildung wurden die Werte, die sich durch die Prüfgrößen der ausgewechselten Sensoren ergeben, in blauer Schrift hervorgehoben.

| Sensoren | Ausgangszustand | | 3 PG-Proben | |
|----------|-----------------|--------|-------------|--------|
| | RMSE [%] | %undef | RMSE [%] | %undef |
| 208 A | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 0.00 |
| 210 A | NaN | 100.00 | 0.571 | 0.00 |
| V | 0.000 | 0.00 | 0.057 | 0.00 |
| V K2 | NaN | 100.00 | 4.371 | 0.00 |

Abb. 92: Übersicht über Anpassungen mit genetischen Algorithmen bei Sensoraustausch für Anwendung 4

Aus Abb. 92 wird deutlich, dass vor der Anpassung der Mustererkennungsdatenbank bei einem Sensoraustausch alle Messungen an den Kalibrierproben nicht erkannt werden. Nach Anwendung der genetischen Algorithmen mit Hilfe der Prüfgrößenwerte von drei Kalibrierproben werden alle Messungen an den Kalibrierproben von dem veränderten Prüfsystem (ausgetauschter Sensor beziehungsweise ausgetauschtes Prüfgerät) erkannt. Die Güte der Kalibrierergebnisse nach der Anpassung ist für Sensoren der zweiten Generation untereinander besser als bei Sensoren der ersten Generation.

5.4 Übertragbarkeit der Lösungswege auf die Geometrieunabhängigkeit der Kalibrierung

Eine weitere Problematik bei der elektromagnetischen zerstörungsfreien Prüfung besteht in der Geometrieabhängigkeit der Prüfgrößen und somit der Kalibrierung. Denn in den Prüfgrößen bilden sich bei veränderlicher Geometrie der Messstelle (Radien usw.) nicht nur die Veränderungen bedingt durch die Zielgröße ab, sondern die Geometrieänderung variiert auch das Prüfgrößenverhalten. Dies rührt daher, dass sich durch eine andere Geometrie der Messstelle innerhalb der Probe ein veränderter Verlauf des Magnetfeldes einstellt und sich somit auch die aufgenommenen Signale des Sensors ändern. Da aus diesen Signalen die Prüfgrößen abgeleitet werden, verändert sich auch deren Verhalten. Im Folgenden wird anhand einer Applikation gezeigt, dass sowohl ohne als auch mit einer Anpassung eine Kalibrierung an ebenen Proben auf konvexe und konkave Proben in Grenzen übertragen werden kann.

Bei der hierzu verwendeten Applikation handelt es sich um eine zerstörungsfreie Ermittlung der Randhärte (RHT). Hierzu standen Proben mit ebener, konkaver und konvexer Oberfläche aus dem gleichen ferromagnetischen Grundmaterial zur Verfügung, die durch unterschiedlich starke induktive Wärmebehandlung eine Variation der RHT von 0.5 bis 1.4 mm aufweisen. In den drei folgenden Tabellen sind die genauen Werte der Proben geometriespezifisch aufgeführt.

| eben | |
|-------|----------|
| Probe | RHT [mm] |
| 1 | 0.5 |
| 2 | 0.5 |
| 3 | 0.5 |
| 4 | 0.5 |
| 5 | 0.6 |
| 6 | 0.6 |
| 7 | 0.7 |
| 8 | 0.7 |
| 9 | 0.8 |
| 10 | 0.7 |
| 11 | 0.8 |
| 12 | 0.8 |
| 13 | 0.8 |
| 14 | 0.9 |
| 15 | 0.9 |
| 16 | 0.7 |
| 17 | 1.0 |
| 18 | 1.0 |
| 19 | 0.9 |
| 20 | 1.0 |
| 21 | 0.9 |
| 22 | 0.9 |
| 23 | 1.0 |
| 24 | 0.8 |
| 25 | 1.0 |
| 26 | 1.0 |
| 27 | 1.0 |
| 28 | 1.1 |
| 29 | 1.4 |
| 30 | 1.4 |
| 31 | 1.4 |
| 32 | 1.3 |

| konvex | |
|--------|----------|
| Probe | RHT [mm] |
| 1 | 0.6 |
| 2 | 0.6 |
| 3 | 0.9 |
| 4 | 1.2 |
| 5 | 1.3 |
| 6 | 0.5 |
| 7 | 0.5 |
| 8 | 0.6 |
| 9 | 0.7 |
| 10 | 0.8 |
| 11 | 0.8 |
| 12 | 0.8 |
| 13 | 0.9 |
| 14 | 0.9 |
| 15 | 0.9 |
| 16 | 1.0 |
| 17 | 1.0 |
| 18 | 1.1 |
| 19 | 1.1 |
| 20 | 1.2 |
| 21 | 1.2 |

| konkav | |
|--------|----------|
| Probe | RHT [mm] |
| 1 | 0.5 |
| 2 | 0.5 |
| 3 | 0.6 |
| 4 | 0.6 |
| 5 | 0.6 |
| 6 | 0.6 |
| 7 | 0.6 |
| 8 | 0.7 |
| 9 | 0.8 |
| 10 | 0.8 |
| 11 | 0.8 |
| 12 | 0.8 |
| 13 | 0.8 |
| 14 | 0.9 |
| 15 | 0.9 |
| 16 | 0.9 |
| 17 | 0.9 |
| 18 | 1.0 |
| 19 | 1.0 |
| 20 | 1.0 |
| 21 | 1.1 |

Die Proben mit konkaver Oberfläche hatten an der Messstelle einen Radius von 35 mm und die mit konvexer Oberfläche einen Radius von 40 mm. Zum Vergleich ist das Vorgehen bei der elektromagnetischen Prüfgrößenaufnahme mit dem 3MA-Prüfsystem für die Proben mit ebener, konkaver und konvexer Oberfläche in Abb. 93 verdeutlicht. Zur Datenaufnahme wurde ein 3MA-Standardsensor verwendet.

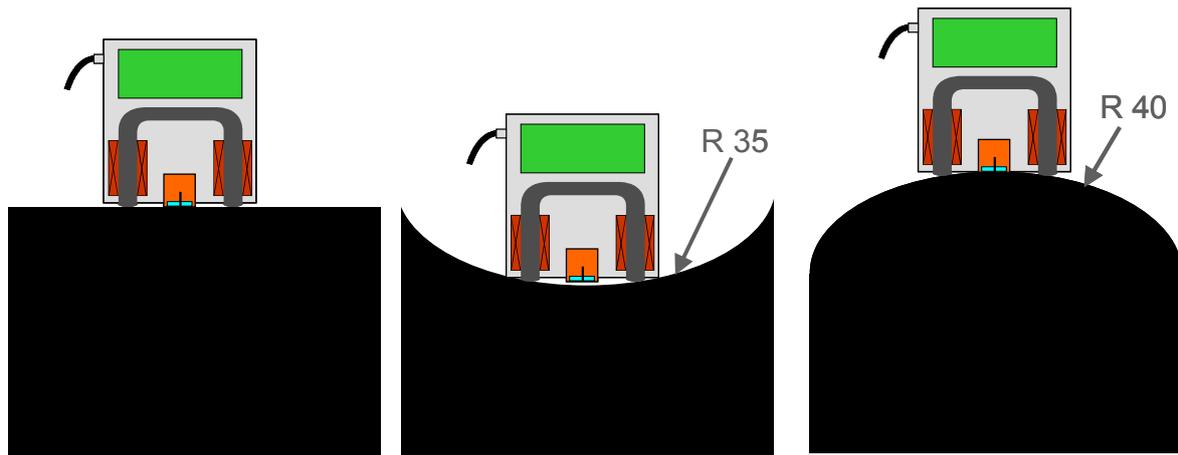


Abb. 93: Skizze der Datenaufnahme an den Proben mit ebener, konkaver und konvexer Oberfläche

Die 3MA-Datenaufnahme wurde in Form von Sweep-Messungen ausgeführt. Bei den Sweep-Messungen wurden die Magnetisierungsfrequenz und –feldstärke sowie die an der Datenaufnahme beteiligten Prüfverfahren variiert. Es kamen Magnetisierungsfrequenzen von 15, 70, 100 und 200 Hz zum Einsatz. Bei den 15 Hz-Messungen wurde lediglich die Oberwellenanalyse aktiviert, da die drei anderen Verfahren an den Proben bei niedrigen Frequenzen keine reproduzierbaren Signale lieferten. In diesem niederfrequenten Bereich wurde als Magnetfeldaussteuerung 30 und 40 A/cm verwendet. Die elektromagnetischen Signale wurden bei 70 und 100 Hz mit allen vier Verfahren aufgenommen. Die Messsignale bei 100 Hz Magnetisierungsfrequenz wurden mit einer Magnetfeldaussteuerung von 50 und 60 A/cm und die bei 70 Hz lediglich mit 60 A/cm aufgenommen. Bei den 200 Hz Magnetisierungsfrequenzmessungen wurden alle vier 3MA-Prüfverfahren mit einer Magnetfeldaussteuerung von 40 und 50 A/cm aufgenommen. An den ebenen Proben wurden pro Messstelle 10 Messzyklen bestehend aus je 5 Einzelmessungen und an den konkaven und konvexen Proben jeweils 5 Messzyklen ebenfalls bestehend aus je 5 Einzelmessungen aufgenommen. Im Anschluss an die Datenaufnahme wurde mit Hilfe der elektromagnetischen Prüfgrößen, die an den ebenen Proben aufgenommen wurden, und den zugehörigen RHT-Werten eine Kalibrierung durch eine Regressionsanalyse aufgebaut. Zur Kalibrierung wurde ein lineares Polynom gewählt, da so der Einfluss der Geometrieänderung nicht quadratisch in die Ergebnisbildung eingehen kann.

In Abb. 94 ist das an den Proben mit ebener Messstelle ermittelte lineare Polynom auf die elektromagnetischen Prüfgrößen der Proben mit ebener, konkaver und konvexer Geometrie angewandt worden.

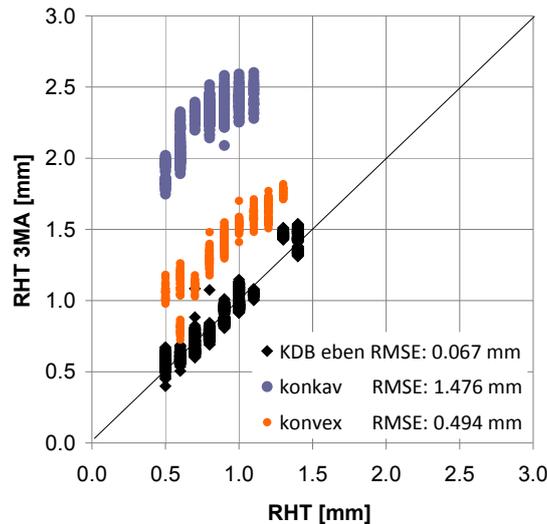


Abb. 94: Kalibrierergebnis bei Anwendung eines linearen, aus den Prüfgrößen der Proben mit ebener Geometrie gebildeten Polynoms auf die Proben mit ebener, konkaver und konvexer Messstelle

Die in der Legende angegebenen Fehlerwerte verdeutlichen, dass die an den Proben mit ebener Geometrie gebildete Kalibrierung an den Kalibrierproben gute Ergebnisse liefert ($RMSE_{KDB\text{eben}}$: 0.067 mm), jedoch für die Proben mit konkaver oder konvexer Messstelle keine ausreichende Genauigkeit der Kalibrierergebnisse vorliegt ($RMSE_{\text{konkav}}$: 1.476 mm, $RMSE_{\text{konvex}}$: 0.494 mm).

Damit auch eine ausreichende Genauigkeit der Kalibrierung für die Proben mit konkaver oder konvexer Messstelle erreicht werden kann, muss auch das Prüfgrößenverhalten dieser Geometrien in der Kalibrierung berücksichtigt werden. Dies kann durch eine spezifische Auswahl der an der Kalibrierung beteiligten Prüfgrößen geschehen. Deshalb wurde bei der Erstellung eines weiteren linearen Kalibrierpolynoms die Auswahl der für die Regressionsanalyse zur Verfügung stehenden Prüfgrößen eingeschränkt. Bei diesen ausgewählten Prüfgrößen handelt es sich um solche, die trotz des Geometrieunterschieds ähnliches Verhalten über den Zielgrößenbereich aufweisen. Diese Einschränkung wurde durch manuelle Analyse des Prüfgrößenverhaltens an den ebenen, konkaven und konvexen Messstellen über den Zielgrößenbereich ermittelt. Die Analyse des Prüfgrößenverhaltens der Proben mit unterschiedlichen Geometrien zeigte, dass lediglich aus zwei der vier 3MA-Verfahren Prüfgrößen abgeleitet werden, die auch bei veränderter Geometrie ähnliche Abhängigkeiten beziehungsweise Tendenzen über den Zielgrößenbereich zeigen. Bei den beiden Verfahren handelt es sich um die Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke (siehe Kapitel 3.2.1) und um die Überlagerungspermeabilität (siehe Kapitel 3.2.3). Für die Überlagerungspermeabilität zeigten die Aufweitungsprüfgrößen (DH25u, DH50u und DH75u) und die abgeleitete Koerzitivfeldstärke (H_{Cu}) ähnliche Abhängigkeiten an den ebenen sowie gekrümmten Proben. Bei der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke stellten sich die Phasen-Prüfgrößen (P3, P5 und P7) und die Feldstärke-Prüfgrößen ab-

geleitet aus dem Oberwellensignal (H_{CO} , H_{RO}) als geeignete Prüfgrößen heraus. Zur Verdeutlichung der Analyse des Prüfgrößenverhaltens und der daraus folgenden Einschränkungen für die Regressionsanalyse sind in Abb. 95 exemplarisch das Verhalten zweier Prüfgrößen über den Zielgrößenbereich für die Proben mit ebener, konkaver und konvexer Messstelle dargestellt.

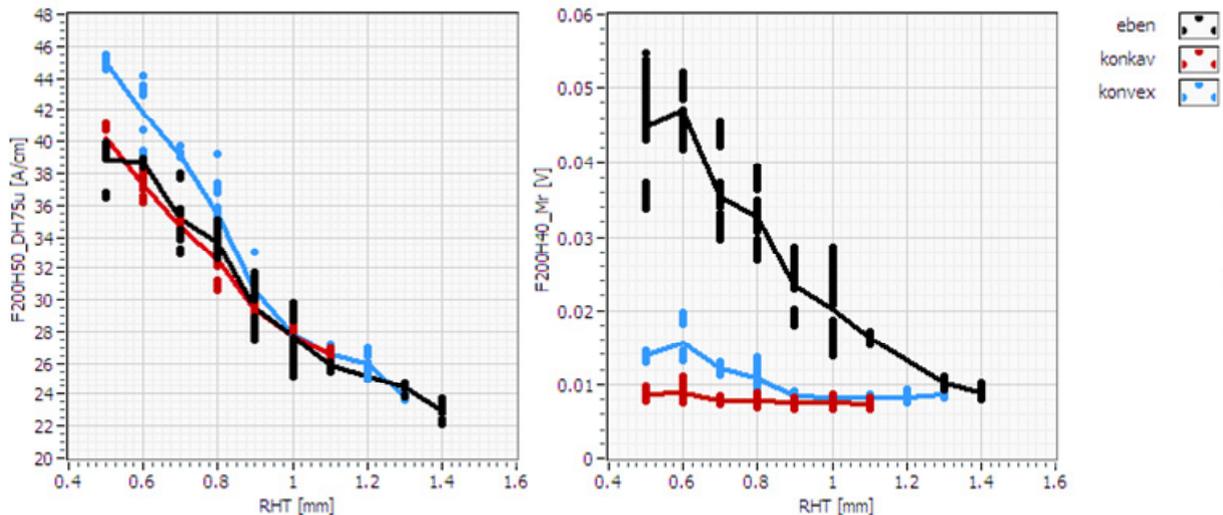


Abb. 95: Prüfgrößenverhalten der Prüfgröße DH75u (links) und M_R (rechts) bei 200 Hz Magnetisierungsfrequenz und Feldaussteuerung von 40 (rechts) beziehungsweise 50 A/cm (links)

Aus Abb. 95 wird deutlich, dass beide dargestellten Prüfgrößen für die ebenen Proben eine Abhängigkeit zur Zielgröße (RHT) zeigen. Die konkaven bzw. konvexen Proben zeigen jedoch nur in der Prüfgröße DH75u (Abb. 95 links) eine ähnliche Abhängigkeit wie die ebenen Proben. Im Gegensatz dazu zeigt die Prüfgröße M_R (Abb. 95 rechts) bei den konvexen und vor allem bei den konkaven Proben keine ähnliche Abhängigkeit. Diese Abhängigkeiten wurden manuell für alle 268 aufgenommenen Prüfgrößen analysiert. Anschließend wurden nur Prüfgrößen mit ähnlichem Verhalten für die ebenen, konkaven und konvexen Proben für die Regressionsanalyse verwendet. Die Regressionsanalyse wurde aber äquivalent zu dem Polynom aus Abb. 94 nur mit den an den ebenen Proben aufgenommenen Daten durchgeführt.

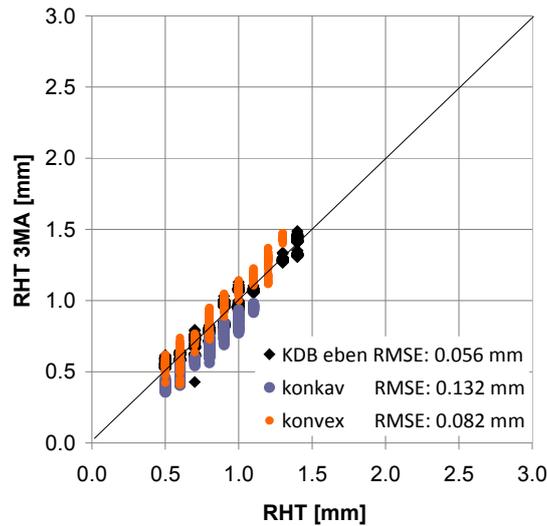


Abb. 96: *Kalibrierergebnis bei Anwendung eines linearen, mit ausgewählten Prüfgrößen der ebenen Proben gebildeten Polynoms auf die ebenen, konkaven und konvexen Proben*

Aus Abb. 96 wird deutlich, dass die Prüfgrößenauswahl keine wesentliche Verschlechterung des Kalibrierergebnisses an den ebenen Kalibrierproben hervorgerufen hat. Der RMSE-Wert ist ohne Prüfgrößeneinschränkung 0.067 mm (siehe Abb. 94) und mit Prüfgrößeneinschränkung 0.056 mm. Die Fehlerwerte der konkaven und konvexen Proben haben sich durch die Einschränkung jedoch deutlich verbessert. So ist für die konvexen Proben der RMSE-Wert von 0.494 mm auf 0.082 mm und für die konkaven von 1.476 mm auf 0.132 mm gesunken (vergleiche Abb. 94 und Abb. 96).

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Kalibrierergebnisses an Proben, deren Geometrie nicht mit derjenigen der Kalibrierproben übereinstimmt, ist die Anwendung der in Kapitel 4.3 vorgestellten polynomialen Approximation des Prüfgrößenraumes. Hierbei findet eine Anpassung des Prüfgrößenraumes der Proben ebener Geometrie auf den Raum der Proben mit konvexer oder konkaver Messstelle statt. Diese Übertragbarkeit der zur Prüfsystemkomponentenanpassung entwickelten Vorgehensweise zeigt sich beim Vergleich des Prüfgrößenverhaltens bei Geometrieänderung der Proben mit dem bei Prüfsystemkomponentenaustausch.

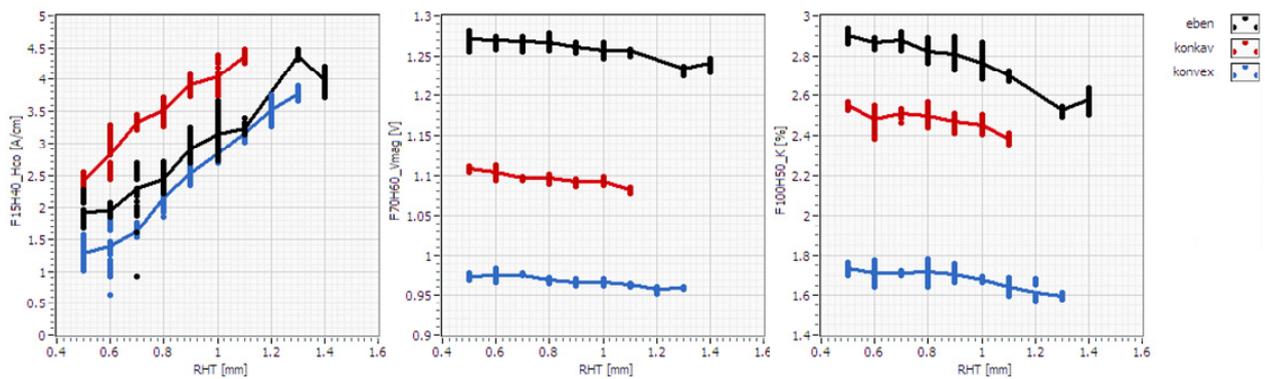


Abb. 97: Prüfgrößenverhalten bei Geometrieänderung der Proben (H_{CO} bei 15 Hz und 40 A/cm; V_{MAG} bei 70 Hz und 60 A/cm; K bei 100 Hz und 50 A/cm)

In Abb. 97 ist zur Verdeutlichung das Prüfgrößenverhalten für drei unterschiedliche Prüfgrößen dargestellt. Vergleicht man Abb. 95 und Abb. 97 mit dem Prüfgrößenverhalten bei Prüfsystemkomponentenaustausch (siehe Abb. 37 bis Abb. 46) werden die Ähnlichkeiten deutlich. In beiden Fällen handelt es sich um Offset-Verschiebungen, denen in einigen Prüfgrößen eine zusätzliche Phasen-Verschiebung des Prüfgrößenverhaltens über den betrachteten Zielgrößenbereich überlagert ist. Dies zeigt, dass sich die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes auch für die Anpassung an eine von den Kalibrierproben abweichende Probengeometrie anwenden lässt. Es ist in dieser Applikation notwendig, die konkaven und konvexen Geometrien separat anzupassen, da sich das Prüfgrößenverhalten dieser beiden Probengruppen in vielen Prüfgrößen stark unterscheidet (siehe Abb. 95 und Abb. 97). Durch die Anpassung des Prüfgrößenraumes der ebenen Kalibrierproben auf den Prüfgrößenraum einer anderen Geometrie findet eine Spezialisierung der Prüfaufgabe auf die neue Geometrie statt. So können nach der Anpassung des Prüfgrößenraumes von den Proben mit ebener Geometrie auf beispielsweise den Prüfgrößenraum von Proben mit konkaver Geometrie keine ebenen, sondern ausschließlich konkave Messstellen mit Hilfe des angepassten Raumes fehlerfrei charakterisiert werden. Dies stellt in dieser Applikation kein Problem dar, denn die Kalibrierung ohne Anpassung und ohne Prüfgrößenauswahl liefert an den Proben mit ebener Messstelle eine ausreichende Genauigkeit (siehe Abb. 94). Diese Kalibrierung kann somit für Proben ebener Geometrie verwendet werden. Für die beiden anderen Geometrien kann jeweils eine spezifische Anpassung mittels der polynomialen Approximation des Prüfgrößenraumes durchgeführt werden. Diese spezifischen Anpassungen für die Proben mit konkaver beziehungsweise konvexer Messstelle wurden unter Zuhilfenahme von jeweils drei gekrümmten Proben durchgeführt. In Tabelle 12 sind die dazu verwendeten Proben aufgelistet.

| konkav | | konvex | |
|--------|----------|--------|----------|
| Probe | RHT [mm] | Probe | RHT [mm] |
| 1 | 0.5 | 3 | 0.9 |
| 14 | 0.9 | 6 | 0.5 |
| 21 | 1.1 | 5 | 1.3 |

Tabelle 12 : Probenauswahl zur Anpassung der gekrümmten Proben

Es fand eine gezielte Probenauswahl statt, um den gesamten RHT-Wertebereich der gekrümmten Proben abzudecken. So wurde stets eine Probe aus dem unteren, mittleren und oberen Bereich des RHT-Spektrums der Proben mit konkaver beziehungsweise konvexer Messstelle ausgewählt. Die Auswahl der Proben ist vergleichbar mit der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Methode *Probenauswahl ausgehend vom Zielgrößenbereich*. In Abb. 98 sind die Kalibrierergebnisse an den konkaven und konvexen Proben nach Anpassungen mit unterschiedlichen Polynomgraden dargestellt.

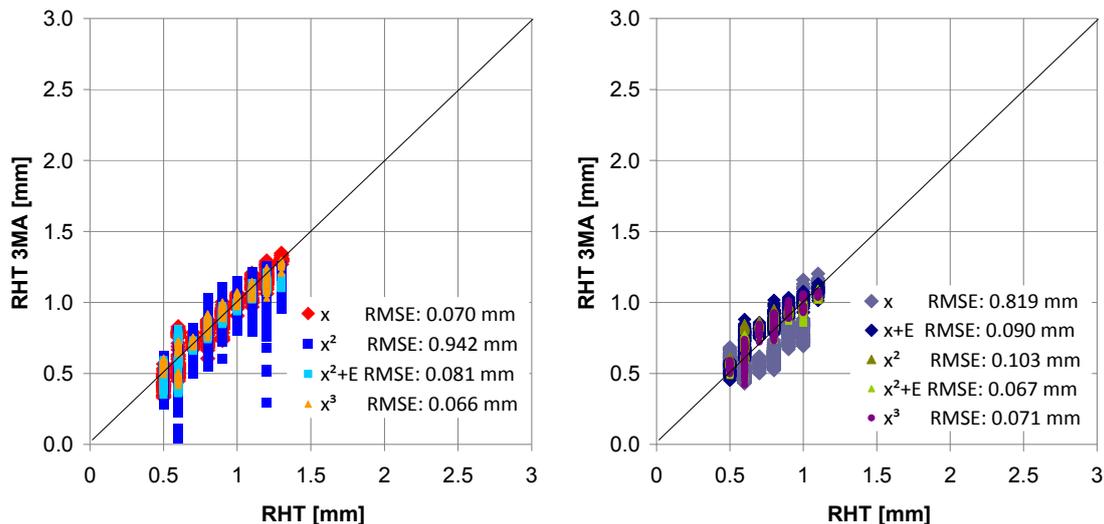


Abb. 98: Ergebnis nach Übertragung der Kalibrierung von den Proben mit ebener Messstelle auf Proben mit konvexer (links) und mit konkaver Messstelle (rechts)

In Abb. 98 sind Polynome bis maximal dritten Grades zur Anpassung des Prüfgrößenraumes verwendet worden, dies ist in der Legende durch x , x^2 und x^3 angegeben. Zusätzlich wurde bei einzelnen Anpassungen eine Prüfgrößeneinschränkung angewandt, indem einige Prüfgrößen für die Regressionsanalyse ausgeschlossen wurden. Dies fand äquivalent zu dem in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Vorgehen zur Vermeidung von Prüfgrößen in der angepassten Kalibrierung, die für zwei Prüfsystemkomponenten Unstetigkeiten oder keine Abhängigkeiten zeigen, statt. Damit der Einfluss der Prüfgrößeneinschränkung deutlich wird, sind sowohl die Kalibrierergebnisse ohne als auch mit Prüfgrößenausschluss dargestellt. Die Anpassungen, bei denen für die Regressionsanalyse Prüfgrößen ausgeschlossen waren, sind in der Legende von Abb. 98 mit dem Zusatz „+E“ gekennzeichnet. In Abb. 98 sind in der Legende zusätzlich die RMSE-Werte der angepassten Kalibrierergebnisse dargestellt. Vergleicht man die Kalibrierergebnisse an den gekrümmten Proben ohne Berücksichtigung der unterschied-

lichen Geometrien (siehe Abb. 94) mit den Ergebnissen nach der geometriespezifischen Anpassung des Prüfgrößenraumes (siehe Abb. 98), wird die Verbesserung deutlich. Jedoch ist das Ausschließen einiger Prüfgrößen für die Regressionsanalyse notwendig, um eine möglichst gute Genauigkeit zu erhalten (vergleiche Abb. 98 (links) x^2 mit x^2+E beziehungsweise Abb. 98 (rechts) x mit $x+E$ und x^2 mit x^2+E).

5.5 Bewertung der Lösungswege

Die drei in Kapitel 4 *Lösungswege zur Einflussminimierung bei Prüfsystemkomponentenaustausch* beschriebenen Vorgehensweisen zeigen nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch an den im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Applikationen unterschiedliche Ergebnisse.

Die Anpassung der Kalibrierung nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch durch eine Optimierung mit genetischen Algorithmen (siehe Kapitel 4.4) ist nur für den Fall einer Mustererkennung als Kalibrieremethode anwendbar. Neben dieser Spezialisierung ist auch die Ungewissheit über die zur Anpassung benötigte Zeit für die Anwendung der Optimierung ungünstig (siehe Kapitel 5.3). Denn es kann keine gesicherte Aussage über die Zeit, die für die jeweilige Optimierung benötigt wird, getroffen werden, da die Gewichte für die einzelnen Prüfgrößen über eine Zufallsvariation optimiert werden und so die Zeit bis zum Finden eines Optimums nicht beeinflusst werden kann (siehe Kapitel 0). Wird jedoch ein Optimum gefunden, so stellt sich eine Verbesserung der Kalibrierergebnisse nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch ein (siehe Kapitel 5.3). Dies wird vor allem daran verdeutlicht, dass nach erfolgreicher Optimierung alle Messungen an den Kalibrierproben von der angepassten Mustererkennungsdatenbank erkannt und charakterisiert werden (siehe Abb. 89 bis Abb. 92). Davor konnten in mehreren Anwendungen keine Messungen an den Kalibrierproben mit Prüfsystemen, an denen Prüfsystemkomponenten ausgetauscht wurden, charakterisiert werden. Da aber keine abgesicherten Aussagen über die benötigte Optimierungsdauer getroffen werden können und diese nur auf Mustererkennungskalibrierungen angewandt werden kann, ist diese Vorgehensweise kaum praxisnah einsetzbar.

Anders verhält es sich bei der Verwendung von Differenzprüfgrößen zur Anpassung nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch. Dieser Lösungsweg kann unabhängig von der Kalibrieremethode eingesetzt und innerhalb kürzester Zeit umgesetzt werden. Der Rechenaufwand zur Bildung der Differenzprüfgrößen durch Subtraktion zweier Messungen ist so gering, dass er bei jeder 3MA-Messung vollzogen werden kann. Die Verwendung von Differenzprüfgrößen zeigt für alle Anwendungen Verbesserungen in den Kalibrierergebnissen nach Prüfsystemkomponentenaustausch (siehe Kapitel 5.1). Die Verbesserungen werden bei Verwendung einer Mustererkennung als Kalibrieremethode am deutlichsten, denn vor der Verwendung von Differenzprüfgrößen konnten nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch in mehreren Applikationen keine Messung an den Kalibrierproben charakterisiert werden (siehe zum Beispiel Abb. 29 (links) oder Abb. 31 (links)). Durch die Differenzprüfgrößen werden trotz Austausch einer Prüfsystemkomponente alle Messungen erkannt (siehe Abb. 70 (links) oder Abb. 71 (links)). Dies ist allerdings nur für Prüfgeräte (siehe Abb. 73) und

Sensoren der zweiten Generation der Fall. Werden Sensoren der ersten Generation untereinander oder durch einen der zweiten Generation ersetzt, können nicht immer alle Messungen mit der eingewechselten Komponente erkannt werden (siehe Abb. 70 (rechts) oder Abb. 71 (rechts)). Aber auch bei der Verwendung einer Regressionsanalyse zur Kalibrierung stellen sich nach Prüfsystemkomponentenaustausch durch Differenzprüfgrößen deutliche Verbesserungen in der Zielgrößenbestimmung ein (vergleiche zum Beispiel Abb. 26 mit Abb. 66). Zur Differenzprüfgrößenbildung sollte eine Kalibrierprobe verwendet werden, obwohl gezeigt werden konnte, dass für Sensoren der zweiten Generation zum Beispiel auch eine standardisierte Härtevergleichsplatte verwendet werden kann (siehe Abb. 67 und Abb. 68 jeweils rechts). Denn durch die Verwendung einer Kalibrierprobe ist sichergestellt, dass die in der jeweiligen Anwendung verwendete Sensorik an der Probe Messdaten aufnehmen kann. Spezialsensoren sind oftmals nur an speziellen Probengeometrien einsetzbar und sind somit zum Beispiel an einer Härtevergleichsplatte nicht einsetzbar (siehe Abb. 15 und Abb. 34).

Bei der polynomialen Approximation zur Anpassung einer Kalibrierung nach Prüfsystemkomponentenaustausch sind mehrere Punkte zu bewerten. Dazu zählen der ausgewählte Anpassungsablauf (siehe Abb. 59), die zur Anpassung zu verwendenden Proben (siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.2), der zu verwendende Polynomgrad und der Einfluss der Prüfgrößeneinschränkung beziehungsweise -richtung (siehe jeweils Kapitel 5.2).

Der in Abb. 59 dargestellte Ablauf für eine Anpassung durch Approximation des Prüfgrößenraumes wurde gewählt, um nach Prüfsystemkomponentenaustausch mit unveränderten Prüfgrößenwerten arbeiten zu können. Wäre der Ablauf in der Art geändert worden, dass der Prüfgrößenraum nach Austausch auf den Raum vor dem Prüfsystemkomponentenaustausch durch Approximation angepasst wird, wäre dies nicht der Fall. In diesem Fall müssten bei jeder Messung stets die Approximationspolynome dazu verwendet werden, die Prüfgrößenwerte des veränderten Prüfsystems auf die vorherigen Werte umzurechnen. Mit diesen umgerechneten Werten könnte im Falle einer Kalibrierung mittels Regressionsanalyse das ursprüngliche Polynom verwendet werden. Dies würde aber entweder zur doppelten Anzahl an Prüfgrößen oder zum Verwerfen der unveränderten Prüfgrößenwerte führen. Verwendet man aber den in Abb. 59 dargestellten Ablauf, werden keine zusätzlichen Prüfgrößen generiert und es können zum besseren physikalischen Verständnis die unverfälschten Prüfgrößenwerte verwendet werden. Dadurch besteht eine bessere Möglichkeit, Fehlmessungen anhand von physikalischen Zusammenhängen zu erkennen. Zusätzlich wird, ohne dass für eine Prüfgröße Werte mit und ohne Approximation vorliegen, die Verwechslung der Prüfgrößenwerte als Fehlerquelle ausgeschlossen. Ein weiterer Vorteil des gewählten Ablaufs liegt in der Möglichkeit, dass so Prüfgrößen, die für zwei Prüfsystemkomponenten unkorreliertes Verhalten zeigen (siehe Abb. 60), von der Kalibrierung ausgeschlossen beziehungsweise

entsprechend gewichtet in die Kalibrierung eingehen können (siehe Kapitel 4.3.3). Dies wäre nicht der Fall, wenn die Kalibrierung vor Prüfsystemkomponentenaustausch durch Umrechnung der Prüfgrößenwerte danach weiter verwendet würde. Derartige Prüfgrößen könnten jedoch in der weiter verwendeten Kalibrierung sowohl für eine Mustererkennung als auch für ein Regressionspolynom, in dem eine solche Prüfgröße ausgewertet wird, zu einer Verschlechterung der Ergebnisse führen.

Die beiden in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 beschriebenen Methoden zur Probenauswahl haben in den Industrieapplikationen zu erfolgreichen Anpassungen nach einem Komponentenaustausch geführt (siehe Kapitel 5.2). Da sich keine der beiden Methoden als die eindeutig Bessere erwiesen hat, ist die Auswahl der Methode nach einem anderen Gesichtspunkt notwendig. Da der Anteil der 16 Prüfgrößen aus der Mehrfrequenzwirbelstromimpedanzanalyse im Vergleich zu den 41 mit allen vier Prüfverfahren aufgenommenen Größen der Stärkste ist und somit die Auswahl über den Prüfgrößenbereich maßgeblich beeinflusst, ist die Auswahl über den Zielgrößenbereich vorzuziehen. Die zur Anpassung zu verwendende Probenanzahl ist abhängig von dem zur Verfügung stehenden Kalibrierprobensatz. Die Gesamtanzahl der Kalibrierproben schwankt abhängig von der Applikation (vergleiche **Anwendung 3** (100 Proben) mit **Anwendung 4** (11 Proben)). Zusätzlich ist zu beachten, dass nicht zu viele der Kalibrierproben bei einem Prüfsystemkomponentenaustausch verwendet werden sollten, da dies sonst einer Neukalibrierung nahe kommt. Deshalb sollten als Obergrenze nicht mehr als 10-20 % der Kalibrierproben verwendet werden. Als Minimalanzahl sollten aber unabhängig von den soeben angegebenen prozentualen Anteilen drei Proben aus dem Kalibrierprobensatz verwendet werden, da sonst wegen fehlender Stützstellen keine polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes vorgenommen werden kann. Es konnte in Kapitel 5.2 gezeigt werden, dass sich nach einer Anpassung mit der Minimalauswahl von drei Proben in allen Applikationen Verbesserungen nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch eingestellt haben. Die dadurch erreichten Genauigkeiten lagen in allen Applikationen im Bereich der Streuung der jeweiligen Referenzmethode. Für **Anwendung 3** konnte in diesem Kapitel ebenfalls gezeigt werden, dass sich durch eine größere Anzahl an Proben zwar eine Verbesserung gegenüber der Minimalanzahl einstellen kann, man aber auch mit der Minimalanzahl ausreichende Genauigkeiten erzielt (zum Beispiel: $RMSE_{20 \text{ Proben}}: 1,268 \text{ HRC}$; $RMSE_{3 \text{ Proben}}: 1,852 \text{ HRC}$).

In allen Anwendungen wurde der Polynomgrad zur Approximation des Prüfgrößenraumes mindestens von eins bis drei variiert. Es wurden lediglich in **Anwendung 3**, wegen der ausreichenden Anzahl von Kalibrierproben und somit ausreichend vielen Stützstellen, der Grad der Polynome bis acht erhöht. Lineare und quadratische Polynome erzielten hierbei unabhängig von der Anwendung die größten Genauigkeiten nach einem Komponentenaustausch (siehe Kapitel 5.2). Für den Fall, dass ein Prüfgerät ausgetauscht wird, sind unabhängig von

der Kalibriermethode lineare Polynome zur Anpassung am besten geeignet (siehe Abb. 79 und Abb. 85 bis Abb. 88). Werden zwei Sensoren der ersten Generation beziehungsweise ein Sensor der ersten durch einen der zweiten Generation ausgetauscht, so sind in der Regel quadratische Polynome für die Approximation des Prüfgrößenraumes von Vorteil (siehe Abb. 76 bis Abb. 78 und Abb. 83). Werden Sensoren der zweiten Generation untereinander ausgetauscht, können auch lineare Polynome zur Anpassung die genauesten Ergebnisse liefern (siehe Abb. 76 bis Abb. 78 und Abb. 83). Speziell bei einer Mustererkennung als Kalibriermethode kann durch die in Kapitel 4.3.3.1 beschriebene zusätzliche Wichtung der Prüfgrößen eine weitere Verbesserung erreicht werden. Dies zeigt sich in Abb. 78 und im Vergleich zwischen Abb. 81 mit Abb. 82 dadurch, dass nach der zusätzlichen Wichtung alle Messungen an den Kalibrierproben charakterisiert werden können. Es stellt sich aber dadurch keine Verschlechterung in der Genauigkeit ein. Ähnlich verhält es sich bei einer Regressionsanalyse als Kalibriermethode. Hier findet anstatt einer Wichtung eine Prüfgrößen-einschränkung statt (siehe Kapitel 4.3.3.1). Diese führt zu keiner signifikanten Veränderung im Ergebnis (siehe Abb. 77 und Abb. 83) aber in vielen Fällen zu Verbesserungen (siehe Abb. 80).

Grundsätzlich können Prüfgeräte und Sensoren der zweiten besser als Sensoren der ersten beziehungsweise zweier unterschiedlicher Generationen untereinander ausgetauscht werden. Dies ist auf das unterschiedliche Prüfgrößenverhalten und auf die unterschiedlich starken Streuungen in einzelnen Prüfgrößen der beiden Sensorgenerationen zurückzuführen (siehe Abb. 37 bis Abb. 41).

Damit nach dem Austausch einer Prüfsystemkomponente eine Anpassung erfolgen kann, muss ab der ersten Kalibrierung des Prüfsystems ein Teil der Kalibrierproben zur Anpassung ausgewählt und archiviert werden. Zur Absicherung und Validierung der Anpassung sollten zusätzlich noch weitere Kalibrierproben archiviert werden. Diese sollten von den Referenzwerten her zwischen den Proben zur Anpassung liegen und somit den Zielgrößenbereich abdecken, da dadurch die Anpassung nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch über den gesamten Zielgrößenbereich bewertet und validiert werden kann. Bei der Archivierung ist darauf zu achten, dass die Proben keinerlei Veränderungen wie zum Beispiel Korrosion oder Deformation während der Archivierung erfahren dürfen. Denn sonst ist nicht gewährleistet, dass nach einem Komponentenaustausch unter identischen Randbedingungen und an den gleichen Messstellen Daten aufgenommen werden können. Speziell bei der Referenzwertermittlung an den Kalibrierproben muss berücksichtigt werden, dass danach noch an den gleichen Messstellen wie zuvor Daten aufgenommen werden müssen. Dadurch müssen abhängig davon, ob zerstörende Referenzwerte ermittelt werden, von Beginn an auch Kalibrierprobenzwillinge gefertigt beziehungsweise alternative Messstellen vorgesehen und vermessen werden (siehe Kapitel 4).

Ist dies der Fall, kann nach der in Abb. 99 systematisch dargestellten Vorgehensweise zunächst mit Hilfe der ausgewählten Kalibrierproben ermittelt werden, ob eine Anpassung nach einem Komponentenaustausch notwendig ist. Gegebenenfalls kann anschließend eine Anpassung erfolgen. Ob eine Anpassung notwendig ist, wird durch Vergleich der zerstörungsfrei ermittelten Zielgrößenwerte mit den bekannten Referenzwerten der Kalibrierproben (Ergebniskontrolle) und durch die in Kapitel 4.1 vorgestellte Variationsrechnung ermittelt. Ist für den jeweiligen Anwendungsfall die Genauigkeit nach dem Austausch nicht mehr ausreichend, müssen an den zur Anpassung ausgewählten Kalibrier- und Validierproben Daten unter Kalibrierbedingungen aufgenommen werden. Anschließend werden die Anpassungen durchgeführt (Differenzprüfgrößen, polynomiale Approximation (linear und quadratisch, mit und ohne Einschränkung)) und mit den zusätzlichen und den zur Anpassung ausgewählten Proben validiert. Die Validier- und Kalibrierergebnisse werden danach für alle Anpassungen präsentiert. Die Anpassung mit der größten Genauigkeit kann ausgewählt werden. Dadurch wird abgesichert, dass stets die für die jeweilige Applikation fehlerfreiste Anpassung ausgewählt wird. Da so die Güte der angepassten Kalibrierungen festgestellt wird, können nicht ausreichend genaue Anpassungen verworfen werden, und es ist sichergestellt, dass keine derartigen Kalibrierungen verwendet werden.

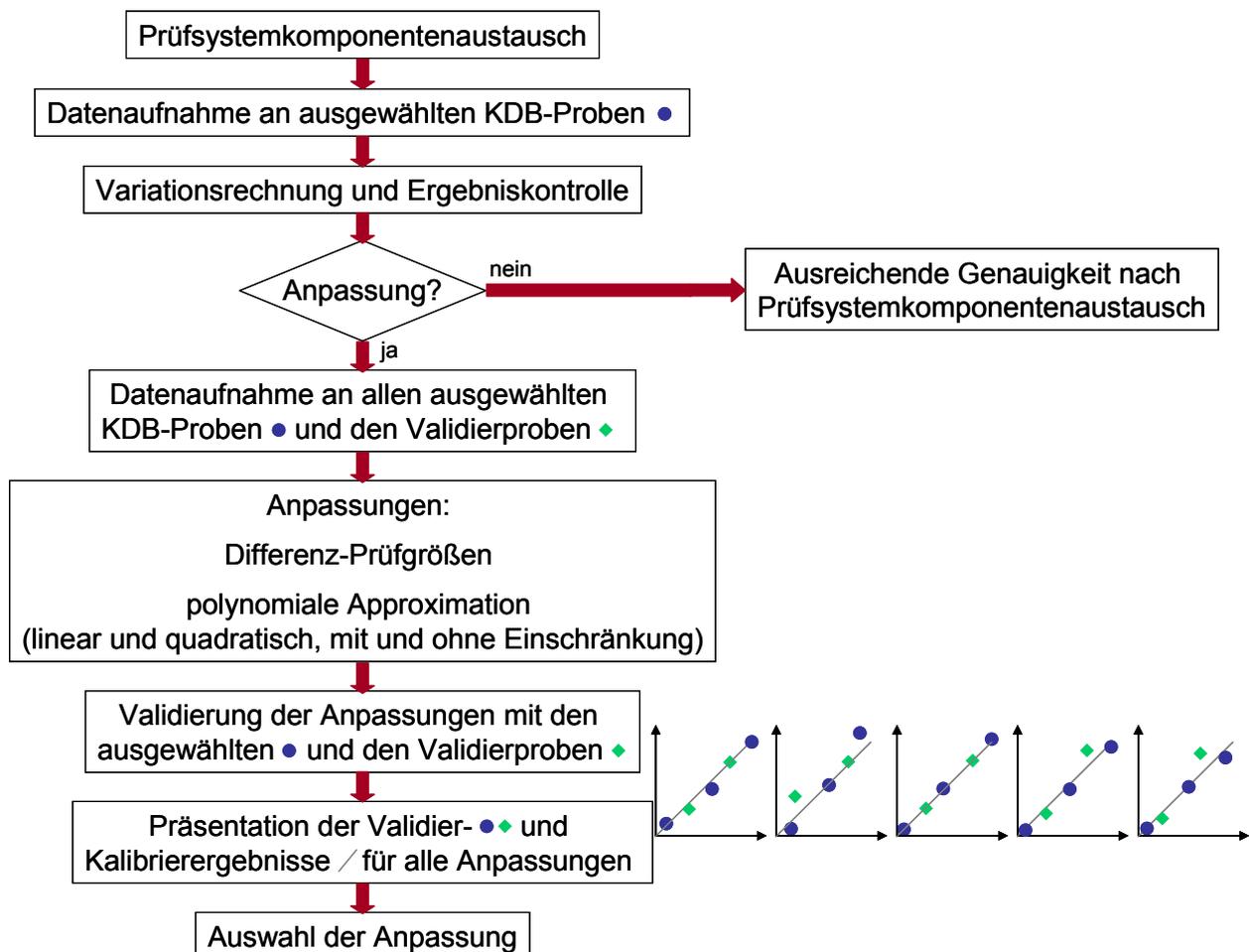


Abb. 99: Vorgehensweise nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch

Die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes kann aber auch wie in Kapitel 5.4 erläutert zum Anpassen von Kalibrierungen auf andere Probengeometrien verwendet werden. Hierbei ist zu beachten, dass eine derartige Anpassung exklusiv für die jeweilige Geometrie ausgeführt wird und somit zum Beispiel nicht konkave und konvexe Proben mit einer Kalibrierung charakterisiert werden können. In wie weit zum Beispiel Variationen der Geometrie bei konvexen oder konkaven Proben nach einer Anpassung toleriert werden, muss in weiteren Untersuchungen noch geklärt werden. Unabhängig davon birgt die Möglichkeit, Kalibrierungen auf andere Probengeometrien übertragen zu können, ein noch großes Anwendungspotential in der Praxis. Denn dadurch könnten, wenn auch exklusiv für jede Geometrie, mit nur einer Kalibrierung und entsprechend vielen Anpassungen verschiedenste Bauteile gleicher Fertigungsart zerstörungsfrei charakterisiert werden, ohne für jedes Bauteil einen vollständigen Kalibrierprobensatz herstellen zu müssen. Dies stellt eine Kostenersparnis dar, die zur Weiterverbreitung der Prüftechnik in der Industrie beitragen kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, praxisnahe Lösungswege für sensor- und geräteunabhängige beziehungsweise übertragbare Kalibrierungen zerstörungsfreier elektromagnetischer 3MA-Prüfsysteme zu ermitteln, zu untersuchen und umzusetzen. Dadurch sollten Möglichkeiten gefunden werden, einen Austausch einer Prüfsystemkomponente ohne vollständiger Neukalibrierung zu ermöglichen. Ohne derartige Anpassungsmöglichkeiten kann ein Sensor- oder Prüfgeräteaustausch dazu führen, dass die Kalibrierung danach keine ausreichende Genauigkeit mehr aufweist und eine Neukalibrierung mit dem veränderten Prüfsystem stattfinden müsste.

Nachdem die Auswirkungen von Sensor- und Gerätewechseln dokumentiert und analysiert wurden, sind drei unterschiedliche Lösungswege entwickelt worden. Dabei handelt es sich um die Anpassung durch Verwendung von Differenz-Prüfgrößen, durch polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes und durch Optimierung mittels genetischer Algorithmen. Alle Lösungswege wurden in das am Fraunhofer IZFP entwickelte modulare Messsystem (mms) integriert. Anschließend wurden die Lösungswege an Applikationen aus der industriellen Praxis und Forschung angewandt und dokumentiert. Im Rahmen dieser Applikationen konnte das exzellente Potential der 3MA-Prüftechnik zur zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung gezeigt werden und die Lösungswege validiert werden.

Der Lösungsweg, der die evolutionstheoriebasierenden **genetischen Algorithmen** verwendet, überführt das Anpassungsproblem in ein Optimierungsproblem. Indem Messdaten, die nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch an einer Auswahl von Kalibrierproben aufgenommen wurden, dazu verwendet werden, die Prüfgrößen in einer Mustererkennungsdatenbank so zu wichten, dass mit dieser Datenbank alle Messungen mit dem veränderten Prüfsystem charakterisiert werden können. Diese Methode zeigte Verbesserungen nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch. Sie kann aber wegen ihrer Einschränkung auf Mustererkennungskalibrierungen und der nicht abschätzbaren Optimierungsdauer nur bedingt praxisnah eingesetzt werden.

Anders verhält es sich bei der Verwendung von **Differenz-Prüfgrößen**. Hier werden relative Prüfgrößen durch Subtraktion einer prüfsystemspezifischen Referenzmessung erzeugt und zur Kalibrierung verwendet. Dieser Lösungsweg ist unabhängig von der verwendeten Kalibriermethode und innerhalb von kürzester Zeit einsetzbar. Zur Differenzbildung ist im Gegensatz zu den beiden anderen Lösungswegen lediglich eine beliebige Probe des Kalibrierprobensatzes notwendig. Die Differenz-Prüfgrößen führten zu deutlichen Verbesserungen nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch. In einigen Applikationen konnten durch die relativen Prüfgrößen sowohl Prüfgeräte als auch Sensoren der zweiten Generation (unterschei-

den sich durch eine modernere Hallsonde von der ersten Generation) unabhängig von der Kalibriermethode ausgetauscht werden, so dass die Genauigkeiten im Bereich der jeweiligen Referenzmethode lagen. Wurden jedoch Sensoren der ersten Generation untereinander beziehungsweise der ersten durch die der zweiten Generation ausgetauscht, konnten nicht immer ausreichende Genauigkeiten jedoch stets enorme Verbesserungen erzielt werden.

Die **polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes** zeigt zwar abhängig von den Sensorgenerationen auch deutliche Unterschiede im Anpassungsergebnis, kann aber eine Mischung der Sensorgenerationen besser kompensieren. Bei diesem Lösungsweg wird der Prüfgrößenraum der ausgetauschten Komponenten auf den der eingewechselten durch Polynome angepasst. Die Polynome werden aus Messdaten, die an einer Auswahl von Kalibrierproben nach Austausch der Komponente (Sensor oder Prüfgerät) aufgenommen wurden, für jede Prüfgrößendimension generiert. Die Genauigkeiten der Kalibrierungen nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch sind für Prüfgeräte und Sensoren der zweiten Generation untereinander in grob der gleichen Größenordnung wie vor dem Wechsel. Sind Sensoren der ersten Generation beteiligt, so sind die Ergebnisse nach einer Anpassung stets kleiner als der Fehler der sich ohne Anpassung einstellt. Gegenüber Sensoren der zweiten Generation findet im Schnitt aber eine Verdopplung des Fehlers statt. Nach einer Anpassung durch polynomiale Approximation sind in der Regel Genauigkeiten erreicht worden, die im Rahmen oder sogar unterhalb der Streuung der jeweiligen Referenzmethode lagen.

Dieser Lösungsweg konnte auch auf die Problematik der Geometrieabhängigkeit von elektromagnetischen Kalibrierungen übertragen werden. Durch die polynomiale Approximation des Prüfgrößenraumes konnte eine Kalibrierung, die an ebenen Proben aufgenommen wurde, sowohl auf konkave als auch auf konvexe Proben erfolgreich angepasst werden. Die Genauigkeit der jeweils auf die konkaven, beziehungsweise konvexen Probengeometrien angepassten Kalibrierungen entspricht derjenigen der ebenen Kalibrierung. Es konnten aber auch unabhängig von einer Anpassung Prüfgrößen ermittelt werden, die sowohl an den ebenen als auch an den gekrümmten Proben Abhängigkeiten mit der Zielgröße (RHT) zeigen. Mit diesen Prüfgrößen konnte eine Kalibrierung erstellt werden, die sowohl die ebenen als auch die gekrümmten Geometrien bezüglich der RHT charakterisieren kann. In zukünftigen, weiterführenden, systematischen Untersuchungen sollte ermittelt werden, ob, beziehungsweise wie eine Variation der Geometrie (zum Beispiel: Variation der Radien) in beiden Fällen toleriert oder kompensiert werden kann. Die Übertragbarkeit der Kalibrierung auf unterschiedliche Probengeometrien steigert aber unabhängig davon das Anwendungspotential der 3MA-Prüftechnik in der Industrie, da so Kosten und Aufwände für die Herstellung von Kalibrierprobensätzen eingespart, beziehungsweise minimiert werden können.

Durch eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise nach einem Prüfsystemkomponentenaustausch kann sichergestellt werden, dass die bestmögliche Anpassungsopti-

on für die jeweilige Kalibrierung gefunden und umgesetzt wird. Dadurch wurde das Ziel eines Prüfsystemkomponentenaustausches ohne anschließende vollständige Neukalibrierung des Prüfsystems erreicht. Denn es konnte durch Aufgabenstellungen aus der industriellen Praxis und Forschung gezeigt werden, dass durch diese Vorgehensweise zerstörungsfreie, elektromagnetische Kalibrierungen des 3MA-Prüfsystems auch nach einem Komponentenaustausch ausreichende Genauigkeiten liefern.

In weiterführenden, zukünftigen Untersuchungen sollte versucht werden, den Differenzprüfgrößenansatz mit dem der polynomialen Approximation des Prüfgrößenraums zu kombinieren. Dazu muss in einer zukünftigen Version des modularen Messsystems darauf geachtet werden, dass Datentypen verwendet werden, die auch nach einer Differenzbildung noch eine ausreichende Präzision aufweisen. Dadurch würde auch ein Umgang mit kleinsten Zahlenwerten zu keinem Genauigkeitsverlust führen. Zusätzlich sollten Anstrengungen in Richtung einer selbstständigen Anpassung von Kalibrierungen unternommen werden, so dass ein 3MA-Prüfsystem selbständig Kontrollmessungen an Kalibrierproben fordert, bewertet und diese gegebenenfalls zur Anpassung verwendet, beziehungsweise nach weiteren Referenzmessungen an anderen Proben eine Anpassung durchführt.

7 Literaturverzeichnis

- [AkiRi1980] Aki, K.; Richards, P.G.: „Quantitative Seismology: Theory and Methods“, Band 2, W.H. Freeman and Company, New York, USA, 1980
- [Alber1999] Albers, S.; Skiera, B.: Vorabversion des Beitrags: „Regressionsanalyse“ Hermann, A. ; Homburg, C.: Marktforschung Grundlagen Methoden Anwendungen, Wiesbaden, S. 205 - 236, 1999
- [Altpe1990] Altpeter, I.: „Spannungsmessung und Zementitgehaltsbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer Messgrößen“, Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, IZFP-Bericht: 900111-TW, 1990
- [Altpe1995] Altpeter, I.; Dobmann, G.; Kern, R.; Theiner, A.W.: „Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung“, Patent Nr. EP0683393, 1995
- [Altpe1997] Altpeter, I.; Becking, R.; Hartmann, S.; Kern, R.: „Erfassung von thermisch induzierten Eigenspannungen mit temperatur- und lastspannungsabhängigen Barkhausenrauschmessungen“, IZFP-Bericht Nr. 970136-TW, IZFP Saarbrücken, 1997
- [Altpe1998] Altpeter, I.; Bender, J.; Hoffmann, J.; Kopp, M.: „Barkhausen- und Wirbelstrommikroskopie, eine neue Rastersondentechnik zur Werkstoffcharakterisierung im Mikrometerbereich“, DGM: Fortschritte in der Metallographie, DGM Informationsgesellschaft (Sonderbände der Praktischen Metallographie 29), Frankfurt, 1998
- [Altpe2000] Altpeter, I.; Kühn, S.; Kopp, M.; Arnold, W.; Kröning, M.; Zehetbauer, M.: „Grundlegende Untersuchungen zur Eigenspannungsmessung im Mikrometerbereich durch Korrelation magnetischer Prüfgrößen mit experimentell ermittelten Dehnungs- und Spannungsfeldern“, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2000 ZfP im Übergang zum 3. Jahrtausend, DGZfP-Berichtsbände 73.1, Berlin, 2000
- [Altpe2002] Altpeter, I.; Becker, R.; Dobmann, G.; Kern, R.; Theiner, W.A.; Yashan, A.: „Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation“, Inverse problems 18, p. 1907-1921, 2002
- [Altpe2006] Altpeter, I.; Kopp, M.; Kröning, M.; Milch, M.; Schäffner, C.; Behrens, B.A.: „Influences on the Part Quality in Conventional Deep Drawing Processes“, European Federation for Non-Destructive Testing (EFNDT): European Con-

- ference on Nondestructive Testing Z9), DGZfP-Jahrestagung 2006, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Berlin, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2006
- [Altpeter2010] Altpeter, I.; Dobmann, G.; Hübschen, G.; Rabung, M.; Tschuncky, R.: „Zerstörungsfreie Charakterisierung der neutroneninduzierten Versprödung in Reaktordruckbehältern mittels elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüftechniken“, DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.05.2010
- [Altpeter2010] Altpeter, I.; Dobmann, G.; Hübschen, G.; Tschuncky, R.: „Nondestructive Characterization of Neutron Induced Embrittlement in Nuclear Pressure Vessel Steel Microstructures by using Nondestructive Electromagnetic Testing“, NDE' 2010 - The 8th Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Berlin, 30.09-01.10.2010
- [Bähre2010] Bähre, D.; Becker, D.; Tschuncky, R.: „Analysis of Influences on Occurrence of Magnetism during Cutting Processes“, Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting HPC Vol.1, Gifu/Japan, S. 19-22, 24 - 26.10.2010
- [Bähre2011] Bähre, D.; Trapp, K.; Altpeter, I.; Tschuncky, R.: „Occurrence of Magnetism due to Milling of Steel“, to be published in Proceedings of the 61th CIRP General Assembly, Budapest/Hungary, 21 - 27.08.2011
- [Barkhausen1919] Barkhausen, H.: „Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen“, Physikalische Zeitschrift 20, S. 401-403, 1919
- [Behrens2005] Behrens, B.; Yun, J.; Schäffner, C.; Sundkötter, C.; Kröning, M.; Altpeter, I.; Kopp, M.: „Influences on the Part Quality in Conventional Deep Drawing Processes“, Hagen von, I. (Ed.) ; Wieland, H.-J. (Ed.): Steel - Future for the Automotive Industry: Proceedings: Steels in Cars and Trucks 2005, Düsseldorf: Stahleisen, S. 144-151, 2005
- [Biondi2003] Biondi, B.: „Imaging of complex structures by reflection seismic data: state-of-the-art and road ahead“, Commission on Controlled-Source Seismology (CCSS): Deep Seismic Methods, 12th International Workshop, Mountain Lake, Virginia, USA, 2003
- [Biondi2006] Biondi, B.: „3D Seismic Imaging: Three Dimensional Seismic Imaging (Investigations in Geophysics)“, Society of Exploration, ISBN 1560801379, USA, 2006

- [BlumJ1974] Blume, J.: „Statistische Methoden für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band I: Grundlagen, Beurteilung von Stichproben, einfache lineare Regression, Korrelation“, ISBN 3-18-403041-5, VDI Verlag, Düsseldorf, 1974
- [Blume1974] Blume, J.: „Statistische Methoden für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band II: Verteilungstests, einfache nichtlineare und mehrfache Regression, partielle Korrelation, Folgetests und Qualitätskontrolle“, ISBN 3-18-403041-5, VDI Verlag, Düsseldorf, 1974
- [Borsu2010] Borsutzki, M.; Thiessen, R.G.; Altpeter, I.; Dobmann, G.; Hübschen, G.; Tschuncky, R.; Zielasko, K.: „Nondestructive Characterisation of Damage Evolution in advanced high Strength Steels“, 18th European Conference on Fracture, ECF18, Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale, ICF Interquadrennial Conference of The International Congress on Fracture, Dresden Germany, 30.08 – 03.09.2010
- [Brori2002] Brosius, F.: „SPSS 11“, , Bonn: mitp-Verlag, 2002
- [Cherv1997] Chevreux, B.: „Genetische Algorithmen zur Molekülstrukturoptimierung“, Universität Heidelberg/Fachhochschule Heilbronn/Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg, 1997
- [Culli1972] Cullity, B.D.: „Introduction to magnetic materials“, Addison-Wesley - ISBN 0-201-01218-9, 1972
- [Dobma1988] Dobmann, G.; Pitsch, H.: „Verfahren zum zerstörungsfreien Messen magnetischer Eigenschaften eines Prüfkörpers sowie Vorrichtung zum zerstörungsfreien Messen magnetischer Eigenschaften eines Prüfkörpers“, deutsches Patent DE3037932A1, 23. April 1988
- [Dobma2000] Dobmann, G.; Kern, R.: „Micro-Magnetic, Multiple-Parameter, Microstructure and Stress Analysis - 3MA - For Non-Destructive Material Properties Determination and Ageing Prediction“, Debarberis, L. (Hrsg.), Acosta, B. (Hrsg.), Weimann, G.H. (Hrsg.): AMES-NDT-Workshop, Salzburg: Austrian Research Centers, Beitrag 15, 2000
- [Dobma2008] Dobmann, G.: „Non-Destructive Microstructure Characterization of Materials States after Thermal Ageing, Fatigue Loads and Neutron Irradiation - a State of the Art Report from the German Nuclear Safety Research Program“, Mayr, P. (Ed.) ; Posch, G. (Ed.): International Institute of Welding (iiw): International Conference on Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry, Cedex (France), S. 647-654, 2008

- [DobmG2008] Dobmann, G.; Altpeter, I.; Wolter, B.; Kern, R.: „Industrial Applications of 3MA - Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis“, Romanian Welding Society: 5th International Conference Structural Integrity of Welded Structures, Timisoara, 2008
- [EmgAu2008] Website der EMG-Automation GmbH, Informationsseite über IMPOC unter <http://www.emg-automation.com/de/servotechnik/qs-systeme/im poc.html>, 2008
- [Fahrm1999] Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: „Statistik. Der Weg zur Datenanalyse“, Springer Verlag Berlin, 1999
- [Först2005] Institut Dr. Förster GmbH & Co KG: MAGNATEST® D Prüfsystem 3.623, Geräteinformation, http://www.foerstergroup.de/pdf_ct/ct2.html, 2005.
- [Fürst2005] Fürst, J.: „Zerstörte Prüflinge sind auf Dauer zu teuer“, Industrie Anzeiger, Sonderdruck 43/2005, S 2-3, Konradin Verlag R. Kohlhammer GmbH, Leinenfelden-Echterdingen, 2005
- [Glock1971] Glocker, R.: „Materialprüfung mit Röntgenstrahlen unter besonderer Berücksichtigung der Röntgenmetallkunde“, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-05107-4, 1971
- [Gosne1975] Gonser, U.: „Mössbauer Spectroscopy“, Topics in Applied Physics Vol. 5, Springer, Berlin, 1975
- [Heinh1979] Heinhold, J.; Gaede, K.-W.: „Ingenieur-Statistik“, München, Wien : Oldenbourg. - ISBN 3-486-31744-X, 1979
- [Heinz1996] Heinz, W.: „Regularization of inverse problems“, Springer Netherland, ISBN 0-7923-4157-0, Berlin, 1996
- [Heise1928] Heisenberg, W.: „Zur Theorie des Ferromagnetismus“, Zeitschrift für Physik 49, S. 619-636, 1928
- [Heptn1972] Heptner, H.; Stroppe, H.: „Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1972
- [Herrm2007] Herrman, K.: „New Developments and Applications in Hardness Metrology“, HARDMEKO 2007, Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement, 19-21 November 2007, Tsukuba, Japan, 2007
- [Inver2002] „Inverse Problems Volume 18 Number 6 December 2002“, Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing (IOP), Pp L11-20, R99-136, 1461-1964, 2002

- [Knell1962] Kneller, E.: „Ferromagnetismus“, Springer-Verlag, 1962
- [Kröni1996] Kröning, M.; Altpeter, I.; Laub, U.: „Detecting the Tendency to Chilling in Series-Manufactured Cast-Iron Components using Micromagnetic Test Procedures“, Bartos, A.L. (Hrsg.), Greem, R.E. (Hrsg.), Ruud, C. (Hrsg.): Nondestructive Characterization of Materials VII. Part 1, Trans Tech Publications, Zürich, 1996
- [Kröni1997] Kröning, M.; Altpeter, I.; Laub, U.: „Detecting chilling tendency in series-manufactured cast iron components using micromagnetic test procedures“, Transactions of the American Foundrymen's Society. 104, S. 1031-1038, 1997
- [KurzJ2006] Kurz, J.: „Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton“, Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 2006,
- [Maisl1999] Maisl, U.; Altpeter, I.; Kopp, M.: „Elektromagnetisches Prüfverfahren zur Detektion der Weißeinstrahlung“, Sonderdruck aus Gießerei, Heft 5, 106-108, Gießerei-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1999
- [Mössb1959] Mößbauer, R.: „Kernresonanzabsorption von γ -Strahlung in Ir^{191} “, Zeitschrift für Naturforschung 14a, S. 211-216, 1959
- [Natte2001] Natterer, F.: „The Mathematics of Computerized Tomography“, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 0-898-71493-1, Philadelphia, 2001
- [Pinch2007] Pinchuk, R.: „Efficient Material Characterization by Means of the Doppler Effect in Microwaves“, Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, 2007
- [PincR2007] Pinchuk, R.; Sklarczyk, C.; Kröning, M.; Paul, W. J.: „Effiziente Charakterisierung von Materialien auf der Basis des Dopplereffektes mittels Mikrowellen“, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. DGZfP-Jahrestagung 2007: ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung: Zerstörungsfreie Materialprüfung, Berlin, Vortrag 54. (DGZfP-Berichtsbände 104-CD), 2007
- [Pitsc1990] H. Pitsch: „Die Entwicklung und Erprobung der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als neues Modul des 3MA-Ansatzes“, Kennziffer 900107-TW, 1990
- [Reinb2006] Reinboth, C.: „Multivariate Analyseverfahren in der Marktforschung“, LuLu-Verlagsgruppe, Morrisville, 2006
- [Rudol1979] Rudolf, J.F.; Paul, D.M.: „Regression methods“, Marcel Dekker, New York, 1979

- [Skier2000] Skiera, B.; Albers, S.: „Regressionsanalyse“, in: Herrmann, A., Homburg, C.: „Marktforschung Methoden, Anwendungen, Praxisbeispiele“, 2. Aufl., Wiesbaden, 2000
- [Schac1978] Schach, S.; Schäfer, T.: „Regressions- und Varianzanalyse“, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-08727-3, 1978
- [Stork2001] Stork, D.: „Pattern Classification“, John Wiley & Sons, Inc., 2001
- [Sziel2001] Szielasko, K.: „Aufbau eines modularen Messsystems auf Softwarebasis zur zerstörungsfreien Charakterisierung des Versprödungszustandes von kupferhaltigen Stählen“, Diplomarbeit, Fraunhofer IZFP - Bericht 010152-TW, Saarbrücken, 2001
- [Sziel2004] Szielasko, K.; Kopp, M.; Tschuncky, R.; Lugin, S.; Altpeter, I.: „Barkhausenrausch- und Wirbelstrom-Mikroskopie zur orts aufgelösten Charakterisierung von dünnen Schichten“, DGZfP e.V.: DGZfP-Jahrestagung 2004 ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Berichtsbände 89 V13, Berlin, 2004
- [Sziel2009] Szielasko, K.: „Entwicklung messtechnischer Module zur mehrparametrischen elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und –prüfung“, Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, IZFP-Bericht: 090120-TW, 2009
- [Taran2005] Tarantola, A.: „Inverse Problem Theory and Methods for Parameter Estimation“, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 0-898-71572-5, Philadelphia, 2005
- [Thein1989] Theiner, W.A.; Reimringer, B.; Kopp, H.; Gessner, M.: „3MA-Testing Equipment, Application, Possibilities and Experiences“, Characterization of materials (ed. by P. Höller, V. Hauk, G. Dobmann, C. Ruud, R. Green), Springer-Verlag, Berlin, 1989
- [Thein2002] Theiner, W.A.: „Non Destructive Evaluation of Stress States Using the Electromagnetic 3MA/QUALIMAX/KEMAG Technique“, Joint Meeting of the German an French Working Groups on Residual Stress, Saarbrücken, 2002
- [Tschu2004] Tschuncky, R.: „Entwicklung eines Mustererkennungs- und Klassifikationsmoduls für die indirekte Charakterisierung von Werkstoffeigenschaften“, Diplomarbeit, Fraunhofer IZFP – Bericht 040144-TW, Saarbrücken, 2004
- [Tschu2007] Tschuncky R.; Altpeter, I.: „Elektromagnetische Bestimmung von Restaustenit an Common-Rail-Injektorankerbolzen“, Kröning, M. (Hrsg.): Fraunhofer-Institut

für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Leistungen und Ergebnisse Jahresbericht
2006, S 28-29, Merzig: MDV Merziger Druckerei und Verlag, 2007

- [*Tschu2010*] Tschuncky R.; Altpeter, I.: „Zerstörungsfreie mikromagnetische Charakterisierung der Zahnflanken von Parksperrenrädern“, Boller, C. (Hrsg.): Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Jahresbericht 2009, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010
- [*TschR2010*] Tschuncky, R.; Altpeter, I.; Hübschen, G.; Dobmann, G.: „Nondestructive Characterization of Neutron Induced Embrittlement in Nuclear Pressure Vessel Steel Microstructures by using Nondestructive Electromagnetic Testing“, ENDE' 2010 - The 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, 13.-16.06.2010
- [*VDI2010*] VDI/VDE-Richtlinie Nummer 2616: „Härteprüfung an metallischen Werkstoffen“, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010
- [*VDI2002*] VDI/VDE-Richtlinie Nummer 2616: „Härteprüfung an metallischen Werkstoffen“, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002
- [*Weiss1907*] Weiss, P.: „L'Hypothese du Champ Moléculaire et de la Propriété Ferromagnétique“, Journal de Physique 6, S. 661-690, 1907
- [*Wolte2004*] Wolter, B.: „Zerstörungsfreie Charakterisierung von Schleifbrand“, VDI Wissensforum IWB GmbH: Windkraftanlagen: Sicherheit und Zuverlässigkeit, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Vortrag 12., Düsseldorf, 2004
- [*Wolte2005*] Wolter, B; Buchholtz, O.-W.; Hofmann, U.; Meilland, P.; Kern, R.; Schneider, E.: „Zerstörungsfreie Bestimmung von Qualitätsmerkmalen bei der Grobblechfertigung“, DGZfP-Berichtsband 94, DGZfP-Jahrestagung, 2.-4. Mai, Rostock. 2005.
- [*Wübbe2001*] Wübbeling, F.; Natterer, F.: „Mathematical Methods in Image Reconstruction“, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 0-898-71472-9, Philadelphia, 2001