

**Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und
Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik**

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Wolfram Weber
geboren am 15. August 1965 in Arolsen

2002

Vorsitz: Prof. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. Haferkamp
1. Referent: Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Doege
Tag der Promotion: 17.12.2002

Abstract

Weber, Wolfram

Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik

Die Bestätigung der Integrität kerntechnischer Anlagen durch Überwachung der Bauteilbeanspruchung und durch wiederkehrende Prüfungen ist die wesentliche Voraussetzung zur Aufrechterhaltung der Betriebsgenehmigung. Durch die Neu- und Weiterentwicklung von Prüftechniken wird eine Verbesserung der Nachweisbarkeit von Werkstofftrennungen erreicht. Dieses bedeutet eine Vergrößerung des Sicherheitsabstandes zwischen kritischer und nachweisbarer Fehlergröße. In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Fernfeld-Wirbelstromprüfsystems zum Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen an austenitischen Rohrbögen dokumentiert. Diese sind Bestandteil des Einspeise- und Nachkühlsystems eines Druckwasserreaktors.

Zur Unterstützung der experimentellen Gestaltung der abgeschirmten Tastspulensysteme ist ein Modell zur numerischen Berechnung der Feldverteilungen im Werkstoff entwickelt worden. Hierdurch werden die Wirkungszusammenhänge in Abhängigkeit von den Prüfbedingungen systematisch erfaßt. Zur Induktion geeigneter Wirbelstromverteilungen sind Feldberechnungen für unterschiedlich aufgebaute Sensoren durchgeführt worden. Experimentelle Untersuchungen bestätigen qualitativ die Ergebnisse numerischer Feldberechnungen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Berechnungen, ist ein Sensorsystem realisiert worden. Eine hohe Nachweisbarkeit für verdeckte Werkstofftrennungen wurde erreicht durch die Anpassung der Sensorgestaltung an die Prüfaufgabe, welche eine Unterscheidung von Wirbelstromindikationen und Störsignale durch Oberflächeneinflüsse ermöglicht. Bei der Prüfung von metastabilen austenitischen Werkstoffen treten Störsignale durch lokale ferromagnetische Werkstoffeigenschaften auf. Diese Werkstoffbereiche werden identifiziert durch die Anwendung der Oberwellenanalyse während der Wirbelstromprüfung. Somit ist eine Unterscheidung von Signalen durch Werkstofftrennungen, inhomogene Gefügeausbildung und Oberflächenstörungen gegeben. Die ausreichende Empfindlichkeit des Wirbelstromsensors ist durch Messungen an Prüfkörpern mit prüfrelevanten Testfehlergeometrien nachgewiesen. Zur Identifikation und Klassifikation der Wirbelstromsignale ist ein Bewertungskonzept entwickelt.

Mit dem Sensorsystem und Bewertungskonzept konnte die Integrität der untersuchten Komponenten nachgewiesen werden. Somit wurde ein Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit dieser kerntechnischen Rohrleitungskomponenten geleistet.

Schlagworte: Wirbelstromprüfung, austenitische Rohre, verdeckte Werkstofftrennungen

Abstract

Weber, Wolfram

Nondestructive examination of thick walled austenitic pipes and bents with advanced eddy current testing techniques

The integrity of nuclear power plants has to be confirmed by continuous supervision of the load of components and the application of nondestructive testing techniques during their lifetime. Indeed, this is essential for their safe operation and maintenance of their authorization. With the innovation of new testing techniques and their subsequent development the identification of imperfections has been highly improved. As a result, the difference between the critical size of an imperfection in a component and its detectable size will be increased. This thesis demonstrates the development of a remote field eddy current technique for the assessment of inner imperfections inside the pipe wall of austenitic bents. The components examined are austenitic bents in the primary coolant system of a pressurized water reactor.

This work comprises the modeling and numerical calculations of the field distribution inside the material in order to support the experimental development of the shielded probes. This methodically provides information about of the electromagnetic fields and its interactions in relation to material conditions and testing parameters. Hence, various types of probes have been calculated to establish suitable eddy current field distributions inside the material. Experimental investigations at different test materials have confirmed the results of the numerical calculations.

As a result, an eddy current probe and a testing equipment have been realized for the application of the austenitic pipes. The optimized probe design has archived a high sensibility for covered imperfections within the material which enables the distinction between flaw indications and unwanted lift-off signals caused by irregularities at the outer surface of the pipes. If electromagnetic testing methods are used at metastable austenitic material with paramagnetic material properties, signal disturbances can be caused by local ferromagnetic material properties. In this case these areas are identified by the simultaneous use of the harmonic analyses techniques during the eddy current examination. Because of this, the distinction of signals caused by harmful flaw indications, inhomogeneous material and lift-off signals are evidently provided. The sufficient sensibility of the testing system is demonstrated by measurements at several artificial flaw geometry. Moreover, a procedure for the identification and classification of the eddy current signals has been developed.

The application of the investigated sensor system and its appropriate signal processing have confirmed the integrity of examined components at a power plant. Therefore, this work pays an important contribution to the safety and reliability in the operation of the investigated pipework of the power plant.

Subjects: eddy current testing technique, austenitic pipes, inner imperfections

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Hannover am Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IKPH) sowie an dem Institut für Werkstoffkunde (IW).

Der Beginn der Arbeit erfolgte an dem Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren. Herrn Professor Dr.-Ing. D. Stegemann danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen bei der Übertragung der verantwortungsvollen Aufgabenstellung.

Herrn Professor Dr.-Ing. F.-W. Bach gilt mein besonderer Dank, da er mir nach seiner Übernahme des Bereichs Zerstörungsfreie Prüfverfahren die kontinuierliche Weiterführung der Arbeit ermöglichte und damit den Stellenwert der Zerstörungsfreien Prüfverfahren in der Werkstofftechnik unterstrich. Des weiteren bedanke ich mich für die Betreuung und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. E. Doege danke ich für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. Haferkamp danke ich für die Übernahme des Vorsitzes meines Promotionsverfahrens sowie für das Interesse, das er der Arbeit entgegenbrachte.

Ausdrücklich möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. W. Reimche bedanken. Durch sein außerordentliches Engagement bei der technischen Umsetzung der unterschiedlichen Sensorsysteme und seinen großen Einsatz bei der Realisierung der einzelnen Komponenten des Prüfsystems hat sein Wirken maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. K. L. Feiste bedanken, der mir stets unterstützend zur Seite stand. Die gemeinsamen fachlichen Diskussionen und freundschaftliche Zusammenarbeit haben zu wesentlichen Anregungen bei der Durchführung der Arbeit beigetragen.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. H. Ostermeyer bedanken, der mir eine gewissenhafte Einarbeitung in die Anwendungen der Wirbelstromtechnik zu Beginn meiner wissenschaftlichen Tätigkeiten ermöglichte.

Mein Dank richtet sich ferner an alle Kollegen und Mitarbeiter des Instituts für die kollegiale und stets partnerschaftliche Zusammenarbeit in einer ausgezeichneten Arbeitsatmosphäre.

Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung der Arbeit	2
3	Fertigung und Betrieb von austenitischen Rohrleitungen für Leichtwasserreaktoren	4
3.1	Werkstoffauswahl für Klein- und Nebenleitungen.....	5
3.2	Einspeise- und Nachkühlsystem eines Druckwasserreaktors	6
3.3	Fertigung von austenitischen Rohrbögen nach dem "Hamburger Verfahren"	7
3.4	Veränderungen der Werkstoffeigenschaften und Bauteilfehler durch Warmumformung	9
3.5	Veränderungen der Werkstoffeigenschaften durch Kaltverformung	12
3.5.1	Martensitbildung in metastabilen austenitischen Werkstoffen	13
3.6	Zu unterstellende Schadensmechanismen durch betriebliche Beanspruchungen.....	15
3.7	Gewährleistung der Integrität von Rohrleitungen durch betriebliche Überwachung.....	18
3.8	Auswahl der zerstörungsfreien Prüftechnik zur Integritätsbewertung von austenitischen Rohrbögen.....	19
4	Stand von Wissenschaft und Technik - Wirbelstromverfahren mit hoher Eindringtiefe	21
4.1	Niederfrequenz-Wirbelstromverfahren.....	23
4.2	Mehrfrequenz-Wirbelstromverfahren.....	25
4.3	Impuls-Wirbelstromverfahren	27
4.4	Fernfeld-Wirbelstromverfahren.....	29
4.4.1	Anwendung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Prüfung von Rohren mit Innen-Durchlaufspulen.....	29
4.4.2	Anwendung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Prüfung von ebenen und gekrümmten Oberflächen mit Tastspulen.....	31
5	Anwendung numerischer Verfahren zur Sensorentwicklung	32
5.1	Berechnung der Feldverteilungen im Werkstoffvolumen	32
5.2	Auswertung der Simulationsergebnisse.....	37
5.2.1	Darstellung des magnetischen Vektorpotentials	37
5.2.2	Bestimmung der Wirbelstromdichte und der Eindringtiefe	38
5.2.3	Einfluß der Abschirmung auf die Felddausbildung	42

5.3	Vergleich rechnerischer und gemessener Feldausbildungen	44
5.4	Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der Fernfeldausbildung	47
5.5	Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der numerischen Feldberechnung	50
6	Experimentelle Sensoranpassung zur Prüfung sphärisch gekrümmter Oberflächen	52
6.1	Auswahl prüfrelevanter Testfehlergeometrien	52
6.2	Erfassung der Wirbelstromsignale.....	54
6.3	Techniken der Wirbelstrom-Signalauswertung	55
6.4	Abbildungseigenschaften von abgeschirmten Sensorsystemen.....	57
6.4.1	Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude und der Fehlersignal-Phase in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz	58
6.4.2	Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude in Abhängigkeit des Abstandes Werkstoffoberfläche – Wirbelstromsensor	59
6.4.3	Position des Fehlersignal-Maximums	60
6.4.4	Ausbildung der Fehlersignal-Breite	63
6.4.5	Richtungsabhängigkeit der Signalausbildung	64
6.5	Schlußfolgerungen aus den experimentellen Untersuchungen zur Signalausbildung	66
6.6	Anpassung der Sensorgestaltung und der Prüfparameter an die Prüfaufgabe	67
6.6.1	Unterscheidung von WS-Signalen durch Lift-Off Effekte und verdeckte Werkstofftrennungen	68
6.6.2	Unterscheidung der WS-Signale von Rohr-Außenfehlern und Rohr-Innenfehlern	69
6.6.3	Erweiterte Signalanalyse zur Differenzierung zwischen WS-Signalen durch Werkstofftrennungen und durch ferromagnetische Werkstoffinhomogenitäten	70
6.7	Wirbelstrommessungen an Prüfkörpern mit Testfehlergeometrien.....	74
7	Realisierung eines Prüfsystems	78
7.1	Manipulatoraufbau zur Rohrbogenprüfung und zur Meßdatenaufnahme	78
7.2	Dynamische Kalibrierung der Wirbelstromsensoren.....	79
7.3	Prüfkonzept zur Wirbelstrom-Signalklassifizierung	81
7.4	Rechnergestützte Signalidentifikation und Klassifikation.....	84
8	Zusammenfassung und Ausblick	87
9	Literaturverzeichnis	89

Abkürzungen und Formelzeichen

Werkstoffkundliche Kennzeichnungen

M	Martensit, krz-Eisenmodifikation	
M_{α}	Martensit, entstanden durch Unterkühlung in Kohlenstoffstahl	
$M_{\alpha'}$	Martensit, entstanden durch plastische Verformung	
M_d	höchste mögliche Temperatur zur Martensitbildung	[°C]
M_s	niedrigste Temperatur zur spontanen Martensitbildung	[°C]
kfz	kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur	
krz	kubisch raumzentrierte Gitterstruktur	
k_f	Fließspannung	[MPa]
α, δ	krz-Eisenmodifikation	
ε	Martensit, hexagonale Gitterstruktur	
$\dot{\phi}$	Umformgeschwindigkeit	[1/s]
γ	Austenit, kfz-Eisenmodifikation	

Elektrische und magnetische Kennzeichnungen

\vec{A}, A	Vektorpotential	[Vs/m]
B, \vec{B}	magnetische Flußdichte oder Induktion	[Vs/m ²]
D, \vec{D}	elektrische Flußdichte	[As/m ²]
E, \vec{E}	elektrische Feldstärke	[V/m]
H, \vec{H}	magnetische Feldstärke	[A/m]
I, I_P	Strom, Spulenstrom	[A]
Im	Imaginärteil	
J, \vec{J}	elektrische Stromdichte	[A/m ²]
N, N_P	Anzahl, Anzahl der Spuleneinzelwindungen	[-]
R	Ohmscher Widerstand	[V/A]
Re	Realteil	
U	Spannung	[V]
X_L	Induktiver Blindwiderstand, Reaktanz	[V/A]
Z	Spulenimpedanz	[V/A]
ε	Dielektrizitätskonstante	[As/Vm]
Φ	magnetischer Fluß	[Vs]
σ	elektrische Leitfähigkeit	[A/Vm]
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
μ_{rel}	relative magnetische Permeabilität	

Allgemeine Kennzeichnungen

A	Fläche	[mm ² , m ²]
\hat{A}	Amplitude, Scheitelwert	
D, D_a	Durchmesser, Außendurchmesser	[mm, m]
e	Eulersche Zahl	2.718...
f	Frequenz	[1/s]
t	Zeitdauer	[s]

n	Anzahl	[-]
r, r _a	Radius, Außenradius	[mm]
s	Wandstärke	[mm]
T	Periodendauer	[s]
z	Orthogonale	[mm]
δ	Eindringtiefe	[mm]
φ	Phasenwinkel	[rad, grad]
π	Kreiszahl	3.141...
ω	Kreisfrequenz	[1/s]

Chemische Zeichen

C	Kohlenstoff	Ni	Nickel
Cr	Chrom	P	Phosphor
Mn	Mangan	S	Schwefel
M ₂₃ C ₆	Chromkarbid	Si	Silizium
Nb	Niob	Ti	Titan

Werkstoffbezeichnungen

AISI 304

1.4301 / X 5 CrNi 18 9

1.4541 / X 6 CrNiTi 18 10

1.4550 / X 6 CrNiNb 18 10

1.4941 / X 8 CrNiTi 18 10

austenitische Stähle:

unstabilisiert, Kohlenstoffanteil: ≤0.08%

unstabilisiert, Kohlenstoffanteil: ≤ 0.07%

Ti stabilisiert, Kohlenstoffanteil: ≤0.08%

Nb stabilisiert, Kohlenstoffanteil: ≤0.08%

Ti stabilisiert, Kohlenstoffanteil: 0.04...0.1%

1.4006 / X 10 Cr 13

warmfeste ferritische Stähle:

Kohlenstoffanteil: ≤0.08-0.12%

Sonstige Bezeichnungen

DRK

Dehnungsrißkorrosion

DWR

Druckwasserreaktor

HTS-SQUID

high-temperature superconducting (HTS)

quantum interference detectors (SQUID).

HKL

Hauptkühlleitung

KTA

Kerntechnischer Ausschuß

LWR

Leichtwasserreaktor

RT

Raumtemperatur

SpRK

Spannungsrißkorrosion

SWR

Siedewasserreaktor

SwRK

Schwingungsrißkorrosion

1 Einleitung

Wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen sind ein wichtiger Bestandteil zum Nachweis der Betriebssicherheit von kerntechnischen Anlagen. Hierbei unterliegen die einzelnen Prüftechniken einer ständigen Entwicklung und Anpassung, entsprechend dem gegenwärtigen Kenntnisstand über mögliche Schadensentwicklungen an den Komponenten. Die Überwachung der Anlagenintegrität während des Betriebes durch wiederkehrende Prüfungen und kontinuierliche Kontrollen der Bauteilbeanspruchungen sind die wesentliche Voraussetzung zur Aufrechterhaltung der Betriebsgenehmigung. Durch die Neu- und Weiterentwicklung der Prüftechniken wird eine Verbesserung hinsichtlich der Nachweisbarkeit von Werkstoffveränderungen erreicht. Dies bedeutet eine Vergrößerung des Sicherheitsabstandes zwischen kritischen und den nachweisbaren Fehlergrößen. Durch die Redundanz der zur Verfügung stehenden Prüftechniken können physikalische oder technische Grenzen einzelner Verfahren bei dem Integritätsnachweis überwunden werden /Brast 1997/. Somit stellt die Weiterentwicklung von zerstörungsfreien Prüfverfahren einen wichtigen Beitrag zum sicheren Betrieb der Anlagen dar.

Die Rohrleitungssysteme in Kraftwerken sind wesentliche Konstruktionsbauteile, die hohen mechanischen und korrosiven Belastungen ausgesetzt sind. Insbesondere im Primärkreislauf von Leichtwasserreaktoren muß der sichere Einschluß des Kühlmediums im Betrieb stets gewährleistet sein. Die Notwendigkeit zur Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zum Integritätsnachweis von Rohrleitungskomponenten liegt begründet in der Wahl des Fertigungsverfahrens zur Herstellung von Rohrbögen aus austenitischem Werkstoff nach dem „Hamburger Verfahren“. Aufgrund des Fertigungsverfahrens kann eine betriebliche Schadensentwicklung bei fortgeschrittener Anlagenutzung unterstellt werden. Der Einsatz der Prüftechnik dient damit dem Nachweis, daß die Integrität der Rohrbögen nicht abweicht vom Ausgangszustand beim Errichten der Anlage. Der Einsatz der Prüftechnik erfolgt im Rahmen von Integritätsuntersuchungen an Rohrbögen innerhalb des Einspeise- und Nachkühlsystems eines Druckwasserreaktors. Die Wandstärke der zu untersuchenden Rohrwandung beträgt 20.3mm.

Der Nachweis von rißartigen Werkstofftrennungen ohne signifikantes Fehlervolumen mit beliebiger Orientierung innerhalb der Rohrwandung ist mit Verfahren der Ultraschallprüfung und der Durchstrahlungsprüfung derzeit nur eingeschränkt möglich. Wirbelstromverfahren zeigen grundsätzlich eine hohe Empfindlichkeit hinsichtlich der Erkennbarkeit von rißartigen Trennungen im Werkstoffgefüge. Zum Nachweis der verdeckten Werkstofftrennungen im Werkstoffvolumen ist die Wirbelstrom-Fernfeldtechnik zur Prüfung von ebenen Platten weiterentwickelt worden. Zur Prüfung von dickwandigen Rohrleitungskomponenten ist eine Vergrößerung der Eindringtiefe der Wirbelstromverteilung notwendig bei gleichzeitiger Erhöhung der Nachweisgrenze, welches mit konventionellen Wirbelstromtechniken zur Oberflächenrißprüfung nicht erreicht werden kann. Die vorgestellte Arbeit dokumentiert die Wirbelstrom-Sensorentwicklung und die Realisierung eines Prüfsystems zur Untersuchung von Rohrbögen hinsichtlich der Detektion von rißartigen Werkstofftrennungen, ausgehend von der Rohr-Innenseite sowie im Werkstoffvolumen.

2 Zielsetzung der Arbeit

Der Nachweis der Integrität von sicherheitsrelevanten Komponenten im Betrieb erfolgt durch eine geeignete Betriebsüberwachung und den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren. Ziel der Verfahrensentwicklung ist der Einsatz der Wirbelstromprüfung zur Untersuchung auf verdeckte rißartige Werkstofftrennungen im Werkstoffvolumen von austenitischem Rohrleitungen. Die Auslegung und Handhabung des Prüfverfahrens soll hinsichtlich der Prüfung von austenitischen Rohrleitungskomponenten bei Leichtwasserreaktoren erfolgen. Der Anstoß für diese Verfahrensentwicklung liegt in dem Verdacht begründet, daß nach dem „Hamburger Verfahren“ hergestellte Rohrbögen mit fortschreitender Betriebsdauer makroskopische Werkstofftrennungen ausbilden könnten.

Die Anforderungen an die anzupassende Prüftechnik bestehen somit hinsichtlich der Identifizierung, Charakterisierung und Klassifizierung von Materialveränderungen und Werkstofftrennungen. Die Identifizierung von Werkstoffschädigungen umfaßt das Auffinden von Werkstofftrennungen und das Erfassen der geometrischen Ausdehnung eines geschädigten Bereiches. Eine Charakterisierung umfaßt die Unterscheidung zwischen Gefügeveränderungen und Rißindikationen. Die Klassifikation bewertet die Signalindikationen hinsichtlich der Fehlertiefe, Fehlerorientierung und Fehlerposition innerhalb der Rohrwandung. Weiterhin muß die Prüftechnik eine zeitliche Verfolgung einer erkannten Werkstoffschädigung im Rahmen von wiederkehrenden Prüfungen gewährleisten.

Die elektromagnetischen Eigenschaften von metastabilen, austenitischen Werkstoffen werden erheblich durch die Bearbeitungsschritte bei der Bauteilfertigung beeinflusst. Diese führen zu Gefügetransformationen, in deren Folge eine inhomogene Ausbildung der elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften innerhalb des Bauteiles auftritt, welche eine wesentliche Ursache für Störsignale darstellt. Durch die Gestaltung der Wirbelstromsonde, Verwendung geeigneter Prüfparameter und eine problemangepaßte Signalbewertung ist eine eindeutige Trennung von Wirbelstromindikationen durch Werkstoffinhomogenitäten und Werkstofftrennungen zu gewährleisten.

Grundsätzlich ist das niederfrequent arbeitende Wirbelstrom-Fernfeldverfahren für gerade Platten zum Nachweis von verdeckten Trennungen im Werkstoffvolumen geeignet. Erste Anwendungen sind beschrieben zur Detektion von Werkstofftrennungen in dickwandigen Aluminiumwerkstoffen /Sun 1996/. Entsprechend den Prüfbedingungen des austenitischen Werkstoffs und den sphärisch gekrümmten Oberflächen der Rohrbögen, ist eine entsprechende Sensorentwicklung zur Anwendung dieses Wirbelstromverfahrens durchzuführen.

Für den Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen wird eine bestimmte Feldverteilung im Werkstoff benötigt. Um die notwendigen Feldverteilungen durch eine geeignete Sensorgestaltung induzieren zu können, sind umfangreiche numerische Feldberechnungen durchzuführen. Die Ergebnisse sind an ebenen Testkörpern experimentell zu verifizieren.

Durch die Kombination von numerischen Verfahren zur Feldberechnung mit experimentellen Untersuchungen wird eine zielgerichtete Sensorentwicklung angestrebt.

Um einen Beitrag zum Integritätsnachweis der im Primärkreislauf eines Druckwasserreaktors eingebauten Rohrbögen zu ermöglichen, ist eine hinreichende Nachweisgrenze gefordert. Die Verfahrensqualifizierung der Sensortechnik ist durch Messungen an Testkörpern zu erbringen. Hierfür sind Testfehlergeometrien auszuwählen, die den in kerntechnischen Regelwerken vorgeschriebenen Anforderungen für die zu untersuchenden Rohrwandstärken genügen.

Zur Erhöhung der Bewertungssicherheit sind die Prüfungen an den eingebauten Rohrbögen mechanisiert durchzuführen, wobei die gesamte Oberfläche des Bauteiles zu erfassen ist. Hierfür ist ein geeignetes Manipulatorsystem an die Prüfaufgabe und die zu entwickelnde Sensortechnik anzupassen. Durch die mechanisierte Messung kann die Wirbelstrom-Signalauswertung anhand der flächigen Darstellung der Wirbelstromsignale erfolgen. Damit mögliche Werkstofftrennungen in der Darstellung der komplexen Wirbelstromsignale identifiziert werden können, sind die Abbildungseigenschaften des Wirbelstromsensors in Abhängigkeit der Sensorgestaltung und der Prüfbedingungen zu bestimmen. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei eine Minimierung von Störeinflüssen auf die Wirbelstromsignalausbildung.

Zusätzlich zu den in den Regelwerken geforderten Testfehlergeometrien sind weitere Testfehler mit unterschiedlichen Orientierungen und Tiefen auszuwählen, um mögliche reale Werkstoffschäden nachzubilden. Mit dem optimierten Sensorsystem sind die entsprechenden Wirbelstromsignale flächig aufzunehmen. Durch die Entwicklung angepaßter Routinen sollen charakteristische Kennwerte an Einzelsignalen innerhalb des Meßgebietes bestimmt werden. Auf der Grundlage dieser Kennwerte ist ein Bewertungskonzept zur Signalklassifikation zu entwickeln.

Ausgehend von dem Bewertungskonzept für Einzelsignale von Testfehlergeometrien, sind Grundlagen für eine rechnergestützte Meßsignalbewertung zu entwickeln. Hierdurch werden Ansatzpunkte für eine Verknüpfung der Bewertungsergebnisse mit weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren ermöglicht.

3 Fertigung und Betrieb von austenitischen Rohrleitungen für Leichtwasserreaktoren

Grundsätzlich wird bei dem Betrieb von kerntechnischen Anlagen gefordert, daß die Betriebssicherheit der Anlagekomponenten durch den Ausschluß von instabilem Rißwachstum stets gewährleistet ist. Dieses wird, entsprechend Bild 3.1, gewährleistet durch eine an die Bauteilbelastung angemessene Auslegung der Komponenten bei der Bauteildimensionierung, Planung und Fertigung /RSK 1979/. Während des Betriebes einer Komponente ist die Bauteilbelastung durch eine entsprechende Fahrweise gering zu halten. Durch die Anwendung von zerstörungsfreien Prüftechniken als Bestandteil der wiederkehrenden Prüfungen ist nachzuweisen, daß die Integrität der Komponenten durch zu unterstellende Schadensmechanismen während des Betriebes nicht vermindert worden ist.

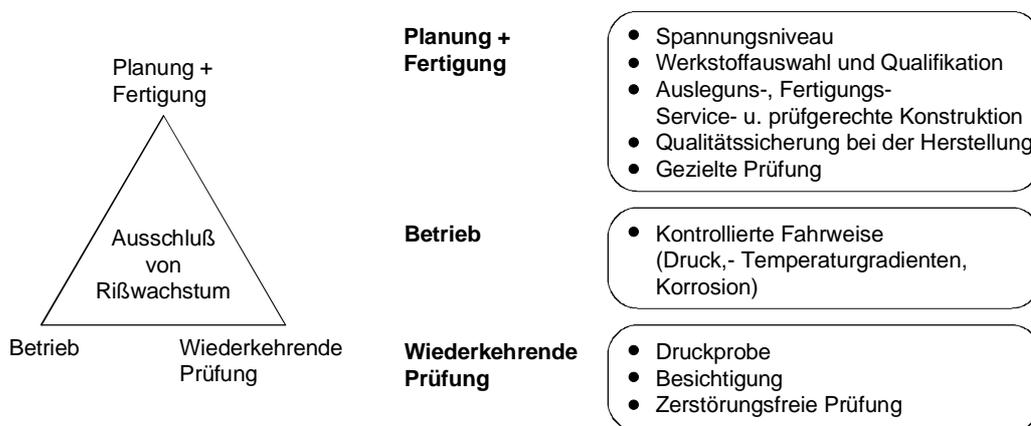


Bild 3.1: Ausschluß von instabilem Rißwachstum durch Basissicherheit

Der Werkstoffauswahl und der Verarbeitung kommt dabei große Bedeutung zu, um die Entstehung betrieblicher Schadensmechanismen zu verhindern /König 1998/. Die physikalischen Bauteileigenschaften von Komponenten aus austenitischen Werkstoffen werden insbesondere durch die Legierungselemente und die Verarbeitungstechnik bestimmt. Die Kombination des Fertigungsverfahrens bei der Umformtechnik der Rohre und der anschließenden Wärmebehandlung bestimmt das Festigkeitsverhalten bei mechanischer Beanspruchung im Bauteileinsatz und das Korrosionsverhalten des Werkstoffes bei Benetzung mit Kühlwasser. Durch die konservative Dimensionierung der Komponenten sind Bauteilschäden durch betriebliche Beanspruchungen nicht zu erwarten. Daher wird durch den Einsatz von zerstörungsfreien Prüftechniken als Wiederholungsprüfung zumeist die Fertigungsqualität des Bauteiles nachgewiesen.

Die elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften von metastabilen austenitischen Werkstoffen werden erheblich durch das Fertigungsverfahren des Bauteiles beeinflusst. Die Entwicklung und Anpassung von Wirbelstromverfahren müssen daher den elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften des Prüfgegenstandes durch das Fertigungsverfahren Rechnung tragen. Daher wird im folgenden auf grundlegende Gesichtspunkte bei der Herstellung und Verarbeitung des Rohrwerkstoffes eingegangen.

3.1 Werkstoffauswahl für Klein- und Nebenleitungen

Die bevorzugten Werkstoffe innerhalb der Rohrleitungssysteme in Primärkreisläufen von Kernkraftwerken sind aufgrund ihrer hohen Werkstoffzähigkeit und ihrer Korrosionsbeständigkeit austenitische Chrom-Nickel Stähle /Trenckhoff 1986, Weiß 1990, Bendick 1993/. Die hohe Korrosionsbeständigkeit wird erreicht durch die Ausbildung einer passivierenden Chromoxidschicht auf der Werkstoffoberfläche. Austenitische Chrom-Nickel Stähle zeigen einen geringen Korrosionsabtrag durch das Kühlmittel, d.h. die Verunreinigung des Kühlmittels durch Korrosionsprodukte wird gering gehalten. Hierdurch wird die Kontamination im Primärkreislauf verringert /Rösler 1985, Nickel 1999/. Nur ein geringer Teil des entstehenden Oxides wird an das Kühlmittel in ionaler Form abgegeben. Das Oxid wird durch die Neutronenstrahlung im Reaktorkern aktiviert und transportiert damit Radioaktivität in den übrigen Kreislauf. Der überwiegende Teil des durch die Korrosion entstandenen Oxides haftet fest auf dem Metall. Zudem erfolgt der Korrosionsabtrag unter idealen Bedingungen gleichmäßig als Flächenkorrosion. Weiterhin zeigen austenitische Stähle eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Versprödung durch Neutronenstrahlung /Debray 1974/.

In Deutschland wurde bereits 1959 entschieden, bei der Entwicklung der Leichtwasserreaktoren (LWR) für medienberührte Teile und Oberflächen des Primärkreislauferes stabilisierte austenitische Werkstoffe zu verwenden. Das geschah entgegen der in den USA üblichen Praxis der Verwendung un- oder gering stabilisierter austenitischer Stähle mit relativ geringem Kohlenstoffanteil, wie der Stahl vom Typ AISI 304, der vergleichbar ist mit dem Stahl 1.4301. Die Stabilisierung des Werkstoffes wird erreicht durch die Legierungselemente Titan und Niob. Hierdurch soll vermieden werden, daß es bei der Fertigung, insbesondere bei der Warmformung, der Wärmebehandlung und dem Verschweißen zu Kohlenstoffausscheidungen innerhalb des Werkstoffgefüges kommt. Hierdurch erwartete man unter den gegebenen Mediumbedingungen und vor dem Hintergrund des damaligen Erkenntnisstandes eine solch hohe Korrosionsbeständigkeit, daß nach ingenieurmäßigem Verständnis eine interkristalline Rißbildung als unwahrscheinlich angesehen werden konnte /Wachter 1996/.

Die Fernfeld-Wirbelstromtechnik ist daher angepaßt worden zur Untersuchung von Werkstoffschäden an metastabilen-austenitischen Werkstoffen. Der Werkstoff des untersuchten Einspeise- und Nachkühlsystems ist der Niob-stabilisierte austenitische Stahl 1.4550. Die Legierungselemente sind in Tabelle 3.1 wiedergegeben.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb
≤0.08	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.030	17.0/19.0	9.0/12.0	Nb≥10x%C≤1.0

Tabelle 3.1: Legierungselemente des austenitischen Werkstoffes 1.4550 /Wegst 2001/

Die magnetischen Eigenschaften von Eisen-Chrom-Nickel Legierungen werden bestimmt durch die Anteile der einzelnen Legierungselemente. In Bild 3.2 ist die Magnetisierbarkeit der Werkstoffe in Abhängigkeit der Legierungselemente gezeigt /Dietrich 1976/.

Mit steigenden Gehalten an zusätzlichen austenitstabilisierenden Elementen wie Nickel, Mangan, Kohlenstoff und Stickstoff und der Ferritbildnern Chrom, Molybdän und Silizium nimmt die Magnetisierbarkeit ab und die Stabilität des γ -Gitterstruktur gegen Kaltverformung und Tiefkühlung zu. Bei geringen Gehalten an Chrom und Nickel tritt ein Übergangsbereich auf, in dem sich ferromagnetischer α' -Martensit bilden kann. Dieser α' -Martensit zeigt eine beachtliche Umwandlungshysterese bei dem Abkühlen und dem Aufheizen des Werkstoffes.

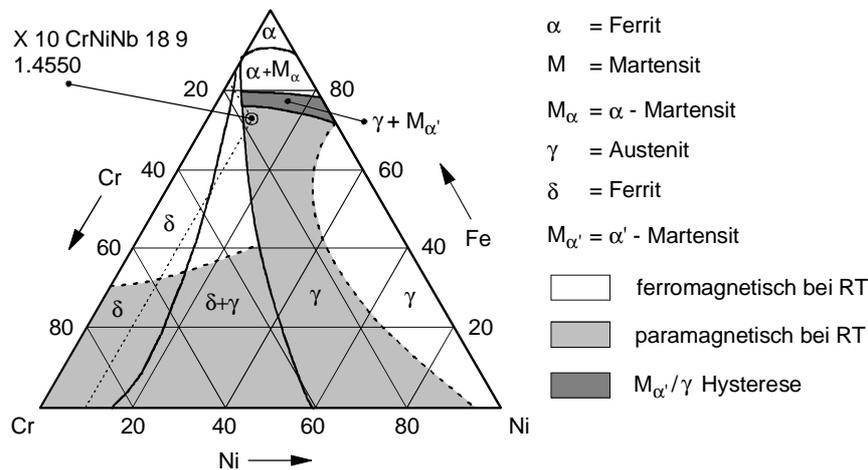


Bild 3.2: Abhängigkeit der Magnetisierbarkeit von der Zusammensetzung im System Eisen-Chrom-Nickel

Bei weiter abnehmenden Legierungsbestandteilen wird schließlich ein rein ferromagnetischer Bereich erreicht, der aus α -Ferrit und je nach Begleitelementen und vorhergegangener Wärmebehandlung aus unterschiedlichen Gehalten an α -Martensit besteht. Eine Ausnahme von diesem Verhalten bei der Ausbildung der ferromagnetischen

Eigenschaften bilden Stähle mit Nickelgehalten über 30%. Diese sind trotz der γ -Gitterstruktur bei Raumtemperatur ferromagnetisch ähnlich wie reines Nickel /Dietrich 1976/. Der austenitische Werkstoff der untersuchten Komponenten befindet sich wenig unterhalb des Übergangsbereiches der einzelnen Werkstoffmodifikationen entsprechend einem Anteil von ungefähr 18% Chrom und 10% Nickel. Daher können aufgrund von Inhomogenitäten auch ferromagnetische Phasenanteile, bestehend aus α' -Martensit, δ -Ferrit und α -Eisen, in unterschiedlichen Anteilen im Werkstoffgefüge auftreten. Für die Anpassung des Wirbelstromverfahrens bedeutet dieses, daß sowohl paramagnetische als auch lokal ferromagnetische Werkstoffeigenschaften auftreten können.

3.2 Einspeise- und Nachkühlsystem eines Druckwasserreaktors

Die Anpassung des Fernfeld-Wirbelstromverfahrens erfolgt zur Untersuchung von Rohrbögen innerhalb des Einspeise- und Nachkühlsystems für einen Druckwasserreaktor. Die Kühlung des Reaktorkernes nach Abschaltung der Reaktoranlage oder nach einem Schadensfall ist Aufgabe dieses Rohrleitungssystems. Dieses System ist bei dem betroffenen Kraftwerk mit einer vierfachen Redundanz ausgeführt. Unter der Nachkühlung im normalen Betriebszustand versteht man die Abfuhr der Nachwärme bei dem Herunterfahren des Reaktor. Bei Abfahren der Reaktoranlage in den drucklos kalten Zustand wird die anfallende Nachzerfallswärme während der ersten Phase nach dem Unterbrechen der Kernspaltung im Reaktordruckbehälter über die Dampferzeuger abgeführt. Unterhalb einer Nachkühlleistung von einigen Prozent der Nennleistung und einer Kühlmitteltemperatur von etwa 150°C wird auf das Nachkühlsystem

umgeschaltet und damit eine weitere Temperaturabsenkung bis auf etwa 50° erreicht /Krausz 1979/. Dadurch sind die Rohrleitungen im stationären Betrieb kaltgehend ohne ständige Durchflutung mit Primärkühlmittel.

Aufgrund der kurzzeitigen Einspeisungen in die Leitungen während An- und Abfahrvorgängen ist die wesentliche Beanspruchung auf eine zeitliche Veränderung der Betriebstemperatur zurückzuführen. Zudem kann es zu Temperaturschichtungen innerhalb der Rohrleitungen durch örtlich variierende Temperaturverteilungen im Rohrquerschnitt kommen /Zaiss 1991/. Hieraus ergibt sich also eine geringe thermische Wechselbeanspruchung des Rohrleitungssystems mit instationärer Bauteilbelastung. Die Anzahl der Lastwechsel kann als gering angenommen werden.

Die zweite Aufgabe des Einspeise- und Nachkühlsystems liegt in der Kühlung des Reaktorkerns nach einem Schadensfall. Das System muß gewährleisten, daß die Nachkühlung nach jedem denkbaren Schadensfall so funktioniert, daß der Kern immer ausreichend gekühlt wird und der Brennelemente-Verband im Reaktor keinen Schaden erleidet. Sinkt der Druck im Primärsystem kurzfristig ab, z.B. durch einen Rohrleitungsbruch, wird durch die Einspeisestränge boriertes Wasser aus Flutbehältern in den Reaktor gefördert. Durch die Dimensionierung der Rohrleitungssysteme ist die notwendige Fördermenge ausreichend, selbst wenn ein Teilsystem wegen Reparatur eines Anlageteiles außer Betrieb ist, und ein anderes Teilsystem, das zwar betriebsbereit war, wegen eines gleichzeitig zum Schadensfall aufgetretenen Einzelfehlers seine Funktion nicht erfüllen kann. Durch diese Maßnahmen wird innerhalb kurzer Zeit der Reaktorkern wieder geflutet und dessen weitere Kühlung sichergestellt /Krausz 1979/. Damit ist das Einspeise- und Nachkühlsystem ein wesentliches Anlageteil zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes des Primärkreislaufs. Um diese Aufgabe im abnormalen Betrieb zu gewährleisten, sind die Rohrleitungen für den störungsfreien Betrieb überdimensioniert. Eine Bauteilschädigung durch eine mechanische Überbeanspruchung in dem Normalbetrieb ist daher nicht zu erwarten.

3.3 Fertigung von austenitischen Rohrbögen nach dem "Hamburger Verfahren"

Die untersuchten Rohrbögen sind sogenannte "Einschweißbögen" ohne gerade lange Enden im Anschluß an den Biegeradius, die nach dem sogenannten "Hamburger Verfahren" hergestellt worden sind. Der Vorteil des "Hamburger Verfahrens" liegt in der Realisierung eines Rohrbogens mit weitestgehender gleichmäßiger Wandstärke in der Druck- und der Zugzone bei geringen Ovalitäten des Rohrbogens.

Bei konventionellen Kalt- oder Warmbiegeverfahren über Rollen oder mit Sand verfüllten Rohren (Biegen auf der Platte) tritt durch die Zugbeanspruchung an der Bogenaußenseite eine Wandstärkenverminderung ein, die je nach Biegeradius bis zu 20% der Ausgangswandstärke betragen kann. Ebenso tritt an der Bogeninnenseite durch die Druckbeanspruchung eine entsprechende Stauchung oder Wandstärkenverdickung ein.

Nur in den neutralen Fasern bleibt die ursprüngliche Wandstärke erhalten. Zudem bleibt trotz bester Ausbildung der Biegewerkzeuge und dichtester Füllung der Rohrquerschnitt nach dem Biegen nie genau kreisförmig.

Die Vorrichtung zur Herstellung des Rohrbogens nach dem "Hamburger Verfahren" besteht im wesentlichen aus der hydraulischen Presse und dem gebogenen Dorn mit der Dornstange. Weiterhin notwendig ist ein Heizofen, der im Bereich der Krümmung den Werkstoff auf die notwendige Verformungstemperatur zur Bogenherstellung erwärmt. Die Verformungstemperatur zur Herstellung der untersuchten Bögen wird mit Hilfe von Gas- und Ölbrennern erzeugt. Bild 3.3 zeigt schematisch den Aufbau der Fertigungseinrichtung.

Bei dem "Hamburger Verfahren" wird das Einsatzrohr, aus dem der Rohrbogen hergestellt werden soll, über einen konischen, dem gewünschten Biegeradius entsprechenden Dorn gedrückt. Der Durchmesser der Dornstange ist am Anfang der Krümmung geringer als am Ende der Krümmung. Durch die Aufweitung des Dornes mit zunehmender Krümmung werden in den Ringquerschnitten Zugspannungen aufgebaut, die während des Vorschubes einen gleichmäßigen Werkstofffluß in Umfangsrichtung verursachen.

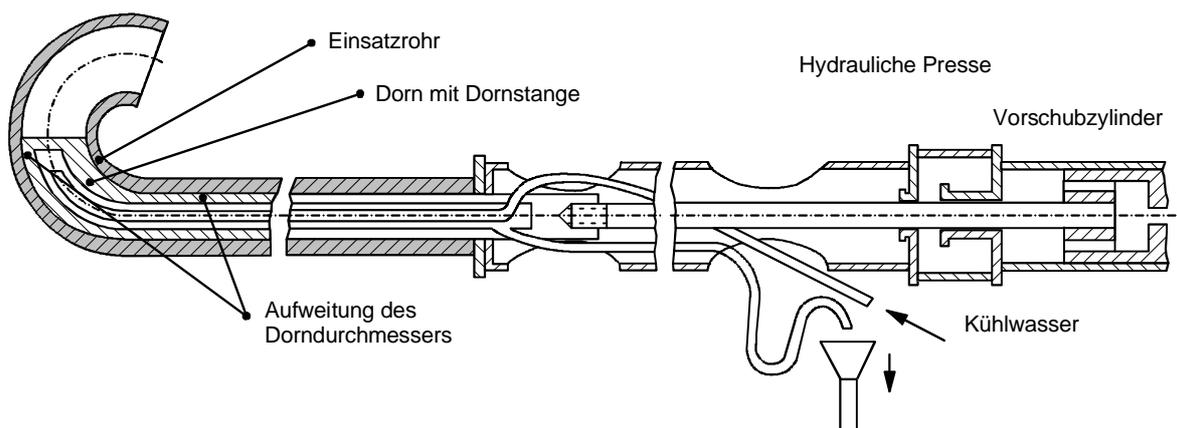


Bild 3.3: Vorrichtung zum Biegen dickwandiger Rohre mit wassergekühltem Dorn nach dem "Hamburger Verfahren" /Grüner, 1960/

Infolge des Widerstandes in der Innenkrümmung, welches das Rohr der Biegung und der Aufweitung entgegensetzt, treten besonders auf der Innenseite des Bogens in der Rohr-Längsrichtung Druckspannungen und in der Rohr-Umfangsrichtung, in den Ringquerschnitten, Zugspannungen auf. Durch die Krümmung der Innenseite des Dornes kommt es zu einem Werkstoffstau im Bereich der Innenkrümmung. Die Spannungsverhältnisse bewirken ein Fließen dieses Werkstoffes in Umfangsrichtung entlang des sich vergrößernden Dornquerschnittes. Die Herstellung von Rohrbögen nach dem "Hamburger Verfahren" gleicht eher einem Ziehvorgang als einem Biegevorgang. Nur durch den Umstand, daß sich das Rohr beim Ziehen über den Dorn biegt, aus geraden Rohren also gebogene Rohre werden, wird es zu den Biegeverfahren gezählt. Es können mit diesem Fertigungsverfahren sowohl Rohrbögen aus ferritischem als auch aus austenitischen Werkstoffen hergestellt werden /Grüner 1960/.

Die Entwicklung von Kernreaktoren mit zunehmender thermischer Leistung ist eng verbunden mit den zur Verfügung stehenden Techniken der Rohrherstellung sowie einer ausreichenden Qualitätssicherung bei der Bauteilfertigung. Die Fertigung von Rohrbögen größerer Dimension erfolgt grundsätzlich durch Warmumformung. Bis zu Beginn der 70er Jahre wurden in der Kraftwerkstechnik überwiegend Einschweißbögen verwendet, die nach dem beschriebenen „Hamburger Verfahren“ hergestellt worden sind.

Mit der Verfahrensentwicklung des Induktivbiegens sind die Einschweißbögen aus der Kerntechnik weitgehend verdrängt worden /Blume 1983/. Mit Hilfe des Induktivbiegens können Rohrbiegungen mit geraden langen Schenkeln hergestellt werden. Weiterhin sind mehrere Raumbiegungen innerhalb eines Rohrabschnittes möglich. Hierdurch wird die Anzahl von Schweißnähten deutlich reduziert, welches zu einem geringeren Aufwand bei der Fertigung eines Rohrleitungssystems führt /Kalwa 1986/. Zudem sind Schweißstellen ein bevorzugter Ort, an dem unterschiedliche Schadensbilder entstehen können. Mit der Reduzierung der Anzahl von Schweißnähten verringert sich somit der notwendige Prüfaufwand /Reiser 1982/. Im Rahmen der Verfahrensentwicklung des Induktivbiegens sind Ursachen für Werkstoffschäden im Grundwerkstoff durch den Umformvorgang eingehend untersucht worden /Brühl 1986/. Dies sind Gefügeflockungen und Mikrorißbildung bei der Warmumformung von ferritischen und austenitischen Stählen /Jahn 1975/. Die Ursachen von Gefügeflockungen beim Warmbiegen werden im wesentlichen bestimmt durch die Bildung von Phasen mit verändertem Umformverhalten innerhalb des Werkstoffes. Dies sind niedrigschmelzende oder leicht verformbare Phasen wie Sulfidverbindungen, die zu Trennungen im Werkstoff bei der Umformung innerhalb des Werkstoffgefüges führen. Gefügetrennungen können auch auftreten, wenn spröde Phasen im Werkstoff eingeschlossen sind und zu lokalen Spannungsüberhöhungen im Werkstoff führen. Die Bildung dieser Phasen ist unabhängig von dem Biegeverfahren wie dem "Biegen auf der Platte", dem "Hamburger Verfahren" oder dem "Induktivbiegen" /Blume 1986/. Bei der Rohrbogenfertigung treten Gefügeflockungen bevorzugt in der Bogenaußenseite auf, wenn eine bestimmte Umformung und eine bestimmte Umformtemperatur überschritten werden /Blume 1983a/.

3.4 Veränderungen der Werkstoffeigenschaften und Bauteilfehler durch Warmumformung

Die fertigungsbedingten Ursachen für Bauteilfehler bei der Warmumformung der austenitischen Werkstoffe können den einzelnen Arbeitsschritten bei dem Umformvorgang zugeordnet werden. Dies sind Werkstoffschädigungen durch das Aufheizen des Werkstoffes vor der Warmumformung, bei dem Umformvorgang durch die Werkstoffbeanspruchung und bei der Wärmebehandlung nach der Warmumformung.

Unter Warmumformung wird eine Formänderung im Temperaturbereich zwischen der Rekristallisations- und der Solidustemperatur verstanden. In diesem Temperaturbereich tritt bei der Verformung des Werkstoffes eine Entfestigung durch Erholung und Rekristallisation ein. Somit können besonders große Umformgrade erzeugt werden. Im allgemeinen nimmt bei

austenitischen Werkstoffen die Fließspannung k_f mit steigender Werkstofftemperatur ab, so daß der zur plastischen Verformung notwendige Kraftaufwand verringert wird. Bild 3.4 zeigt die Abnahme der Fließspannung k_f in Abhängigkeit der Temperatur für unterschiedliche austenitische Stähle. Die Fließspannung k_f ist weiterhin abhängig von den Legierungselementen, dem Gefügebautbau und dem Spannungszustand im Werkstoff.

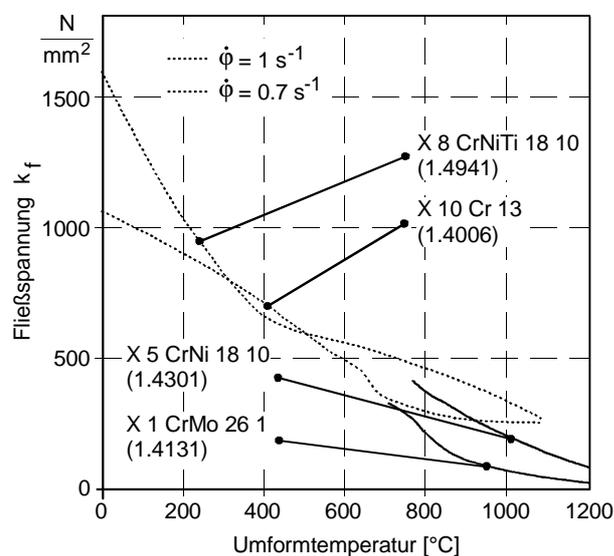


Bild 3.4: Fließspannung k_f in Abhängigkeit von der Umformtemperatur
/Schuler 1996, Klapp 1989/

Die vollständige Rekristallisation von austenitischen Werkstoffen erfolgt erst oberhalb von 900°C und weist, verglichen mit den Eigenschaften von ferritischen Kohlenstoffstählen, eine relativ geringe Rekristallisationsgeschwindigkeit auf. Damit eine Warmumformung der austenitischen Rohrbögen nach dem "Hamburger Verfahren" möglich wird, ist somit der Werkstoff auf eine relativ hohe Umformtemperatur zu erwärmen. Dieses stellt die wesentliche Ursache für Werkstoffveränderungen und daraus resultierende Schadensentwicklungen im eingebauten Zustand unter betrieblichen Beanspruchungen dar.

Öfen verwendet, wie sie für unlegierte oder niedriglegierte Stähle üblich sind. Werkstoffschäden können sich ergeben aus chemischen Reaktionen an der Oberfläche des Werkstoffes mit den Rauchgasen der Brenner. Hierdurch reduziert sich die hohe Korrosionsbeständigkeit der Werkstoffe im Bauteileinsatz. Die wesentlichsten Reaktionen entstehen durch den Schwefelgehalt und den Kohlenstoffanteil innerhalb der Ofenatmosphäre. Nichtrostende Stähle mit hohen Nickelgehalten bilden mit schwefelhaltigen Gasen Nickelsulfide auf der Werkstoffoberfläche. Durch die Diffusion der Schwefelgase in das Werkstoffgefüge können auch innerhalb des Werkstoffes Nickelsulfide an der Oberfläche von Korngrenzen gebildet werden. Diese haben einen sehr niedrigen Schmelzpunkt von ca. 800°C, was zur Lockerung des Kornverbandes und zur Bildung von Mikrorissen während der Umformung im Werkstoffgefüge führt /Klapp 1989/.

Durch Kohlenstoffüberschuß oder Kohlenstoffmangel in der Ofenatmosphäre können ebenfalls Veränderungen im Werkstoffgefüge verursacht werden. Eine stark reduzierende Atmosphäre im Ofen (Gasüberschuß) führt zu Aufkohlungen und Chromverarmung, eine oxidierende Atmosphäre bringt Entkohlung der äußeren Schichten mit sich. Bei ordnungsgemäßer Flammführung sind diese Einflüsse nicht von Bedeutung, weil sie auf sehr dünne Oberflächenschichten beschränkt bleiben.

Eine direkt auftreffende Flamme kann jedoch starke und tiefe Veränderungen an der Oberfläche bewirken. Verbrennungen und starke Aufkohlung haben eine ähnliche Wirkung wie die erwähnten Nickelsulfide /Klapp 1989/. Um eine Aufkohlung des Werkstoffgefüges durch die Ofenatmosphäre zu vermeiden und eine gleichmäßigere Erwärmung der Rohrwandungen vor dem Umformvorgang zu gewährleisten, ist das Hamburger Verfahren teilweise erweitert worden mit induktiver Erwärmung des Einsatzrohrs /Pichler 1991/.

Durch den Kohlenstoffanteil in der Ofenatmosphäre kann es zur Bildung von Chromkarbiden im Werkstoffgefüge kommen. Die Bildung von Chromkarbiden an den Korngrenzen bestimmt wesentlich die Sensibilität des Werkstoffes hinsichtlich interkristalliner Korrosion. Das Ausmaß der interkristallinen Korrosionsanfälligkeit ist abhängig vom Kohlenstoffgehalt, von der Sensibilisierungsdauer, der Sensibilisierungstemperatur und von der Temperatur vorausgegangener Lösungsglühbehandlungen /Gräfen 1978/. Die Ursache der Bildung der Karbide liegt in der überproportional abnehmenden Löslichkeit von Kohlenstoff in dem austenitischen Werkstoff mit abnehmender Temperatur /Oppenheim 1974/. Obwohl Kohlenstoff die Ausbildung des austenitischen Werkstoffgefüges fördert, ist die Bildung von Kohlenstoffausscheidungen an den Korngrenzen bei der Abkühlung unbedingt zu vermeiden. Bei Temperaturen von etwa 500°C bildet sich in Verbindung mit dem Chrom als Legierungselement chromreiches Karbid Cr_{23}C_6 an den Korngrenzen /Becker 1989/. Die Neigung Chromkarbide zu bilden, wird in Zeit-Temperaturschaubildern (Kornzerfallsanfälligkeitsdiagrammen) für die jeweilige Legierung angegeben. Bild 3.5 zeigt das Auftreten des Kornzerfalls in Abhängigkeit der Glüh Temperatur und Glühdauer für unterschiedliche Kohlenstoffgehalte eines unstabilisierten austenitischen 18/10 Stahls und den mit Niob stabilisierten austenitischen Stahl X 6 CrNiNb 18 9.

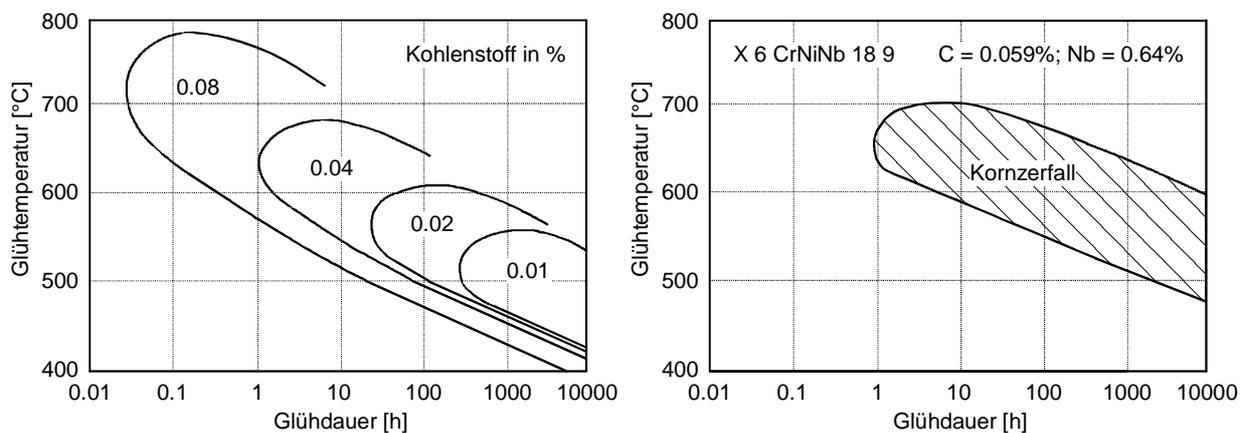


Bild 3.5: Lage der Kornzerfallsfelder unstabilisierter austenitischer 18/10 Stähle in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes /Rocha 1962/ und für den stabilisierten Stahl X 6 CrNiNb 18 9 /Runge 1991/

In der linken Darstellung ist mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt und zunehmender Temperatur eine überproportionale Vergrößerung des Bereichs erkennbar, bei dem im Werkstoff Kornzerfall eintritt. Durch die Zugabe der Legierungselemente Titan und Niob wird eine Stabilisierung der Legierung gegenüber dem Kornzerfall erreicht.

Der Temperaturbereich, in dem bei vergleichbarem Kohlenstoffgehalt Kornzerfall eintritt, wird dadurch deutlich erhöht. Diese Legierungselemente besitzen eine hohe Affinität gegenüber dem frei werdenden Kohlenstoff bei der Abkühlung durch die Bildung von Titan- oder Niobkarbiden. Der Kohlenstoff steht dann für eine Bildung von chromreichem Karbid Cr_{23}C_6 an den Korngrenzen nicht mehr zu Verfügung.

Eine weitere Werkstoffschädigung kann sich ergeben durch einen zu großen Zeitumfang, bei dem der austenitische Werkstoff den erhöhten Temperaturen ausgesetzt wird. Aufgrund der abnehmenden Löslichkeit von Kohlenstoff mit sinkender Temperatur sollte der Werkstoff nach dem Umformvorgang möglichst rasch abgekühlt werden. Hierdurch wird die mögliche Bildung von Karbid- und Nitridausscheidungen an den Korngrenzen verringert. In einem ordnungsgemäß wärmebehandelten austenitischen Stahl (lösungsgeglüht und abgeschreckt) liegt im Gefüge kein freier Kohlenstoff mehr vor. Der Werkstoff ist dadurch beständig gegenüber interkristalliner Korrosion /Wachter 1996/.

Aufgrund der relativ hohen Temperatur, bei der eine vollständige Rekristallisation in austenitischen Werkstoffen erreicht wird, und der notwendigerweise möglichst niedrigen Umformtemperatur zur Vermeidung von Kornzerfall, Karbidbildung und Kornwachstum im Werkstoffgefüge, erfolgt die Umformung bei dem "Hamburger Verfahren" als Halbwarmumformung. Hierbei erfährt der Werkstoff keine vollständige Rekristallisation, so daß auch Änderungen in den Werkstoffeigenschaften auftreten, wie sie bei der Kaltumformung von austenitischen Werkstoffen zu beobachten sind.

3.5 Veränderungen der Werkstoffeigenschaften durch Kaltverformung

Bei plastischer Umformung von metallischen Werkstoffen wird der Gitterverbund im Werkstoffgefüge durch eine äußere Kraftwirkung bleibend verformt. Die Kaltformgebung erfolgt unterhalb der Rekristallisationstemperatur. Hierbei kommt es nach dem Überschreiten einer bestimmten Schubspannung im Werkstoff zu Gleitbewegungen zwischen einzelnen Atomen durch starres Abgleiten zueinander gekoppelter Atomverbände und durch Verschiebung von Versetzungen innerhalb des Gitterverbands der Metalle. In den kubisch - flächenzentrierten Gittern, wie sie in austenitischen Stählen vorliegen, kommt es durch Scherung zum Abgleiten ganzer Gitterbereiche und zur Zwillingsbildung. Während der Verformung werden im Gitterverbund ständig neue Versetzungen gebildet, die bei einer weiteren Verformung durch den Gitterverbund bewegt werden. Die Bewegungen der Versetzungen werden an Kristallgrenzen, an Fremdatomen im Gitterverbund oder an Schnittstellen mit anderen Versetzungen aufgehalten, so daß für die weitere Aktivierung der Bewegungen eine höhere Spannung aufgebracht werden muß. Hierdurch verfestigt sich der Werkstoff. Die Kennwerte für die Verformung, Dehngrenzen, Zugfestigkeit, Streckgrenzenverhältnis und Härte steigen an.

Bei metastabilen austenitischen Werkstoffen ist es möglich, daß zu diesem allgemeinen Verfestigungsmechanismus mit zunehmender Verformung eine Phasenänderung auftritt, die eine

zusätzliche Verfestigung bewirkt. Diese Phasenänderung im festen Zustand wird als martensitische Umwandlung bezeichnet.

Begleitend mit der Phasenänderung des Werkstoffes verändern sich die magnetischen Werkstoffeigenschaften. Dieses hat einen erheblichen Einfluß auf die Anpassung der Wirbelstromtechnik als elektroinduktives Prüfverfahren. Austenitisches Werkstoffgefüge mit seiner kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur zeigt paramagnetisches Werkstoffverhalten. Der gebildete Martensit mit seiner kubisch – raumzentrierten Gitterstruktur hingegen besitzt ferromagnetische Werkstoffeigenschaften. Bei der Fertigung der untersuchten Rohrbögen bilden sich durch die plastische Verformung des Werkstoffes Bauteilbereiche mit unterschiedlichen Umformgraden aus. Dieses ist verbunden mit der Ausbildung örtlich unterschiedlicher ferromagnetischer Werkstoffeigenschaften. Diese lokalen Änderungen der elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften beeinflussen die Ausbildung der elektromagnetischen Feldverteilungen, die zu einer Ausbildung von Wirbelstromsignalen bei der Untersuchung von Bauteilen aus metastabilen austenitischen Werkstoffen führen. Zur Interpretation dieser Wirbelstromsignale ist eine umfassende Kenntnis der Ursachen der Änderungen elektromagnetischer Werkstoffeigenschaften durch Fertigungsverfahren und betriebliche Beanspruchungen notwendig.

3.5.1 Martensitbildung in metastabilen austenitischen Werkstoffen

Unlegiertes Eisen besteht bei Raumtemperatur aus kubisch – raumzentrierten Ferrit - Kristallen (α -Eisen), die beim Erwärmen über 906°C in kubisch – flächenzentrierte Austenit – Kristalle (γ -Eisen) übergehen. Bei Unterschreitung einer Temperatur von 723°C erfolgt in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes wiederum eine Phasenänderung in die der kubisch – raumzentrierten Gitterstruktur. Austenitische Stahlsorten mit ihrer kubisch – flächenzentrierten Gitterstruktur sind somit eine Hochtemperaturmodifikation der Eisenlegierungen, deren Existenz bei Raumtemperatur durch austenitbildende Legierungselemente, wie z.B. Kohlenstoff, Stickstoff oder Nickel ermöglicht wird. In den Mischkristallen der austenitischen Stahllegierungen wird durch die martensitische Umwandlung in die kubisch – raumzentrierte Gitterstruktur (α -Eisen) somit eine thermodynamisch stabilere Phase gebildet. Dabei ist es unerheblich, ob diese martensitische Umwandlung durch eine Tieftemperaturbehandlung oder durch plastische Werkstoffverformung induziert wird. Dieser Martensit wird zur Unterscheidung von α -Martensit, der in kohlenstoffhaltigen Stählen gebildet wird, als Nickelmartensit, Verformungsmartensit oder auch als α' -Martensit bezeichnet /Funke 1969/. Im Vergleich zum α -Martensit besitzt der α' -Martensit gute Verformungseigenschaften /Dietrich 1964/. Die Temperatur, bei der für die entsprechende Legierung eine derartige Umwandlung durch Unterkühlung beginnen kann, wird Martensittemperatur M_s genannt. Durch das Aufprägen von Spannungen und Verformungen ist es möglich, auch oberhalb dieser Temperatur eine Martensitbildung herbeizuführen. Die höchste Temperatur, bei der noch Umformmartensit gebildet werden kann, wird als M_d -Temperatur bezeichnet. Oberhalb dieser Temperatur ist eine Martensitbildung nicht möglich. Je niedriger diese M_d -Temperatur liegt, desto stabiler verhält sich das Ausgangsgefüge gegenüber einer Martensitbildung.

Die Transformation des kfz-austenitischen Werkstoffgefüges erfolgt bei vielen hochlegierten Stählen zunächst über Zwischenstufen, in Abhängigkeit des Spannungszustandes und dem Verformungsgrad des Werkstoffes. Zunächst bildet sich eine hexagonale Gitterstruktur, der ϵ -Martensit, innerhalb der Gleitebenen des kfz-austenitischen Gitters aus. Die Ausbildung des ϵ -Martensit erfolgt in Form von sehr dünnen Platten, die sich durch das ganze Austenitkorn im Werkstoff ausdehnen können. Danach erfolgt die Umwandlung des ϵ -Martensit in den krz- α' -Martensit bei weiterem Anhäufen von Versetzungen innerhalb der Gleitebenen. Erst bei dem Aufbau von mehrachsigen Spannungszuständen wächst dieser Verformungsmartensit in einer unregelmäßigen Form heraus zu einem vielflächigen α' -Block.

Ein zweiter Mechanismus besteht in der Möglichkeit der direkten Umwandlung des austenitischen γ -Gefüges in den α' -Martensit. Die Anteile der Umwandlungsmechanismen zur Bildung des α' -Martensits sind insbesondere abhängig von der Verformungstemperatur und

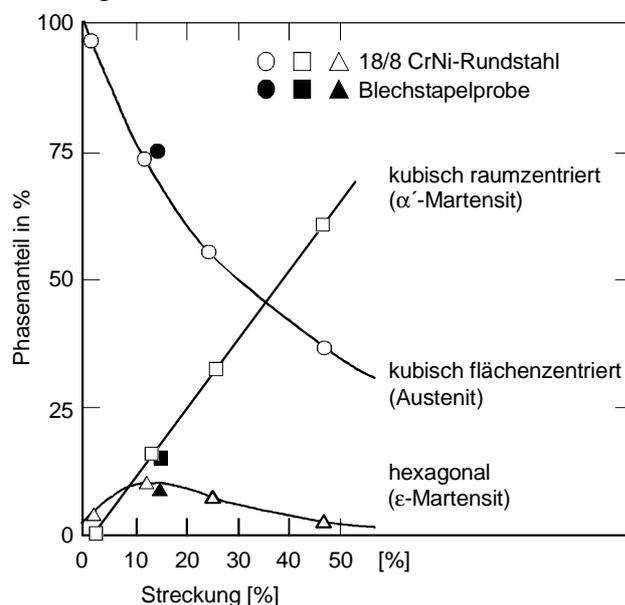


Bild 3.6: Phasenanteile eines 18/8 Chrom-Nickel-Stahls in Abhängigkeit von dem Streckwert /Jung 1983/

aufgeprägte Spannungen unterhalb der Streckgrenze induziert werden. Die Gefügeumwandlung ist zu beobachten bei niederfrequenter Schwingungsbeanspruchung unterhalb der Zugfestigkeit /Bayerlein 1989, Schreiber 1997, Rao 1999/. Der spannungsinduzierte α' -Martensit ist in der Entstehung und in der Ausbildung mit dem Abkühlmartensit im austenitischen Werkstoff identisch /Hecker 1982/.

Das Korrosionsverhalten von austenitischem Werkstoff mit Anteilen von α' -Martensit im Werkstoffgefüge gegenüber nicht kalt verformtem Werkstoff unterscheidet sich in Abhängigkeit von dem Korrosionspotential, dem die Werkstoffoberflächen ausgesetzt werden. Beim Vorhandensein von Chlorionen werden lokale martensitische Werkstoffbereiche bevorzugt angegriffen /Heller 1981/.

den Legierungselementen /Abrassart 1973, Heller 1981/. Zur Beobachtung der metallurgischen Umwandlungsphänomene werden Dilatometerverfahren in Kombination mit mikroskopischen Methoden angewendet /Hornbogen 2000/.

In Bild 3.6 ist der Anteil der verschiedenen Phasen in Abhängigkeit der Streckung eines 18/8 Chrom - Nickel Stahls wiedergegeben. Bei geringer Verformung wird ein relativ großer Anteil von ϵ -Martensit gebildet, dessen Anteil am Gesamtgefüge sich aufgrund der ϵ -Martensitumwandlung in α' -Martensit mit zunehmender Streckung verringert.

Die Bildung von α' -Martensit im austenitischen Werkstoffgefüge kann auch durch

Die Bildung von Verformungsmartensit durch Kaltverformung auf die mechanischen und magnetischen Eigenschaften ist frühzeitig und umfangreich für austenitische Stahllegierungen untersucht und dokumentiert worden /Baerleken 1961/. Im allgemeinen erhöhen sich die magnetischen Kenngrößen wie die Permeabilität und die Koerzitivfeldstärke mit zunehmender Streckung in Abhängigkeit von der Austenitstabilität /Dietrich 1976/.

3.6 Zu unterstellende Schadensmechanismen durch betriebliche Beanspruchungen

Rohrbögen gehören in Rohrleitungssystemen zu den hoch belasteten Bauteilen. Sie werden durch den Innendruck und Biegemomente im Rohrleitungssystem beansprucht. Während Umfangsschweißnähte, Formstücke und Sammler aufgrund örtlicher Fehler und der nur örtlichen Spannungsüberhöhung im Schadensfall eine Leckage zeigen, neigen Rohrbögen aufgrund der resultierenden Spannungen in Umfangsrichtung zum Aufplatzen. Bei der Zeitstandsbeanspruchung von Rohrbögen bestätigt sich fast ausnahmslos, daß die höchste Schädigung auf der Außenfaser mit einer Orientierung in Längsrichtung auftritt und damit auf die hohe Umfangsspannung hinweist /Brühl 1985/. Die Schädigung an den neutralen Fasern ist meistens deutlich geringer /Gramberg 1994, Hofstetter 1994/.

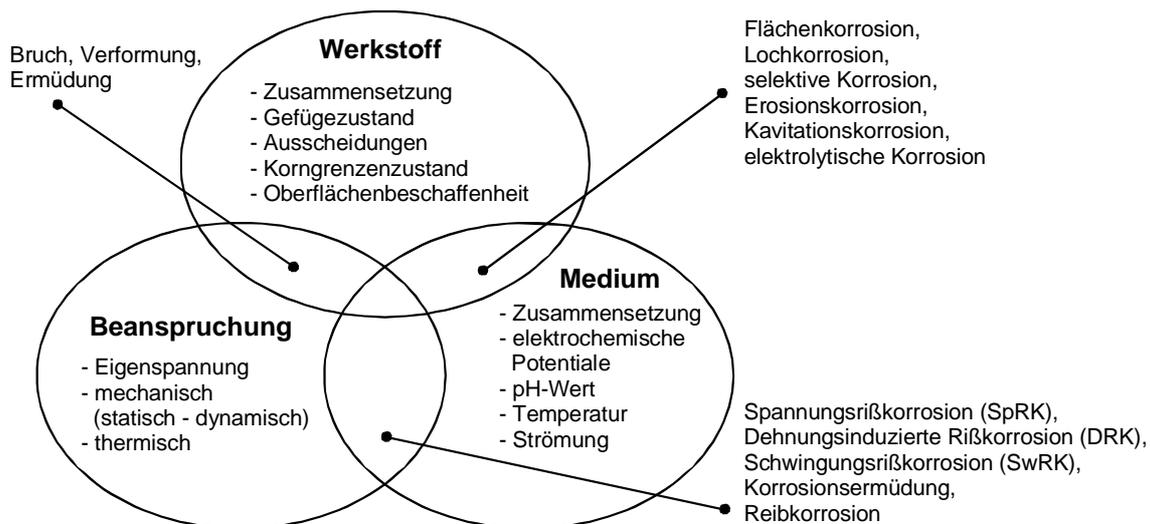


Bild 3.8: Schadensbilder und Schadensmechanismen durch betriebliche Beanspruchung von Rohrleitungen /Bieniusa 1994, Engelmann 1994/

Die Ursache von betrieblichen Schäden an Rohrleitungssystemen erfolgt zumeist durch das Zusammenwirken der Einflußfaktoren Werkstoff, Medium und mechanische Beanspruchung /Hänninen 1985/.

In Bild 3.8 ist eine Einteilung der unterschiedlichen Kombinationen und den sich daraus ergebenden Schadensbildern und Schadensmechanismen schematisch zusammengestellt. Aus den Betriebserfahrungen mit Komponenten von Kraftwerken und Chemieanlagen ist bekannt, daß Angriffe auf den Strukturwerkstoff, insbesondere durch Korrosion, Erosion und

Ermüdung auftreten, die entweder auf die Empfindlichkeit des Werkstoffes, Auswirkung der Umgebungsbedingungen oder Nichtberücksichtigung von Belastungen zurückzuführen sind.

Die Schadensmechanismen, die primär aus der **Beanspruchung** resultieren, entstehen durch mechanische und thermische Belastungen, die sowohl statisch als auch dynamisch auftreten können. Die thermische Beanspruchung der Rohrleitungen von Leichtwasserreaktoren liegt zwischen 250°C bis 330°C /Kalwa 1982/. Die Beanspruchungen werden unterschieden zwischen spezifizierbaren und nicht spezifizierbaren Belastungen. Spezifizierbare Belastungen sind Grundlage von Auslegung, Konstruktion und Herstellung. Eine Schadensentwicklung ist hierdurch nicht zu erwarten. Aufgrund der erwarteten betrieblichen Beanspruchung werden Festigkeitsberechnungen und Bauteilversuche zur Absicherung der Bauteilauslegung durchgeführt /Kußmaul 1986/.

Ausführliche Untersuchungen über das Bruchverhalten von austenitischen Rohrbögen aus dem Werkstoff 1.4541 mit Innendruck und äußerem überlagerten Biegemoment bei schwingender Biegebeanspruchung zeigten, daß die höchsten Werkstoffspannungen in Abhängigkeit der Orientierung des aufgebrachtten äußeren Biegemoments innerhalb der Rohrwandung auf der Innen- oder der Außenoberfläche liegen. Aufgrund der hohen Werkstoffzähigkeit versagten die Rohrbögen bei den Untersuchungen in Form von Leckagen /Müller 1984, Diem 1992, Schwarz 1992/.

Nicht spezifizierte Belastungen können Temperaturschichtungen der Medien in den Rohrleitungen und Komponenten sein, deren Auswirkung durch eine Nachbewertung der vorhandenen Bauteilbeanspruchung quantifiziert wird. Bedingt spezifizierbare Belastungen können z.B. Strahlenbildung innerhalb der Medien durch undichte Rückschlagklappen oder Ventile in komplexen Bauteilen wie Armaturen und Abzweigen sein. Die Auswirkung solcher thermischen Belastungen kann nur schwer nachvollzogen werden. Die Beanspruchung aus nicht- und bedingt spezifizierbaren Belastungen ist bei entsprechendem Kenntnisstand und Erfahrung direkt nur durch Überwachungsmaßnahmen erfaß- und beherrschbar /Bartonicek 1991, König 1998/.

Austenitische Werkstoffe haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit, wodurch bei Temperaturschichtungen in den Rohrleitungen lokal unterschiedliche Wärmeausdehnungen resultieren können. Führen diese Wärmeausdehnungen zu einem lokalen Spannungsaufbau über die Fließgrenze des Werkstoffes, kommt es zu einer lokalen Deformation des Bauteiles. Durch diese zyklische thermische Beanspruchung kann es zu einer fortschreitenden Akkumulation der Deformation kommen, wenn die Primärspannung aus Innendruck im Rohrleitungssystem, dem Eigengewicht und der Verschiebung relativ hoch ist. Dieser Vorgang wird als "Ratcheting" bezeichnet /Diem 1992a/. Bei möglichem "Ratcheting" muß die Beanspruchungstemperatur im Kaltumformbereich des Werkstoffes liegen. Veränderliche, insbesondere thermische Belastungen tragen einen Anteil zur Werkstoffermüdung bei /Hofstötter 1992, Bendick 1994/. Zur Absicherung gegenüber einer möglichen Schadensausbildung in

Rohrleitungen müssen daher begleitende Betriebsüberwachungen der entsprechenden Bauteile durchgeführt werden.

Die Entwicklung von Korrosionsschäden im Grundwerkstoff von druckführenden Komponenten durch das **Medium** aufgrund von ungünstigen Werkstoffzuständen kann als ausgeschlossen angesehen werden /König 1998/. Dieses wird erreicht durch die Absenkung der elektrischen Leitfähigkeit, der Absenkung des Sauerstoffanteils im Wasser und einer ständigen Überwachung der entsprechenden Wasserchemie. Schadensursachen, bewirkt durch das Medium in den Rohrleitungen, treten bevorzugt in Schweißnahtbereichen auf. Im Nahtbereich unterliegt der Werkstoff einer hohen Sensibilisierung aufgrund der sich besonders inhomogen ausbildenden Werkstoffgefüge. Teilweise erfolgt eine Reißinitialisierung in Verbindung mit thermisch induzierten Eigenspannungen im Schweißnahtgefüge /Blind 1983, Hakala 1988, Erve 1995/. Grundsätzlich muß bei der Abschätzung einer unterstellten Schadensentwicklung durch den Medieneinfluß unterschieden werden hinsichtlich dem instationären Betrieb der Leitungen bei An- und Abfahrvorgängen, stationär gefüllten Leitungen, die nicht durchströmt werden, und nicht ständig durchströmten Leitungen. Bei nicht ständig durchströmten Systemen ist die Überwachung einer ausreichenden Wasserchemie zur Vermeidung von Korrosionsschäden durch das Medium schwierig.

Die Veränderung des **Werkstoffes**, die zu einem Schaden im Rohrleitungssystem des Primärkreislaufes führen kann, ist im wesentlichen die Werkstoffversprödung. Sie kann verursacht werden durch Neutronenbestrahlung und thermisch induzierte Vorgänge im Werkstoff. Phänomene der Versprödung durch Werkstoffbestrahlung sind begrenzt auf den Reaktor-druckbehälter und die Reaktoreinbauteile. Einer besonderen Überwachung hinsichtlich einer Versprödung durch Bestrahlung unterliegen die Schweißnähte in unmittelbarer Nähe zum Reaktorkern /Kußmaul 1993, Hänninen 1993, Lowe 1994/. Die untersuchten Rohrbögen des Einspeise- und den Nachkühlsystems befinden sich nicht in unmittelbarer Nähe zum Reaktorkern. Sie unterliegen daher nur einer geringen Strahlungsintensität und kurzzeitigen Bestrahlungsdauer während der An- und Abfahrvorgänge. Eine Werkstoffveränderung durch Neutronenbestrahlung ist nicht zu erwarten, da die Neutronenfluenz in den Rohrleitungssystemen zu gering ist /Zaiss 1994/. Thermisch induzierte Werkstoffveränderungen sind aufgrund der geringen Beanspruchungstemperatur ebenfalls nicht zu erwarten.

Bauteilschäden durch Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften resultieren zumeist aus einer fehlerhaften Bauteilfertigung. Eine Herabsetzung der Reißfähigkeit des Werkstoffes kann durch einen lokal hohen Umformgrad erreicht werden /Dangel 1969/. Weitere fertigungsbedingte Ursachen für eine Schadensentwicklung im Betrieb ergeben sich aus einer ungleichmäßigen Ausbildung der Querschnittsflächen und Wandstärken von Rohrbögen /Kußmaul 1969/. Hierdurch entsteht eine verminderte Bauteilfestigkeit durch eine ungleiche Spannungsverteilung innerhalb des Werkstoffes /Schindler 1994/. Eine Schwächung des Bauteiles durch herstellungsbedingte Bauteilschädigungen ergibt sich aus Riefen, die zu einer lokalen Spannungsüberhöhung führen und zur Reißinitiierung beitragen können /Naumann 1982/.

3.7 Gewährleistung der Integrität von Rohrleitungen durch betriebliche Überwachung

Um eine Beeinträchtigung der Integrität von Rohrleitungskomponenten durch die betrieblichen Belastungen und durch die unterstellten Schädigungsmechanismen zu gewährleisten, kommt der Bauteilüberwachung und der Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen eine besondere Bedeutung zu. Im allgemeinen wird die Auswahl der erforderlichen Maßnahmen bestimmt durch den Kenntnisstand über die vorhandene Komponentenqualität nach der Auslegung, Herstellung und den bisherigen Betriebsbelastungen. Weiterhin werden mögliche Maßnahmen angepaßt aufgrund der gesammelten Erkenntnisse über betriebliche Schädigungsmechanismen und bisherigen Erfahrungen mit den betreffenden Komponenten. Der Umfang der Maßnahmen wird beschrieben durch die Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses (KTA), Teil 4, „Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung“ /KTA 3201.4 6/99/.

Durch die Betriebsüberwachung ist sicherzustellen, daß keine unbekannt dynamischen Bauteilbelastungen vorhanden sind. Zudem sind die für eine Werkstoffermüdung bestimmenden Belastungen zu erfassen. Sie bilden die Grundlage für die Bestimmung des aktuellen Teilerschöpfungsgrades der überwachten Komponenten. Ziel einer solchen Ermüdungsanalyse ist der Nachweis, daß der reale Erschöpfungsgrad als Summe der Teilerschöpfungen stets kleiner ist als die zulässige Gesamterschöpfung. Durch die Überwachung der Ursachen für betriebliche Schädigungsmechanismen kann selbst beim Auftreten von Schäden deren Auswirkung durch geeignete Maßnahmen minimiert werden /Zaiss 1991/. Betriebliche Meßgrößen an überwachten Bauteilen werden kontinuierlich aufgenommen und registriert. Dieses sind die Kontrolle der Wasserzusammensetzung, die Lecküberwachung, die Körperschall- und Schwingungsüberwachung, Temperaturmessungen, Dehnungsmessungen oder Verschiebungsmessungen. Die Meßwerte werden in Bezug gesetzt zu der Anlagenleistung und den Schaltsignalen. Zumeist werden durch die Betriebsüberwachung globale Belastungen erfaßt.

Als redundante Maßnahmen und zur Absicherung der Wirksamkeit der Betriebsüberwachung werden wiederkehrende Prüfungen durchgeführt. Wiederkehrende Prüfungen dienen zur Überwachung möglicher Folgen von Schadensmechanismen, die mit der Betriebsüberwachung nicht erfaßbar sind, sowie zum rechtzeitigen Erkennen von Schadensentwicklungen und deren signifikanten Auswirkungen /Bartonicek 1998/. Hierbei finden im wesentlichen zerstörungsfreie Prüfverfahren Einsatz, um Werkstoffveränderungen, Anrißbildung und Rißwachstum rechtzeitig zu erkennen. Die Auswahl der zerstörungsfreien Prüfverfahren wird wesentlich bestimmt von dem Kenntnisstand der Schädigungsmechanismen und der Leistungsfähigkeit der Verfahren. Durch die Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren können Schadensentwicklungen durch nicht spezifizierte oder spezifizierbare Belastungen an lokalen Bauteilbereichen überwacht werden.

Bei der Auswahl der Verfahren zur Betriebsüberwachung von Rohrbögen und Rohrleitungen wird unterschieden zwischen Komponenten, die sich innerhalb der Hauptkühlleitung HKL

befinden oder den nuklearen Hilfs- und Nebenanlagen. Rohrbögen mit großen Nennweiten $D_a > 200\text{mm}$ befinden sich hauptsächlich innerhalb der Hauptkühlleitung HKL. Während des Betriebes ergeben sich vorwiegend geringe Änderungen hinsichtlich der Belastung, so daß die Bauteile einer quasistatischen Betriebsweise unterliegen. Rohrbögen mit kleineren Nennweiten $D_a < 200\text{mm}$ finden Anwendung in angeschlossenen Teilsystemen mit zahlreichen Abzweigen und entsprechenden Halterungen. Dadurch ergeben sich zusätzliche Belastungen der Komponenten. Hinzu kommen stark veränderliche Fahrweisen durch Schaltungen oder auch unbeabsichtigte Temperaturtransienten. Hierdurch bedingte zusätzliche Belastungen resultieren hauptsächlich aus Temperaturverteilungen über der Rohrleitungslänge oder im Rohrleitungsquerschnitt. An Komponenten mit geringer Anzahl von Zyklenzahlen ist nur ein geringer Beitrag zum Erschöpfungsgrad zu erwarten. Somit können anstelle einer betriebsbegleitenden Überwachung auch wiederkehrende Prüfungen zur Sicherstellung der Bauteilintegrität sinnvoll eingesetzt werden /Bartonicek 1992/

3.8 Auswahl der zerstörungsfreien Prüftechnik zur Integritätsbewertung von austenitischen Rohrbögen

Aufgrund der beschriebenen Funktionen des Einspeise- und Nachwärmeabfuhrsystems ergeben sich die Bauteilbelastungen durch eine instationäre thermische Bauteilbeanspruchung, die zu lokalem Spannungsaufbau innerhalb des Rohrleitungssystems führen kann, bei gleichzeitiger Benetzung der Werkstoff-Innenoberfläche mit Primärkühlmittel. Die zu untersuchenden Rohrbögen unterliegen den beschriebenen Beanspruchungen bei einer geringen Anzahl von Lastzyklen. Durch die zu unterstellenden Schadensmechanismen des austenitischen Werkstoffes ergeben sich die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des zerstörungsfreien Prüfverfahrens zum Nachweis von Werkstofftrennungen, die von der Innenwandung des Rohrbogens ausgehen. Aufgrund der unterstellten Empfindlichkeit des Werkstoffes hinsichtlich interkristalliner Korrosionsanfälligkeit, bedingt durch die Fertigungstechnik der Rohrbögen, muß das Prüfverfahren eine ausreichende Nachweisempfindlichkeit bezüglich einer Ribbildung durch Spannungsrißkorrosion aufweisen.

Zur Detektion von Werkstofftrennungen und Werkstoffermüdung können grundsätzlich Durchstrahlungsverfahren, Ultraschallverfahren und Wirbelstromverfahren eingesetzt werden. Insbesondere Verfahren der Ultraschalltechnik und der Durchstrahlungsprüfung sind zur Untersuchung von Schweißverbindungen an austenitischen Rohrleitungen angepaßt worden. Durch die inhomogene Ausbildung des Schweißnahtgefüges, in Verbindung mit durch den Fügeprozeß eingebrachten Schweißbeigenspannungen, ergibt sich eine erhöhte Sensibilität hinsichtlich der Ausbildung von Spannungsrißkorrosion. Der Beginn einer Werkstofftrennung an Schweißverbindungen durch Spannungsrißkorrosion erfolgt zumeist senkrecht zur Rohrwandung, ausgehend von der Rohr-Innenwandung /McGaughey 1985/. Die Werkstofftrennungen folgen im allgemeinen den sensibilisierten Korngrenzen innerhalb der Wärmeeinflußzonen der Schweißnaht. Damit ist die Orientierung der Werkstofftrennungen im Schweißnahtbereich bekannt. Entsprechend kann die Prüftechnik an die bevorzugte Orientierung der Ribentwicklung angepaßt werden.

Die grundsätzliche Problematik bei der Anwendung der Ultraschalltechnik zur Prüfung von austenitischen Rohrwerkstoffen ergibt sich aus der hohen Schallschwächung und akustischen Anisotropie des Werkstoffgefüges /Caussin 1979, Neumann 1995/. Die Rißausbildung durch Korrosion folgt zumeist den Orientierungen der Korngrenzen im Werkstoffgefüge, welches zu diffusen Reflexionen des Ultraschalls an den Trennflächen führt. Bei der Prüfung von sphärisch gekrümmten Werkstoffoberflächen ändert sich ständig die Orientierung der Innen- und Außenoberflächen. Dieses erschwert zusätzlich die Analyse der Ultraschallsignale. Weiterhin muß die Orientierung der Schallrichtung möglichst senkrecht zu dem Reflektor stehen. Bei der unterstellten Schadensform in den austenitischen Rohrbögen ist die Richtung der Werkstofftrennungen im Grundwerkstoff jedoch nicht als bekannt vorauszusetzen. Eine Detektion und Rißtiefenbestimmung bei unbekannter Orientierung der Werkstofftrennung ist somit mit diesem Verfahren nur eingeschränkt möglich. Die Bestimmung von Tiefe, Länge und Orientierung von Werkstofftrennungen durch Spannungsrißkorrosion in der Rohrwandung ist mit Ultraschalltechniken bei austenitischen Werkstoffen nicht ausreichend zuverlässig /Becker 2000/.

Der Nachweis von Werkstofftrennungen mit geringer Rißaufweitung mit der Durchstrahlungsprüfung unterliegt gleichermaßen verfahrensspezifischen Einschränkungen wie bei der Ultraschallprüfung. Durch das geringe Volumen einer rißartigen Werkstofftrennung, wie sie bei der Spannungsrißkorrosion auftritt, ergibt sich nur ein geringer Kontrast bei der Abbildung der Risse auf dem Röntgenfilm. Insbesondere wenn die Orientierung der Fehlerausdehnung mit der Strahlenrichtung nicht übereinstimmt. Dadurch ist eine Fehlerdetektion in hohem Maße von der Rißöffnung und der Schräglage im Werkstoffgefüge abhängig /Heidt 1994/. Der Anwendungsbereich der Durchstrahlungsprüfung zur Korrosionsüberwachung im Grundwerkstoff von Rohrleitungen beschränkt sich daher auf den Nachweis von ausgedehnter flächiger Korrosion an der Innenoberfläche durch Loch- oder Muldenkorrosion mit volumenhafter Ausbildung der Bauteilschädigung.

Die Verfahren der Wirbelstromprüfung sind grundsätzlich empfindlich gegenüber rißartigen flächigen Trennungen im Werkstoffvolumen von elektrisch leitfähigen Werkstoffen. Der Anwendungsbereich konventioneller Wirbelstromtechniken ist jedoch beschränkt auf die Erkennbarkeit von Rissen in der Oberfläche oder dem oberflächennahen Werkstoffbereich. Bei einer ausreichenden Erhöhung der Empfindlichkeit und gleichzeitiger Vergrößerung des prüfaren Werkstoffvolumens können mit der Wirbelstromtechnik rißartige Werkstofftrennungen ohne Kenntnis der Rißorientierung im austenitischen Werkstoff der Rohrbögen detektiert werden. Zur Vergrößerung des prüfaren Werkstoffvolumens mit Wirbelstromverfahren sind bereits unterschiedliche technische Ansätze für individuelle Anwendungen realisiert worden, die im folgenden auf ihre Übertragbarkeit zu überprüfen sind. Insbesondere die Anwendung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik bietet Möglichkeiten zur Vergrößerung des prüfaren Werkstoffvolumens, um eine vollständige Prüfung der Rohrwandung zu erreichen.

4 Stand von Wissenschaft und Technik - Wirbelstromverfahren mit hoher Eindringtiefe

Grundlage der Wirbelstromprüfung ist die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften des Systems "Spule – Werkstoff" in Abhängigkeit induzierter magnetischer Wechselfelder. Die Prüfanordnung mit einer Induktionsspule ist in Bild 4.1 gezeigt. Hierbei wird die Spule mit einem zeitlich sich ändernden elektrischen Strom $i(t)$ gespeist, welcher das Primärfeld innerhalb der Spulenwicklungen ausbildet. Entsprechend dem Induktionsgesetz bildet sich eine Wirbelstromverteilung im elektrisch leitfähigen Werkstoff. Die Orientierung der Wirbelstromausbildung folgt dabei konzentrisch in Richtung der Spulenwicklungen. Dieses Wirbelstromfeld im Werkstoff ist wiederum von einem sekundären magnetischen Feld begleitet, welches dem erregenden Primärfeld entgegengesetzt wirkt. Aus der Überlagerung der primären und sekundären Felder ergibt sich der resultierende magnetische Fluß Φ durch die Spulenwicklungen.

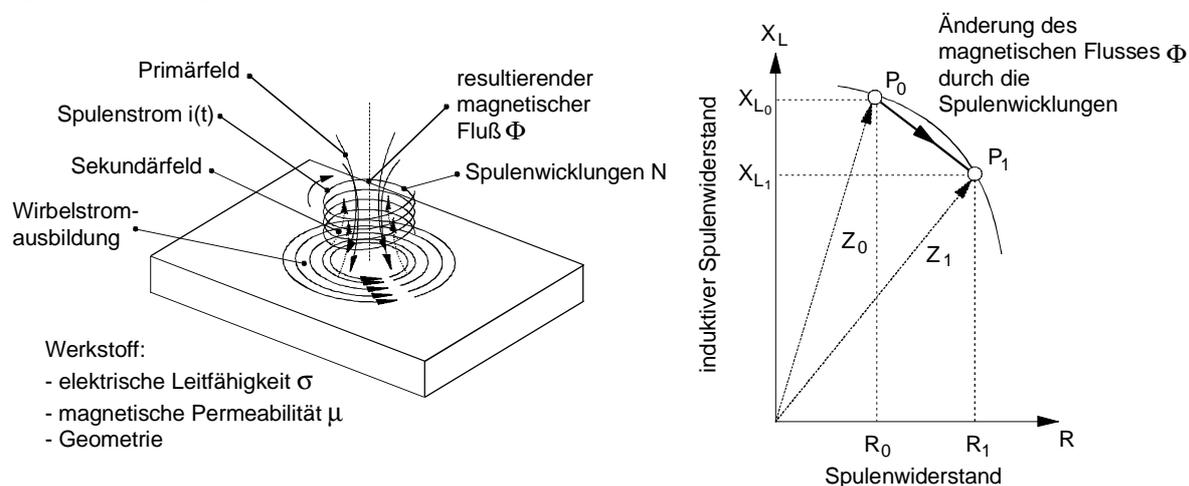


Bild 4.1: Arbeitspunktänderung in der Impedanzebene durch Änderung des magnetischen Flusses Φ durch die Spulenwicklungen

Die Meßgröße bei der Wirbelstromprüfung ist die elektrische Eigenschaft der felddurchfluteten Spule. Diese wird charakterisiert durch die Wechselstromgrößen des induktiven Widerstandes und des Spulenwiderstandes in der Impedanzebene. Der induktive Widerstand $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ der Spule wird bestimmt durch die Erregerfrequenz f und die Induktivität $L = N \cdot \Phi / I$, wobei diese abhängig ist von dem resultierenden magnetischen Fluß Φ durch die Anzahl der Einzelwindungen N der Spule und dem Spulenstrom I . Der magnetische Fluß Φ wird bestimmt durch die Überlagerung des von der Spule induzierten primären Feldes und des sich im Werkstoff ausbildenden sekundären Feldes durch die zeitlich wechselnde Felderregung. Der Spulenwiderstand setzt sich zusammen aus dem ohmschen Widerstand der Spule und dem Wirkwiderstand aufgrund der Wirbelstromverluste im Werkstoff in der Nähe der Spule. Die Darstellung dieser Größen erfolgt üblicherweise als vektorielle Zeigerdarstellung in der Impedanzebene. Es ist ersichtlich, daß sich die Impedanz Z_0 im Punkt P_0 zur Impedanz Z_1 im Punkt P_1 bewegt, sobald sich der resultierende magnetische Fluß Φ durch die Spule ändert. Die Bedingung hierfür ist eine Änderung in der Sekundärfeldverteilung im Werkstoff

des Prüfkörpers. Wesentliche Einflußgrößen sind die elektrische Leitfähigkeit σ , die magnetische Permeabilität μ und Geometrie, die zu einer Störung der Wirbelstromausbildung führen. Werkstofftrennungen in der Oberfläche stören in erheblichem Maß den Verlauf des Wirbelstroms und bilden sich demzufolge als Induktivitätsänderung der Spule ab.

Größe und Richtung der Verschiebung des Zeigers von P_0 zu P_1 sind somit abhängig von Eigenschaftsänderungen des Prüfgegenstandes oder Änderungen der Prüfbedingungen. Die Prüfbedingungen ergeben sich aus der Gestaltung der feldaufprägenden Erregerspule, der Prüffrequenz f und dem Erregerstrom I /Hagemeyer 1990/. Die Kenntnis der Funktionen der Zeigerverschiebung als Ortskurven in der Impedanzebene in Abhängigkeit der Feldverteilungen in dem Prüfgegenstand bilden die Grundlage zur Sensoranpassung und zur Wirbelstromsignalinterpretation. Für ausgewählte Spulenanordnungen sind mathematische Verfahren entwickelt worden, die funktionale Zusammenhänge zur Verlagerung des Arbeitspunkts P in Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften und Prüfbedingungen bestimmen. Zunächst erfolgte dieses in analytischer Form /Förster 1954, Dodd 1969, Dodd 1974/ und später mit Zunahme der Leistungsfähigkeit elektronischer Rechnersysteme mit Hilfe von numerischen Berechnungsverfahren.

Die technische Realisierung eines Meßsystems auf der physikalischen Grundlage der Wirbelstromausbildung unterteilt sich in sechs Einzelfunktionen entsprechend Bild 4.2 /Libby 1971/. Die Felderregung erfolgt mit einem Frequenzgenerator zur Bereitstellung des Spulenstromes $i(t)$ zur Wechselfeldinduktion. Die induzierten Felder werden im Werkstoff entsprechend dem Spulenaufbau und der Bauteileigenschaften moduliert. Bei der Wirbelstromprüfung wird im allgemeinen nicht die tatsächliche Spulenimpedanz als Meßgröße bestimmt, sondern die relative Arbeitspunktverlagerung, ausgehend von einem definierten Bezugspunkt in der Impedanzebene. Diese Signalaufbereitung wird verwirklicht durch eine Signalanpassung mit Hilfe eines Spulenabgleichs oder einer Signalkompensation. Für die weitere Signalanalyse wird das Meßsignal demoduliert, um charakteristische Merkmale für die Signalverarbeitung zu erhalten. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit wird hierbei durch die Grundfrequenz des Meßsignal bestimmt. Weiterhin erforderlich ist eine Funktionseinheit zur Signaldarstellung und Bewertung der gewonnenen Informationen. Für die Anwendung der Wirbelstromtechnik ist ebenfalls eine geeignete Handhabungstechnik für das Spulensystem und für das Prüfteil notwendig.

Zur Realisierung einer Wirbelstromtechnik mit großer Eindringtiefe sind sämtliche Einzelfunktionen an die Aufgabenstellung anzupassen. Die wesentlichste Funktion ist hierbei die gezielte Felderregung durch den Spulenaufbau hinsichtlich der sich im Werkstoff ausbildenden Felder. Voraussetzung für den Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen ist eine ausreichende Störung der Wirbelstromverteilungen in der Werkstofftiefe. Hierdurch wird die notwendige Modulation der Felder erreicht. Dieser Teilfunktion kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Die unterschiedlichen Lösungsansätze zum Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen können übersichtlich unterteilt werden, entsprechend der spezifischen technischen Realisierung der Einzelfunktionen in Bild 4.2.

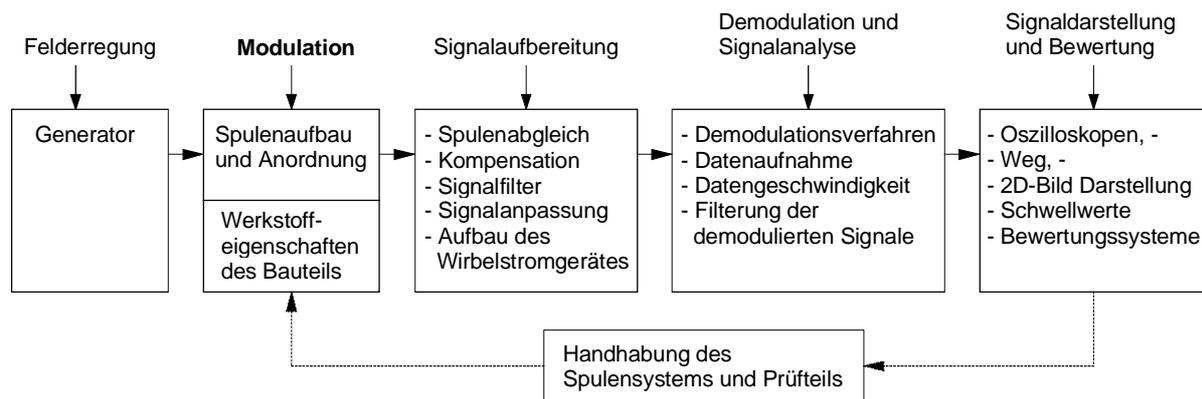


Bild 4.2: *Einzelfunktionen bei der Anwendung elektromagnetischer Prüfverfahren*

4.1 Niederfrequenz-Wirbelstromverfahren

Voraussetzung zur Detektion von verdeckten Werkstofftrennungen ist eine ausreichende Störung der Wirbelstromverteilung im Werkstoffinneren, die zu einer meßbaren Veränderung in der Feldverteilung auf der Werkstoffoberfläche führt. Die Wirbelstromverteilung im Werkstoff ist begleitet von den Feldverteilungen, die dem primären Feld der Erregerspule entgegenwirken, so daß sich die Wirbelstromdichte J_0 auf der Werkstoffoberfläche mit zunehmender Tiefe x im Werkstoff verringert. Die Abnahme der Feldgrößen erfolgt dabei exponentiell entsprechend Gleichung 4.1.

$$(4.1) \quad J_x = J_0 \cdot e^{-x/\delta} \quad \text{exponentielle Abnahme der Wirbelstromdichte}$$

$$(4.2) \quad \delta = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad \text{Eindringtiefe}$$

Der Exponent, mit der die Wirbelstromdichte in der Werkstofftiefe abnimmt, wird bestimmt durch die Erregerfrequenz f , die magnetische Permeabilität μ und die elektrische Leitfähigkeit σ , entsprechend Gleichung 4.2. Da zumeist die elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften durch den Prüfgegenstand festgelegt sind, kann eine Erhöhung der Eindringtiefe nur durch die Wahl einer relativ niedrigen Erregerfrequenz erreicht werden. Bestimmend für den Nachweis von verdeckten Fehlstellen ist im allgemeinen jedoch nicht die physikalische Schwächung der Wirbelströme in der Werkstofftiefe, sondern eine eindeutige Zuordnung der relativ kleinen Wirbelstrom-Signaländerungen der verdeckten Fehlstellen in Bezug zu den großen Signaländerungen, mit denen sich Oberflächenfehler als Störsignale abbilden. Für den Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen ist daher eine eindeutige Zuordnung von Wirbelstromsignalen durch Oberflächeneinflüsse und Wirbelstromstörungen im Werkstoffvolumen notwendig.

Physikalische Eigenschaftsänderungen des Prüfgegenstandes wie Änderungen der Leitfähigkeit, der Permeabilität oder Abstandsänderungen führen jeweils zu einer charakteristischen Verlagerung des Arbeitspunktes. Bei kleinen Änderungen in der Impedanzebene kann die Verlagerung abschnittsweise als linear angenommen werden.

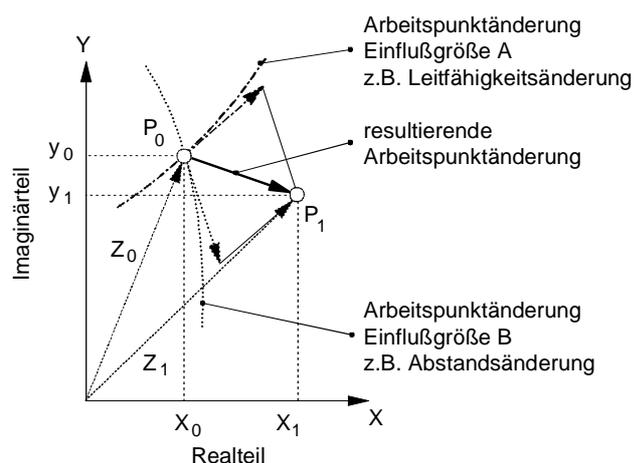


Bild 4.3: Superposition der Arbeitspunktänderungen von zwei Einflußgrößen mit monofrequenter Felderregung

deutig unterschieden werden. Im allgemeinen sind Abstandsänderungen des Wirbelstromsensors zur Werkstoffoberfläche die wesentliche Störgröße und führen zu Überlagerungen von Arbeitspunktänderungen durch Werkstofftrennungen oder Werkstoffinhomogenitäten. Bei dem praktischen Vorgehen zur Trennung zweier überlagerter Arbeitspunktänderungen in der Impedanzebene wird eine Prüffrequenz bestimmt, bei der die Einzeländerungen rechtwinklig zueinander stehen. Durch einen Phasensteller am Wirbelstromgerät wird das in Bild 4.3 gewählte rechtwinklige Koordinatensystem entsprechend gedreht, so daß sich die Signalanteile jeweils nur in horizontaler und vertikaler Richtung ändern.

Dieses Verfahren der "Phasenselektion" ist geeignet, bei niederfrequenten Wirbelstromverfahren Signalausbildungen durch Abstandsänderungen und Werkstofftrennungen zu unterscheiden. Durch die Einschränkung, nur zwei Einflußgrößen trennen zu können, beschränken sich die Anwendungen von Einfrequenz-Wirbelstromverfahren auf Prüfungen von Grundwerkstoffen mit homogenen elektromagnetischen Eigenschaften oder auf Anwendungen, bei denen durch Gestaltung des Spulenaufbaus weitere Störgrößen unterdrückt werden.

Austenitische Stahlwerkstoffe besitzen eine relativ geringe Leitfähigkeit, so daß sich entsprechend Gleichung 4.2 mit niederfrequenten Wirbelstromverfahren relativ große Eindringtiefen erreichen lassen. Zunächst sind hierbei nicht abgeschirmte Tastspulensysteme an Prüfungsaufgaben angepaßt worden, die den Nachweis verdeckter Trennungen im Grundwerkstoff mit Abständen bis zu 7mm von der Werkstoffoberfläche ermöglichen /Maier 1978/.

Ein wesentliches Verfahren zur Unterdrückung von Störsignalen durch den Spulenaufbau ist die Anwendung von Differenzspulenanordnungen oder Mehrspulensystemen. Von Bedeutung sind diese Techniken bei der Prüfung von Schweißnähten auf oberflächennahe Werkstofftrennungen im Schweißnahtgefüge. Durch diese Spulenanordnungen wird erreicht, daß der Anteil von Werkstoffvolumen mit elektromagnetisch ungleichmäßiger Gefügeausbildung bei der Prüfung stets gleichbleibt und somit nicht zu einer Arbeitspunktverlagerung in der

In der Kenntnis, daß nur zwei Einflußgrößen zu einer gemeinsamen Verlagerung von Punkt P_0 zu P_1 führen, können, wie in Bild 4.3 gezeigt, die Änderungen vektoriell überlagert werden. Dadurch kann entsprechend auf die Einzelursachen für die gesamte resultierende Arbeitspunktänderung geschlossen werden. Voraussetzung für diese Betrachtung ist, daß die Einflußgrößen keine gegenseitige Abhängigkeit zeigen und daß die Annahme der linearen Arbeitspunktverlagerung zulässig ist. Durch die vektorielle Überlagerung können lediglich zwei Einflußgrößen bei einer gewählten Erregerfrequenz eindeutig unterschieden werden.

Impedanzebene führt. Die Realisierung dieser Sensortechniken und die Bestimmung der Empfindlichkeit erfolgten für austenitische geschweißte Rohre mit Wandstärken bis zu 4mm /Waas 1984/. Gleichwohl besteht die Möglichkeit, Mehrspulensysteme auch zur Prüfung von austenitischem Grundwerkstoff anzuwenden.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet von niederfrequenten Wirbelstromtechniken ist die Prüfung von Aluminiumwerkstoffen im Flugzeugbau. Hierbei werden in mehrlagigen Strukturteilen verdeckte Ermüdungsrisse und Korrosionsschäden nachgewiesen /Hagemai 1982/. Aluminiumwerkstoffe haben eine relativ hohe elektrische Leitfähigkeit. Um dennoch größere Eindringtiefen und Nachweisgrenzen zu erreichen, ist der Sensoraufbau entsprechend angepaßt worden. Diese Wirbelstromverfahren geben wesentliche Hinweise für die Sensorgestaltung zur Prüfung der in dieser Arbeit betrachteten dickwandigen austenitischen Werkstoffe.

Zur Erhöhung der Eindringtiefe in den Werkstoff kann die Erregerfrequenz bei der Wirbelstromprüfung nicht beliebig verringert werden. Bei der Verwendung von Spulen zur Messung von Störungen in den Feldverteilungen durch Werkstofftrennungen ist die proportionale Abnahme der Meßspannungen mit Verringerung der Prüffrequenz kennzeichnend. Dieses führt zu einer Verringerung der Empfindlichkeit und zu einer Abnahme des Signal-Rausch Verhältnisses bei der Verarbeitung der Wirbelstromsignale /Yu 1995/. Daher werden derzeit zum Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen mit niederfrequenten Wirbelstromtechniken magnetoresistive Sensoren /Mook 2000/ und HTSL-SQUID /Krause 1997/ als Alternative zu Meßspulen erprobt und angewendet. Diese arbeiten frequenzunabhängig und erweitern somit den Meßbereich bis zu Gleichfeldanwendungen /Braginski 2000/.

4.2 Mehrfrequenz-Wirbelstromverfahren

Für den Nachweis verdeckter Werkstofftrennungen sind Techniken zur Unterdrückung von Störsignalen von erheblicher Bedeutung, um die relativ kleinen Signaländerungen zu identifizieren. Bei der Anwendung der Einfrequenz-Wirbelstromprüfung ist es nicht möglich, mehrere überlagerte Einflußgrößen entsprechend dem Verfahren der ‚Phasenselektion‘ zu trennen. Die Anwendung der Mehrfrequenzverfahren bietet eine erweiterte Möglichkeit, Störsignale von Signalen durch Werkstofftrennungen zu unterscheiden.

Zwei unterschiedliche Techniken sind hierbei grundsätzlich anwendbar, um eine verbesserte Signalinterpretation zu erreichen. Dieses sind die Mehrfrequenz-Mischtechniken und die Mehrfrequenz-Korrelationstechniken. Die Gemeinsamkeit beider Verfahren besteht in der Felderregung mit mehreren diskreten Frequenzen. Hierbei kann die Wirbelstrominduktion im Werkstoff als Einkanalmeßtechnik durch ein Erregersignal mit mehreren Frequenzanteilen erfolgen oder als Mehrkanalmeßtechnik mit unterschiedlichen Spulensystemen für die einzelnen Erregerfrequenzen.

Grundlage der Mehrfrequenz-Mischtechnik ist das Prinzip der Phasenselektion, entsprechend dem Vorgehen bei der einfrequenten Felderregung. Bei der Mehrfrequenz-Mischtechnik

werden die Arbeitspunktverlagerungen der einzelnen Erregerfrequenzen in der Impedanzebene zeitgleich zu einem resultierenden Wirbelstrom-Mischsignal vektoriell überlagert. Eine Störsignalunterdrückung wird erreicht, wenn sich die Arbeitspunktverlagerung eines Störsignals in den Wirbelstromkomponenten von zwei Frequenzen gleichartig abbildet. Durch die vektorielle Subtraktion der Arbeitspunktverlagerungen ist in dem resultierendem Mischsignal die Störkomponente nicht mehr enthalten. Voraussetzung zur Anwendung der Mehrfrequenz-Mischtechnik ist, daß interessierende charakteristische Signaländerungen durch die Subtraktion erhalten bleiben. Durch eine geeignete Gerätetechnik können die einzelnen Wirbelstromkomponenten für jede Erregerfrequenz verstärkt und in der Impedanzebene phasengedreht werden, um die Signalüberlagerung zu ermöglichen /Libby 1971, Betzold 1978/.

Von Bedeutung ist die Mehrfrequenz-Mischtechnik bei der Prüfung von austenitischen Werkstoffen zur Rißdetektion von oberflächenoffenen Werkstofftrennungen. Aufgrund der Eigenschaft austenitischer Werkstoffe, ferro- und paramagnetische Mischgefüge auszubilden, bietet die Mehrfrequenz-Mischtechnik die Möglichkeit, Störsignale durch lokale ferromagnetische Werkstoffbereiche zu unterdrücken. Dieses ist von Bedeutung zum Nachweis von oberflächenoffenen Ermüdungsrissen im Bereich der Wärmeeinflußzone von austenitischen Schweißnähten und Plattierungswerkstoffen /Becker 1980, Höller 1984/.

Die Anwendung der Mehrfrequenz-Mischtechnik erfordert die genaue Kenntnis jeder einzelnen Störungsursache und der resultierenden Änderung des Arbeitspunktes für jede Erregerfrequenz. Da eine gegenseitige Beeinflussung nicht auszuschließen ist oder unterschiedliche Störungsursachen zu einer gemeinsamen Änderung der Arbeitspunkte führen können, ist die Interpretation der Meßwertänderungen mit Zunahme der Anzahl der überlagerten Prüffrequenzen aufwendig, insbesondere bei einer Klassifizierung der Signale hinsichtlich der Fehlerbeschreibung nach Größe und Tiefenlage.

Bei den Mehrfrequenz-Korrelationstechniken werden die Arbeitspunktänderungen jeder einzelnen Erregerfrequenz getrennt in der Impedanzebene analysiert. Bei einer Änderung der Eigenschaften des Prüfgegenstandes ergeben sich entsprechend den Einflußgrößen für jede Erregerfrequenz oder jede einzelne Meßspulenordnung jeweils eine Wirbelstromsignalausbildung. Anhand der Wirbelstromsignale der einzelnen Frequenzen werden charakteristische Signalkenngrößen bestimmt. Die Einzelergebnisse werden durch logische oder empirische Verfahren zu einer Gesamtbewertung zusammengefaßt.

Dargestellt ist in Bild 4.4 dieses Vorgehen bei der Sortierung unterschiedlicher Werkstoffe. In dem Beispiel können durch die Anwendung von zwei Prüffrequenzen die Werkstoffe A und B eindeutig aus der Gesamtheit der Meßergebnisse, die innerhalb der schraffierten Bereiche liegen, getrennt werden /Scholz 1991/.

Das Verfahren der Mehrfrequenz-Korrelationstechnik wird ebenfalls verwendet zur Klassifikation von Wirbelstromsignalen durch verdeckte Werkstofftrennungen im austenitischen Grundwerkstoff und im Schweißnahtgefüge.

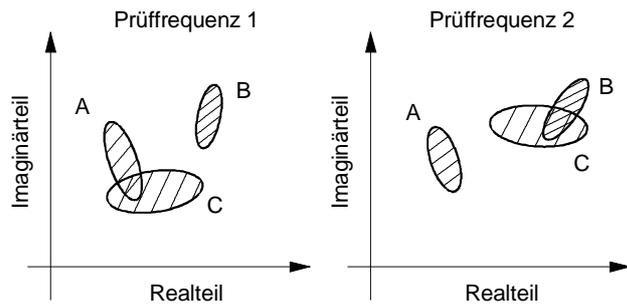


Bild 4.4: Mehrfrequenz-Korrelationstechnik zur Signalklassifikation

Zunächst wurden hierbei Einkanal-Prüf-systeme mit unterschiedlichen Erregerfrequenzen verwendet. Durch die Bestimmung der Wirbelstromamplitude und der Wirbelstromphase bei Frequenzen zwischen 2.5kHz bis 12.5kHz konnte die Tiefenlage von Werkstofftrennungen im austenitischen Grundwerkstoff in Abständen von bis zu 3mm zur Werkstoffoberfläche bestimmt werden /Meier 1976/.

Ein Schwerpunkt zur Prüfung austenitischer Werkstoffe ist die Weiterentwicklung von Mehrkanal-Wirbelstromtechniken in Verbindung mit der Mehrfrequenz-Korrelationstechnik als Verfahren zur Prüfung von austenitischen Plattierungswerkstoffen in Leichtwasserreaktoren. Hierbei werden in Kombination die Arbeitspunktverlagerungen von abgeschirmten und nicht abgeschirmten Wirbelstromsensoren unter Variation der Erregerfrequenzen ausgewertet /Becker 1990, 1996/. Diese Technik kann ebenfalls zur Prüfung von austenitischem Grundwerkstoff und von Schweißnahtgefüge mit Wandstärken bis zu 12mm angewendet werden /Becker 1997, 1998/.

4.3 Impuls-Wirbelstromverfahren

Parallel zu den Mehrfrequenz-Wirbelstromverfahren erfolgten Fortschritte bei der Entwicklung der Impuls-Wirbelstromverfahren. Grundsätzlich unterscheidet sich diese Wirbelstromtechnik durch die Form der Felderregung und durch die Demodulationsverfahren der Meßsignale. Bei dem Impuls-Wirbelstromverfahren wird mit Hilfe eines Induktionsstoßes durch eine Erregerspule in dem zu prüfenden Werkstoff eine Wirbelstromverteilung induziert. Durch die Werkstoffeigenschaften ergibt sich eine Modulation der Feldverteilungen, die als Amplituden-Zeitsignal durch eine Meßspule aufgenommen wird. Die Auswertung des Meßsignals erfolgt zunächst durch die Analyse der Zeitfunktion der Induktionsspannung in der Meßspule. Bei einer Änderung der Materialeigenschaften verändert sich charakteristisch der Funktionsverlauf des Meßsignals. Erste Anwendungen der Impulswirbelstromtechnik sind angepaßt zur Schichtdickenmessung von metallischen Schichten auf metallischem Grundwerkstoff /Hanysz 1958/ und zur Prüfung dünnwandiger Rohre /Renken 1964, Waidelich 1970/. Die Anregung der Stoßimpulse für die Induktionsspule erfolgt in Form von Halbsinusimpulsen, Rechteckimpulsen oder Sägezahnfunktionen. Die Darstellung dieser Verläufe kann erfolgen als Überlagerung von einzelnen Koeffizienten, entsprechend der Fourier-Reihenentwicklung. Dadurch wird die gewählte Form der Erregung zusammengesetzt aus Sinus- und Cosinusfunktionen mit entsprechenden Frequenzanteilen /Libby 1971/. Bei der technischen Realisierung der Impulsanregung werden die auftretenden Frequenzen bestimmt durch die Impulsdauer, die Impulshöhe sowie die Form des Impulses.

Die in dem Werkstoff zu einer Wirbelstrominduktion beitragenden Frequenzanteile werden zudem bestimmt durch die gesamte Spuleninduktivität für die einzelnen Frequenzanteile. Die Impulsdauer zur Prüfung von metallischen Werkstoffen beträgt zwischen $10\mu\text{s}$ bis $75\mu\text{s}$ /Thomas 1981/.

Die Wirbelstromverteilungen für die einzelnen Frequenzanteile des Erregerimpulses im Werkstoffvolumen werden bestimmt durch die Begrenzung der entsprechenden Eindringtiefen nach Gleichung 4.2. Hoch- und niederfrequente Frequenzanteile tragen zu der Wirbelstrominduktion im oberflächennahen Werkstoffvolumen bei. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche nimmt der Einfluß der höherfrequenten Frequenzanteile ab, so daß eine Entmischung der Frequenzanteile mit zunehmender Tiefe im Werkstoff auftritt /Casperson 1994/. Dieses hat zur Folge, daß die Wirbelstromverteilung für alle im Sendepuls enthaltenen Frequenzanteile von oberflächenoffenen Fehlstellen gleichermaßen gestört wird. Entsprechend der Frequenzentmischung wird die Wirbelstromverteilung der niederfrequenten Anteile des Erregerimpulses eher durch verdeckte Werkstofftrennungen im Werkstoffvolumen gestört. Daher bilden sich Werkstofftrennungen mit zunehmender Tiefe im Werkstoff zu späteren Zeitpunkten im Meßsignal ab. Dadurch kann aus dem Verlauf der Amplitudenwerte des Meßsignals zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf die Tiefenlage einer Werkstofftrennung geschlossen werden /Wittig 1977, Beissner 1985/. Eine Erweiterung des Impuls-Wirbelstromverfahrens zum selektiven Nachweis von Werkstofftrennungen in unterschiedlichen Werkstofftiefen ergibt sich bei der Anwendung der CS-Impulswirbelstromtechnik (CS - Controlled Signals). Hierbei werden gezielt Frequenzanteile in dem Erregerimpuls gewichtet, um eine Anpassung der Wirbelstromverteilungen hinsichtlich der elektromagnetischen Eigenschaften der zu untersuchenden Werkstoffe und der interessierenden Werkstofftiefen zu erreichen /Crostack 1983, Nehring 1987/.

Schwerpunkte in der Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens bestehen in der Detektion von verdeckten Ermüdungsrissen und Korrosionsschäden in austenitischen Stahlwerkstoffen /Thomas 1986/. Bei der Prüfung von austenitischem Grundwerkstoff auf Schädigungen durch Spannungsrißkorrosion in Rohrwandungen können Wandstärken bis 15mm untersucht werden /Wittig 1986/. Die entsprechende Geräteentwicklung erfolgte hinsichtlich der Ausrichtung des Verfahrens zur Prüfung von austenitischen Plattierungen in Leichtwasserreaktoren /Wittig 1980/. Der Aufbau der Spulenanordnungen besteht aus räumlich getrennten und abgeschirmten zylindrischen Erreger- und Meßspulen. Der Werkstoff der Abschirmung der Erreger- und Meßspulen ist Kupfer mit hoher elektrischer Leitfähigkeit. Die Abschirmung und Fokussierung der Primärfelder erfolgt aktiv durch sekundäre Wirbelstromfelder in der Abschirmung, die dem Primärfeld entgegenwirken. Mit den entwickelten Wirbelstromsensoren werden Oberflächenplattierungen mit Auftragsstärken bis 7mm auf ferromagnetischem Grundwerkstoff hinsichtlich Oberflächenfehler und verdeckten Werkstofftrennungen untersucht. Die Anwendung erfolgt dabei in Kombination mit der Ultraschall-Gruppenstrahlertechnik mit überlappendem Empfindlichkeitsbereich für das Mischwerkstoffgefüge zwischen Grundwerkstoff und dem Plattierungswerkstoff /Erhard 1996/.

4.4 Fernfeld-Wirbelstromverfahren

Die Fernfeld-Wirbelstromtechnik kann, entsprechend der in Bild 4.2 gewählten Gliederung der Einzelfunktionen eines Wirbelstrom-Prüfsystems, betrachtet werden als eine besondere Variante bei der Gestaltung des Spulenaufbaues zur gezielten Modulation von niederfrequenten Wirbelstrom-Feldverteilungen im Werkstoff. Die Felderregung ist dabei als Einfrequenzverfahren /Palanisamy 1987/, Mehrfrequenzverfahren oder Impuls-Wirbelstromverfahren /Chen 1992/ möglich. Zunächst erfolgte die Entwicklung des Verfahrens hinsichtlich der Prüfung von ferromagnetischen und nicht-ferromagnetischen Rohren und ist zu einem späteren Zeitpunkt zur Prüfung von ebenen Bauteilgeometrien erweitert worden.

4.4.1 Anwendung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Prüfung von Rohren mit Innen-Durchlaufspulen

Der Einsatz des Fernfeld-Wirbelstromverfahrens erfolgte erstmals bei der Prüfung von Rohren zur Förderung von Erdgas und Erdöl aus den Lagerstätten. Hierbei unterliegen die Rohre einer Schädigung durch Korrosionsabtrag auf der Rohrrinnen- und Rohraußenseite. Ziel der Verfahrensentwicklung war die Bereitstellung einer Prüftechnik zum Nachweis der beidseitigen Schädigungen durch eine Prüfung von der zugänglichen Rohr-Innenseite /Schmidt 1961/. Bei den Arbeiten wurde beobachtet, daß bei einer räumlichen Trennung der Meßspule in einem Abstand des 2- bis 3 fachen des Rohrdurchmessers zu der im Rohr axial ausgerichteten Erregerspule auch der Nachweis von Schädigungen in der Rohr-Außenseite erfolgen kann.

Aufgrund der örtlichen Trennung der Erreger- und der Meßspule ist der Begriff der Fernfeld-Wirbelstromtechnik geprägt worden. Eine schlüssige Erklärung für diesen Meßeffect konnte zu diesem Zeitpunkt nicht gebildet werden, so daß für diese Technik zunächst keine weiteren Anwendungsgebiete erschlossen wurden /Schmidt 1989/.

Erst durch die Anwendung von numerischen Verfahren zur Berechnung der Feldverteilungen konnten Erklärungsmodelle für den Meßeffect entwickelt werden /Palanisamy 1980/. Zunächst wurden die Feldverteilungen für einfache rotationssymmetrische Spulenanordnungen analysiert /Lord 1986, Palanisamy 1987, Ida 1989, Schmidt 1989a/. Mit zunehmender Verbesserung der zur Verfügung stehenden numerischen Berechnungsmethoden sind diese Modellbildungen auf dreidimensionale Betrachtungen erweitert worden /Sun 1990/. Weitere theoretische Arbeiten beschäftigten sich mit der Berechnung der entstehenden Wirbelstrom-Signalausbildungen in Abhängigkeit der Prüfbedingungen und der Beschreibung der Feldstörungen im Bereich von Werkstofftrennungen /Atherton 1994/. Durch die Anwendung der numerischen Feldberechnungen sind sogar bis zu diesem Zeitpunkt nicht beobachtete Meßeffecte durch bewegungsinduzierte Felddausbildungen vorhergesagt worden und anschließend experimentell betrachtet worden /Sun 1994/.

Detaillierte Berechnungen beschäftigten sich mit der Erfassung von praxisorientierten Einflußgrößen auf die Felddausbildungen, wie relative Geschwindigkeitseinflüsse bei der Sondenbewegung, Verkippungen der Erregerspule im Rohr /Atherton 1992/ und den Einfluß von Bauteilgeometrien auf die Felddausbildungen, die sich im Nahbereich des Rohres befinden /Sullivan 1989/. Die Entwicklung zunehmend verbesserter Erklärungsmodelle durch numerische Felddberechnungen hat erheblich zur Erschließung von unterschiedlichen Anwendungsbereichen dieses Verfahrens beigetragen.

Parallel zu diesen theoretischen Arbeiten an der Fernfeld-Wirbelstromtechnik wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen für Anwendungsentwicklungen durchgeführt. Die genaue Charakterisierung der Feldverteilungen gibt dabei zielgerichtete Informationen zur Sondengestaltung und zur Auswahl der Prüfbedingungen für spezielle Prüfproblematiken /Schmidt 1989b/. Weitere experimentelle Arbeiten befaßten sich mit dem räumlichen Vermessen der Felddausbildungen innerhalb des Rohres und der Feldstörungen in der Nähe von Werkstofftrennungen in ferromagnetischen und nicht-ferromagnetischen Werkstoffen /Atherton 1994a/.

Die Ursache der vollständigen Prüfbarkeit der Rohrwandung auf Innen- und Außenfehler liegt in der großen Abschwächung des von der Erregerspule induzierten primären magnetischen Feldes durch die Überlagerung der sekundären Felder aufgrund der Wirbelstromverteilung innerhalb der Rohrwandung. Hierdurch können in entsprechender Entfernung von der Erregerspule Feldstörungen in der Rohrwandung empfindlich detektiert werden, da diese nur von einem geringen Anteil des primären Erregerfeldes überlagert werden. Diese besonderen Bedingungen der Felddausbildung werden durch die axialsymmetrische Anordnung der Erregerspule innerhalb des Rohres gebildet.

In Bezug zu den ersten Entwicklungsschritten ist das Wirbelstrom-Fernfeldverfahren versuchsweise angepaßt worden zur Rißdetektion in Pipelinerohrleitungen für den Transport von Erdgas- und Erdöl /Atherton 1989/. Diese Systeme haben sich jedoch nicht durchsetzen können aufgrund der notwendigen Reduzierung der Erregerfrequenzen zur vollständigen Durchdringung der in der Fördertechnik verwendeten Rohrwandstärken. Dieses führt notwendigerweise zu einer geringen Prüfgeschwindigkeit, die einen wirtschaftlichen Einsatz nicht zuläßt /Nestleroth 1990/.

Bei der Prüfung von Rohren aus nicht- und ferromagnetischen Werkstoffen mit kleinen und mittleren Durchmessern hat sich die Fernfeld-Wirbelstromtechnik jedoch einen Anwendungsbereich erschlossen, der durch Prüfungen mit konventionellen Wirbelstromtechniken bis dahin nicht abgedeckt worden war /Brown 1989, Kilgore 1989, Ostermeyer 1998/.

4.4.2 Anwendung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Prüfung von ebenen und gekrümmten Oberflächen mit Tastspulen

Die Vergrößerung der Eindringtiefe und die Erhöhung der Nachweisgrenze von verdeckten Werkstofftrennungen stellten eine erhebliche Erweiterung der Anwendungsgebiete der Wirbelstromtechnik dar. Die Ergebnisse bei der Entwicklung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik zeigten die grundsätzliche Möglichkeit der Anwendung elektromagnetischer Prüftechniken zur Detektion von verdeckten Werkstofftrennungen. Jedoch konnten die hierfür notwendigen Wirbelstromverteilungen zunächst nicht erfolgreich übertragen werden zur Untersuchung von ebenen Bauteiloberflächen. Bei der Anpassung von Tastspulen zur Prüfung von ebenen Oberflächen wurde frühzeitig erkannt, daß unter Verwendung abgeschirmter Erregerspulen eine Erhöhung der Nachweisgrenze für verdeckte Werkstofftrennungen möglich ist. Voraussetzung ist die örtliche Trennung der Erreger- und der Meßspule bei Verwendung von magnetischen Abschirmungen /Hagemaier 1988, Hösch 1991/. Vergleichbar zum Verlauf der zunächst experimentellen Verfahrensentwicklung bei der Fernfeld-Wirbelstromtechnik für Rohre konnte keine physikalische Erklärung für dieses Phänomen entwickelt werden. Als Bezeichnung für diese Wirbelstrom-Sensorsysteme wurde der Begriff "Reflexions-Wirbelstromsonden" gebildet.

Mit der Übertragung der Verfahren zur numerischen Feldberechnung für die Anordnung von Durchlaufspulen in Rohren auf die geometrische Anordnung von abgeschirmten Tastspulen konnten charakteristische Gemeinsamkeiten in der Feldausbreitung erkannt werden /Sun 1996a/. Damit entstand auch ein Erklärungsmodell für die Wirkungsweise der "Reflexions-spulensysteme".

Eine gezielte Abschwächung des primären magnetischen Feldes kann erreicht werden durch den Aufbau von magnetischen Kreisen aus Werkstoffen mit einer hohen magnetischen Permeabilität um die Erregerspule oder durch das Aufprägen eines weiteren magnetischen Feldes, das phasenverschoben dem Erregerfeld überlagert wird /Atherton 1989a, Sun 1992/. Die Anwendung der Feldüberlagerung bei Sensorsystemen für gerade Platten erfolgt für die Prüfung von ferromagnetischem Grundwerkstoff auf Werkstofftrennungen /Sun 1996/. Um ausreichende Eindringtiefen zu realisieren, sind jedoch nur geringe Prüffrequenzen anwendbar, die in Folge zu geringen Prüfungsgeschwindigkeiten führen und daher keine wirtschaftliche Anwendung finden.

Die Ergebnisse numerischer Berechnungen und experimenteller Entwicklungsarbeiten an abgeschirmten Sensorsystemen konzentrieren sich derzeit auf den Bereich zur Prüfung von Aluminiumwerkstoffen mit Wandstärken bis zu 25mm /Sun 1996a/. Der Schwerpunkt bei der Optimierung dieser Meßtechnik besteht hinsichtlich der Prüfung von mehrschichtig aufgebauten Strukturteilen zur Prüfung von Luftfahrtkomponenten /Sun 2000/. Dabei werden auch abgeschirmte Sensorsysteme unter Verwendung von magnetoresistiven- und von SQUID Sensoren zur Detektion der Feldstörungen eingesetzt /Hohmann 2001/.

5 Anwendung numerischer Verfahren zur Sensorentwicklung

Die Wirbelstromverfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung beruhen auf dem Nachweis von Veränderungen in den physikalischen Eigenschaften eines Prüfkörpers unter Einwirkung magnetischer Wechselfelder. Bedingung hierbei ist die Wechselwirkung zwischen den elektromagnetischen Feldern mit dem Werkstoff durch die Induktion von Wirbelströmen und Magnetisierungsvorgängen. Die mathematische Beschreibung der Feldgrößen ermöglicht das anschauliche Erfassen dieser Wechselwirkung und bildet daher die Voraussetzung zur Optimierung und Anpassung von elektromagnetischen Prüftechniken an die Aufgabenstellung. Ziel der Simulationsrechnungen ist es, Informationen über die Einflüsse auf die Feldgrößen zu erfassen, um eine problemorientierte Auslegung der Senortechnik an die Prüfaufgabe zu erreichen.

5.1 Berechnung der Feldverteilungen im Werkstoffvolumen

Grundlage für die Berechnung der Feldgrößen ist die mathematische Formulierung der physikalischen Zusammenhänge bei Induktionsvorgängen. Die physikalischen Größen von elektromagnetischen Feldern werden durch die Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik beschrieben. Diese Gleichungen beschreiben die Wechselwirkungs-Zusammenhänge zwischen zeitlich sich ändernden elektrischen Feldern in Verbindung mit magnetischen Wirbelfeldern.

1. Maxwell'sche Gleichung (Durchflutungsgesetz):

Jedes zeitlich sich ändernde elektrische Feld erzeugt ein magnetisches Wirbelfeld. Der Wirbel der magnetischen Feldstärke H in jedem Raumpunkt r des Feldgebietes ist gleich der Gesamtstromdichte (Konvektionsstromdichte j und der Verschiebungsstromdichte dD/dt) im selben Raumpunkt.

$$(5.1) \oint_{(s)} H \cdot ds = \int \left(J + \frac{dD}{dt} \right) dt \quad 1. \text{ Maxwell'sche Gleichung, Durchflutungsgesetz}$$

2. Maxwell'sche Gleichung (Induktionsgesetz):

Jedes zeitlich sich ändernde magnetische Feld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld. Der Wirbel der elektrischen Feldstärke E in jedem Raumpunkt des Feldgebietes ist gleich der Abnahmegeschwindigkeit der Induktion B im selben Punkt.

$$(5.2) \oint_{(s)} E \cdot ds = -\frac{d}{dt} \int B dA \quad 2. \text{ Maxwell'sche Gleichung, Induktionsgesetz}$$

Entsprechend den unterschiedlichen Eigenschaften von elektrischen und magnetischen Feldern, ergeben sich die Nebenbedingungen der Maxwell'schen Gleichungen.

In elektrischen Feldern existieren Quellen und Senken. Die elektrischen Feldlinien beginnen und enden an Einzelladungen. Die Quelledichte der Verschiebungsdichte D in jedem Raumpunkt des Feldgebietes ist gleich der Raumladungsdichte Q im selben Raumpunkt.

$$(5.3) \oint_{(A)} \vec{D} \cdot d\vec{a} = Q \quad 1. \text{ Nebenbedingung}$$

Die Quellendichte der Induktion \vec{B} in jedem Raumpunkt des Feldgebietes ist stets gleich Null. Es existieren keine magnetischen Einzelladungen.

$$(5.4) \oint_{(A)} \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0 \quad 2. \text{ Nebenbedingung}$$

Die Einflüsse des Materials auf die elektrischen und magnetischen Felder werden durch die Materialgleichungen vorgegeben. Der Zusammenhang zwischen der magnetische Flußdichte \vec{B} mit der magnetischen Feldstärke \vec{H} besteht durch die Permeabilität μ .

$$(5.5) \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad \text{Materialgleichung für die magnetische Flußdichte}$$

Die elektrische Flußdichte \vec{D} ist mit der elektrischen Feldstärke \vec{E} durch die Permittivität ϵ verbunden.

$$(5.6) \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad \text{Materialgleichung für die elektrische Flußdichte}$$

Entsprechend dem Ohmschen Gesetz ist die Stromdichte \vec{J} mit der elektrischen Feldstärke \vec{E} durch die elektrische Leitfähigkeit σ bestimmt.

$$(5.7) \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \text{Materialgleichung für die elektrische Stromdichte}$$

Bei der Anwendung dieser Grundgleichungen auf spezifische Problemklassen wie magneto-statische oder dynamische Felder können Vereinfachungen durchgeführt werden. Die Eigenschaften der elektromagnetischen Felder bei der Wirbelstromprüfung sind charakterisiert durch die Zeitabhängigkeit des magnetischen und des elektrischen Feldes. Für die relativ langsame zeitliche Änderung in den elektrisch leitfähigen Werkstoffen überwiegen die Anteile für den Leiterstrom deutlich gegenüber dem Verschiebungsstrom, so daß der Anteil in Gleichung 5.1 entfallen kann.

$$(5.8) \sigma \cdot \vec{E} \gg \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Vernachlässigung des Verschiebungsstromes}$$

Innerhalb der in integraler Form dargestellten Grundgleichungen sind das elektrische Feld \vec{E} , die magnetische Flußdichte \vec{B} , die magnetische Feldstärke \vec{H} und die Stromdichte \vec{J} im dreidimensionalen Raum vektorielle und zeitabhängige Größen.

Zur Berechnung und Darstellung der bei der Wirbelstromprüfung interessierenden Feldgrößen werden die Grundgleichungen in Abhängigkeit der Stromdichte und der elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften formuliert. Hierfür sind die Gleichungen entsprechend umzuformen, so daß nur noch bekannte Größen in Erscheinung treten. Die Entwicklung von numerischen Lösungsansätzen erfolgt zumeist aus der differentiellen Formulierung der Gleichungen und durch die Einführung des magnetischen Vektorpotentials A . Damit ergibt sich die Gesamtgleichung des elektromagnetischen Feldes zur Berechnung von Wirbelstromanwendungen zu Gleichung 5.9 /Palanisamy 1987/.

$$(5.9) \quad \frac{1}{\mu} (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \begin{array}{l} \text{Gesamtgleichung der elektromagnetischen Felder} \\ \text{für Wirbelstromanwendungen} \end{array}$$

Hierin sind nur noch die zur Feldberechnung bekannten Größen enthalten, wie die magnetische Permeabilität μ , die elektrische Leitfähigkeit σ und die Wirbelstromdichte \mathbf{J}_s in der Erregerspule. Die einzige unbekannte Größe wird durch das magnetische Vektorpotential \vec{A} repräsentiert.

Bei der Wirbelstromprüfung mit einer runden felderzeugenden Spule auf einem ebenen Prüfteil kann die dreidimensionale Geometrie durch die Rotationssymmetrie in einfacher Weise mit Hilfe von Zylinderkoordinaten beschrieben werden. Durch die Einführung des Koordinatensystems und der komplexen Darstellung ergibt sich aus Gleichung 5.9 die spezielle Differentialgleichung zur Beschreibung von rotationssymmetrischen Aufgabenstellungen bei der niederfrequenten Wirbelstromprüfung /Palanisamy 1987/.

$$(5.10) \quad \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2} - \frac{\vec{A}}{r^2} \right) = -\mathbf{J}_s + j\omega\sigma \vec{A}$$

Zur numerischen Lösung von Gleichung 5.10 steht eine Vielzahl von Finite Element Programmpaketen zur Verfügung. Für die Optimierung der abgeschirmten Spulensysteme hinsichtlich der Detektion von verdeckten Werkstofftrennungen mit hoher Empfindlichkeit sind mit dem FEM Programmpaket EMAS/EMAG die elektromagnetischen Feldverhältnisse simuliert worden.

Zur Vereinfachung der Rechenansätze erfolgt eine Linearisierung von nichtlinearen Werkstoffeigenschaften, um den mathematischen Lösungsaufwand zu begrenzen. Die weitreichendste Vereinfachung besteht in der Vernachlässigung der Abhängigkeit der magnetischen Permeabilität von der magnetischen Feldstärke. Dieses ist zulässig aufgrund der relativ geringen Feldstärken. Einflüsse auf die Felddarstellung durch mechanische Werkstoffspannungen, Temperatureinflüsse und bewegungsinduzierte elektromagnetische Felder sind ebenfalls vernachlässigt.

Die Aufgabenstellung für die Berechnung physikalischer Feldgrößen bei der Wirbelstromprüfung ist im allgemeinen dadurch beschrieben, daß sich in einem Raum eine Spule mit einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld und ein Bauteil befinden. Die geometrischen Abmessungen des Bauteils und der Erregerspule sowie die elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften sind dabei bekannt.

Der aufgeprägte Strom in der Erregerspule wird bei der Berechnung vorgegeben. Vorausgesetzt wird, daß bestimmte Eigenschaften der Feldgrößen auf dem umhüllenden Rand des Raumes bekannt sind. Diese Art der Aufgaben wird als Randwertproblem der Physik bezeichnet. Gesucht werden nun die Feldgrößen im Inneren des Rechengebietes in Abhängigkeit des Ortes und der Zeit. Durch diese Modellbildung wird die Abbildung des realen Systems Spule - Werkstoff in einer mathematischen Form erreicht.

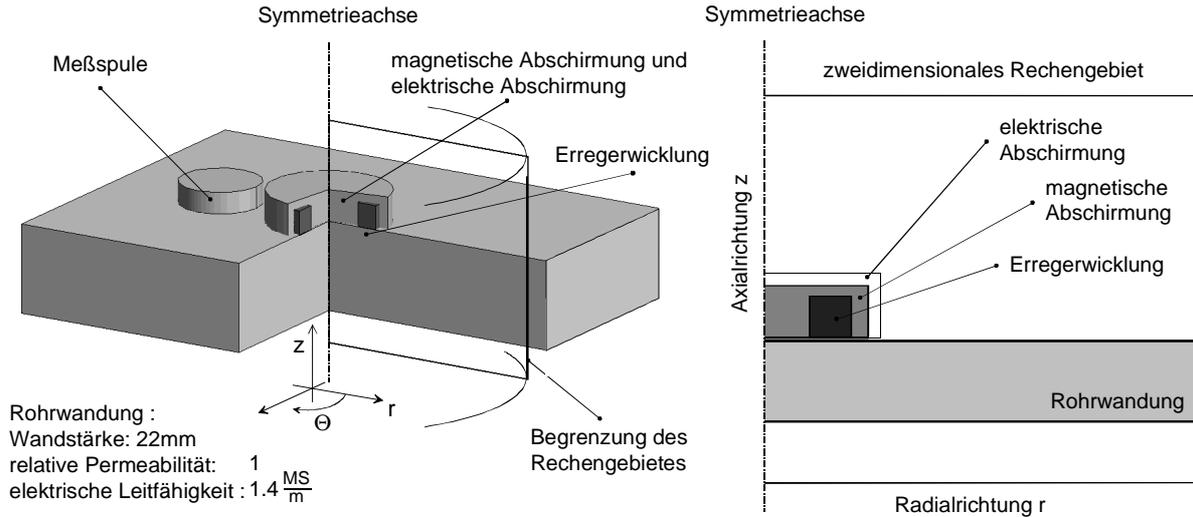


Bild 5.1: Schematischer Sonden Aufbau und rotationssymmetrische Modellbildung

Der Aufbau der feldinduzierenden Erregerspule setzt sich entsprechend Bild 5.1 aus der Spulenwicklung, der hochpermeablen Abschirmung mit Ferritkern und der elektrischen Abschirmung zusammen. Der Ferritkern besteht aus einem magnetisch hochpermeablen Sinterwerkstoff ohne elektrische Leitfähigkeit. Die elektrische Abschirmung besteht aus einem elektrisch leitfähigen Werkstoff. Die Meßspule ist seitlich neben der Erregerspule angeordnet. Der Aufbau ist vergleichbar mit dem der Erregerspule. Die aus der Anordnung sich ergebende Modellbildung ist im rechten Bildteil gezeigt.

Zur Darstellung und Interpretation der elektromagnetischen Feldverteilungen sind die tatsächlich meßtechnisch erfassbaren Größen von Interesse. Dieses ist die Flußdichte \vec{B} innerhalb des Rechengebietes und die Wirbelstromdichte \vec{J}_w im Werkstoff. Beide Größen können unmittelbar aus dem Vektorpotential A bestimmt werden. Durch die Einführung der Zylinderkoordinaten reduziert sich die dreidimensionale Struktur auf die zweidimensionale Fläche. Damit ergeben sich die vektoriellen Komponenten der magnetischen Flußdichte \vec{B} aus dem Vektorpotential A , entsprechend Gleichung 5.11 und 5.12., in die horizontalen und vertikalen Anteile \vec{B}_r , \vec{B}_z innerhalb der Papierebene.

$$(5.11) \quad \vec{B}_r = -\frac{\partial \vec{A}_\Theta}{\partial z} \quad \text{magnetische Flußdichte in horizontaler Richtung}$$

$$(5.12) \quad \vec{B}_z = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot \vec{A}_\Theta)}{\partial r} = \frac{\vec{A}_\Theta}{r} + \frac{\partial \vec{A}_\Theta}{\partial r} \quad \text{magnetische Flußdichte in vertikaler Richtung}$$

Die Bestimmung der Stromdichte \vec{J}_w aus dem Vektorpotential A ergibt sich aus Gleichung 5.13. Die Stromdichte \vec{J}_w und das Vektorpotential \vec{A} haben nur Anteile in Richtung von Θ , d.h. in der zweidimensionalen Darstellung aus der Papierebene heraus.

$$(5.13) \quad \vec{J}_w = -\sigma \cdot \frac{\partial A}{\partial t} = -j\omega \cdot \sigma \cdot \vec{A} \quad \text{elektrische Stromdichte}$$

Eine lokale Werkstofftrennung und die seitlich angeordnete Meßspule können nicht durch die rotationssymmetrische Modellbildung wiedergegeben werden. Eine Feldberechnung hierfür erfordert eine dreidimensionale Modellbildung, welche einen wesentlich größeren Rechenaufwand zur Folge hat. Für eine grundlegende Betrachtung der Feldzusammenhänge zwischen der Sensorgestaltung und den Werkstoffeigenschaften ist der erhebliche Mehraufwand für die Modellbildung und für eine Datenanalyse jedoch nicht gerechtfertigt. Somit beschränken sich die Berechnungen auf die ungestörte Felddarstellung ohne den Einfluß von Werkstofftrennungen. Die geometrischen Eigenschaften des Rechenmodells und die zugeordneten Werkstoffeigenschaften sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt.

Bereich des Rohrwerkstoffs

geometrische Eigenschaften		Anzahl der Rechenpunkte in	
radiale Richtung r:	220mm	radialer Richtung r:	48Pkt
axiale Richtung z:	21mm	axialer Richtung z:	17Pkt

Bereich der ferritischen Abschirmung

magnetische Eigenschaften		Werksname: SIFERRIT N22	
geometrische Eigenschaften		geometrische Eigenschaften	
elektrische Leitfähigkeit σ	0 MS/m	Durchmesser:	33mm
rel. mag. Permeabilität μ	2000	Spulenhöhe	13mm
(Anfangspermeabilität $\mu_i=1900$)		Anzahl der Rechenpunkte in	
		radialer Richtung r:	19Pkt
		axialer Richtung z:	19Pkt

Bereich des Rechengebietes

geometrische Eigenschaften		Anzahl der Rechenpunkte in	
radiale Richtung r:	220mm	radiale Richtung r:	48Pkt
axiale Richtung z:	95mm	axiale Richtung z:	54Pkt

Elektrische und magnetische Eigenschaften der Abschirmung und der Rohrwerkstoffe

Messing	:	$\sigma=14.84\text{MS/m}$	$\mu=1$
Aluminium	:	$\sigma=35.4\text{MS/m}$	$\mu=1$
Kupfer:	:	$\sigma=57\text{MS/m}$	$\mu=1$
austenitischer Stahl:	:	$\sigma=1\text{MS/m}$	$\mu=1, 2, 3, 5, 10, 25, 75$

Erregerfrequenzen f: 500Hz, 1kHz, 2kHz, 3kHz, 4kHz, 6 kHz, 8 kHz, 10 kHz, 12 kHz

Tabelle 5.1: Elektromagnetische Werkstoffeigenschaften und Angaben zur Modellgeometrie

Um einen geschlossenen Zusammenhang über die Felddarstellung mit abgeschirmten Erregerwindungen zu erlangen, ist ein Parameterfeld aufgespannt worden, welches den Einfluß der Erregerfrequenz, der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Werkstoffes sowie verschiedener Leitfähigkeiten der elektrischen Abschirmung umfaßt. Aus der Analyse der Ergebnisdaten dieser Kombinationen sind Zusammenhänge gebildet worden, die eine grundsätzliche Beschreibung der Einflußgrößen auf die Felddarstellung ermöglichen.

5.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

Bei der Wirbelstromprüfung unterliegt jede Feldgröße einer zeitlich periodischen Änderung. Die sich sinusförmig ändernden Feldgrößen $A(t)$ können für die jeweilige Frequenz im Zeitbereich durch die Angabe des Amplitudenwertes \hat{A} und der Kreisfrequenz ω in Abhängigkeit der Zeit t dargestellt werden. Im Frequenzbereich kann die Funktion durch die Angabe der komplexen Größen dargestellt werden. Der Zusammenhang zwischen der Zeitfunktion und der komplexen Darstellung ist in Gleichung 5.14 beschrieben und in Bild 5.2 veranschaulicht.

$$(5.14) \quad A(t) = \hat{A} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \bar{A} = A_{\text{real}} + j A_{\text{imaginär}} \quad \text{mit } j = \sqrt{-1} \quad \text{komplexe Wertedarstellung}$$

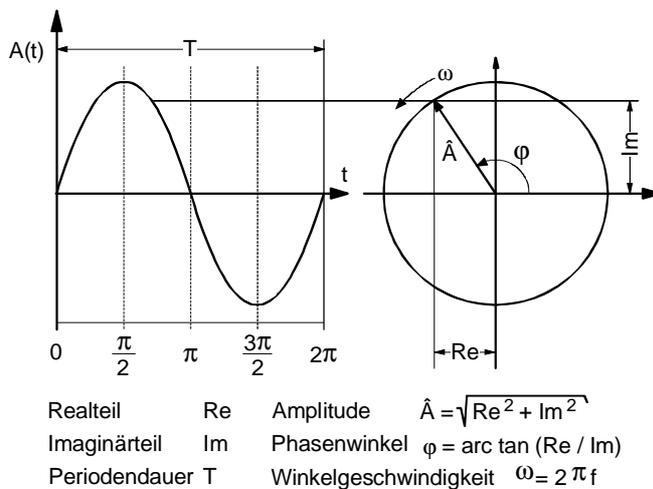


Bild 5.2: Darstellung von harmonischen Funktionen im Zeitbereich und als komplexe Zeigergrößen

Hierbei existieren die realen und imaginären Werte A_{real} , $A_{\text{imaginär}}$ zu den entsprechenden Zeitpunkten $t=0$ und $t=\pi/2$. Durch die Angabe der komplexen Werte werden die zeitlichen Verläufe vollständig beschrieben. Die Feldgrößen für beliebige Zeitpunkte innerhalb einer Periode lassen sich aus dem Real- und dem Imaginärteil durch die Winkel­funktion in Abhängigkeit des Phasen­winkels $\varphi(t)$ berechnen. Daher genügt für die Auswertung der numerischen Ergebnisse die Betrachtung der komplexen Werte unter Angabe der Erreger­frequenz.

5.2.1 Darstellung des magnetischen Vektorpotentials

Die Verbindungslinien von Punkten gleicher Größen des Vektorpotentials A kann als quasi-stationäre Feldliniendarstellung für den betrachteten Zeitpunkt t interpretiert werden /Ostermeyer 1997/. In Bild 5.3 ist das Vektorpotential A für eine Luftspule und für eine abgeschirmte Spule auf einer austenitischen Platte gezeigt zum Zeitpunkt $t=0$ (Realteil). Durch die rotationssymmetrische Modellbildung genügt die Darstellung einer spiegelsymmetrischen Teilansicht der Spulenanordnung.

Die austretenden Feldlinien der Luftspule umschließen die Erregerspule, wobei sie durch die Wirbelstromausbildung in der elektrisch leitfähigen Platte geringfügig verzerrt werden. Im Werkstoffinneren ist ein Bereich erkennbar, um den sich einige Feldlinien schließen, ohne jedoch aus der Oberfläche des Werkstoffs auszutreten.

Bei der Felddarstellung der abgeschirmten Spule ist ebenfalls ein Bereich erkennbar, in dem sich die Feldlinien nicht um die Erregerspule schließen. Jedoch treten diese Feldlinien aus der Werkstoffober- und unterseite aus. In diesem Bereich ist die Felddarstellung im wesentlichen

durch die Werkstoffeigenschaften und die Eigenschaften der Abschirmung bestimmt. Prinzipiell unterliegt an dieser Position die Feldverteilung im Werkstoff nur einem geringen Einfluß durch überlagerte Komponenten von dem primären Feld der Erregerspule.

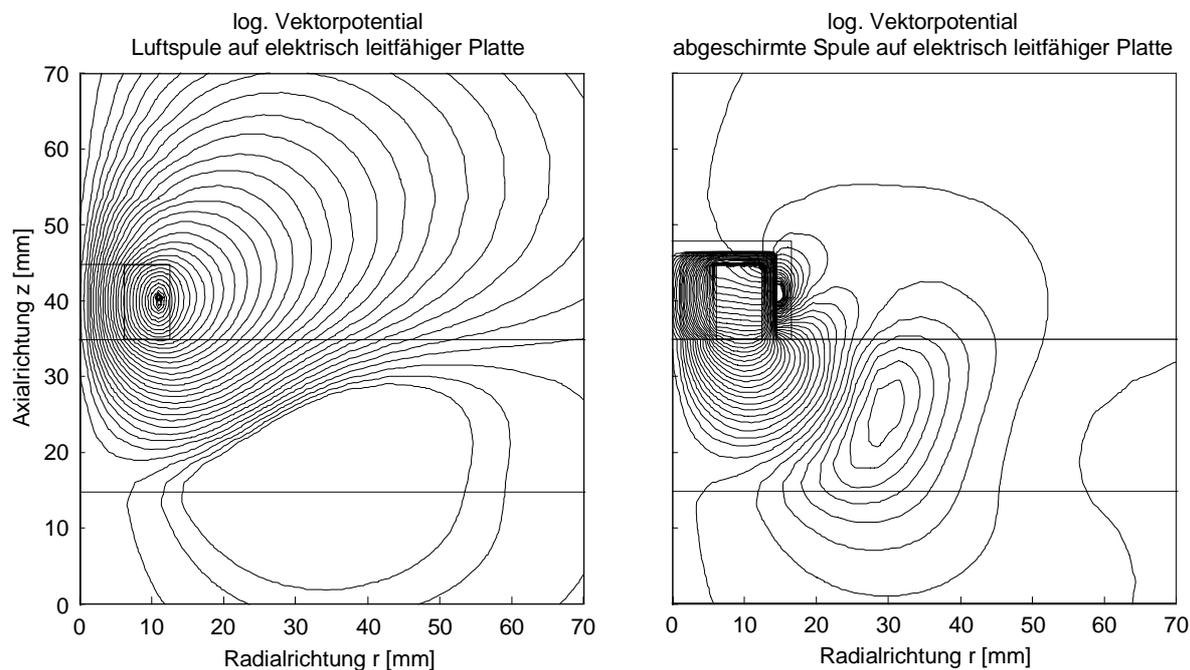


Bild 5.3: *log. Vektorpotential A zum Zeitpunkt $t=0$, Realteil, Erregerfrequenz $f=2000\text{Hz}$, elektrische Abschirmung $\sigma=14.84\text{MS/m}$ (Messing), $\mu_{\text{rel}} \text{Werkstoff} = 2$*

5.2.2 Bestimmung der Wirbelstromdichte und der Eindringtiefe

Beispielhaft ist die Wirbelstromdichte für eine abgeschirmte Spule aus dem Vektorpotential A , entsprechend Gleichung 5.13 berechnet. Gemäß Gleichung 5.14 sind in Bild 5.4 die komplexen Werte für den Zeitpunkt $t=0$ (Realteil) und $t=1/2\pi$ (Imaginärteil) an jedem Ortspunkt im Werkstoff gezeigt. Die Beträge der Feldgrößen sind entsprechend der dargestellten linearen Skalierung Graustufen zugeordnet. Negative Werte entsprechen dem Farbbereich Weiß bis Mittelgrau. Positive Werte werden durch dunkelgraue bis schwarze Graustufen repräsentiert. Die Vorzeichen der Werte beschreiben die Flußrichtung der Wirbelströme um die Erregerspule zum angegebenen Zeitpunkt. Für positive Werte fließen die Wirbelströme aus der Papierebene heraus, bei negativen Werten fließen sie in die Papierebene hinein. Unterhalb der Erregerspule ist die Abnahme der Wirbelstromdichte in dem Real- und dem Imaginärteil deutlich erkennbar. Auffällig in der Darstellung des Imaginärteils ist ein Bereich mit negativer Wirbelstromdichte, erkennbar durch die hellgrauen Bereiche im Werkstoff. Dieses bedeutet, daß die Umlaufrichtung der Wirbelströme im oberflächennahen Bereich der Erregerwicklungen zu diesem Zeitpunkt entgegen der Umlaufrichtung der Wirbelströme im Werkstoffinnern verläuft. Dieses ist die Voraussetzung für die Ausbildung einer von dem Erregerfeld unabhängigen Feldausbildung zu diesem Zeitpunkt.

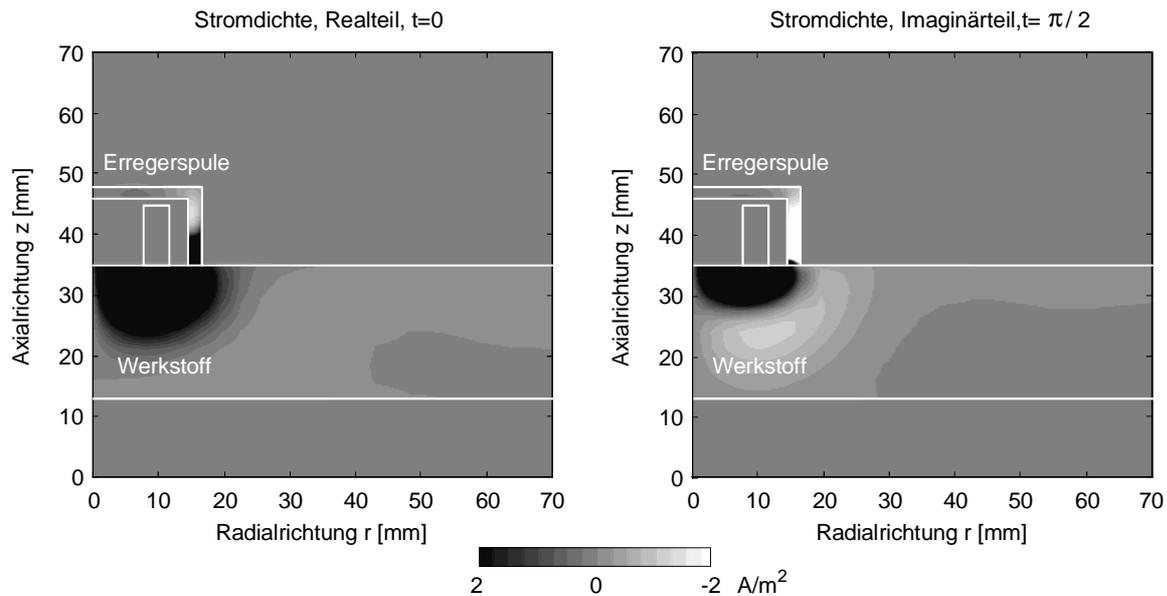


Bild 5.4: Wirbelstromdichte zum Zeitpunkt $t=0$ und $t=\pi/2$, $f=3000\text{Hz}$, elektrische Abschirmung $\sigma=14.84\text{MS/m}$ (Messing), Werkstoff $\mu_{\text{rel}} = 2$

Um die sich bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen f ausbildenden Wirbelstromverteilungen qualitativ miteinander vergleichen zu können, ist die Eindringtiefe in Abhängigkeit der Frequenz f , der elektrischen Leitfähigkeit σ und der Permeabilität μ an den entsprechenden Ortspositionen im Werkstoff zu bestimmen. Die Eindringtiefe der Wirbelströme wird als die Tiefe bezeichnet, bei der die Wirbelstromamplitude auf den Wert $1/e$ oder auf 37% des Wertes in Bezug zu der Wirbelstromdichte an der Werkstoffoberfläche abgefallen ist /Heptner 1965/.

Zunächst sind die Wirbelstromamplitude \hat{J} durch vektorielle Addition des Real- und des Imaginärteils und die Wirbelstromphase durch die Bildung des inversen Tangens für jeden Ortspunkt im Werkstoff berechnet. In Bild 5.5 sind die Werte der Wirbelstromamplitude \hat{J} im Werkstoff logarithmisch - und die Phasenwerte linear skaliert als Grauwertbild dargestellt. Die Wiedergabe der Phasenwerte ist mit einem Phasenoffset versehen, um Unstetigkeiten in der Darstellung durch Werteüberschreitungen von $\pm 360^\circ$ zu vermeiden. Die Größenordnungen der berechneten Werte sind durch die seitlichen Skalierungsbalken gegeben. Exemplarisch sind die Werte an der Ortsposition A unterhalb der Erregerwicklung im Werkstoff als grafischer Funktionsverlauf im linken Bildteil gezeigt. Deutlich sind der exponentielle Abfall der Wirbelstromdichte \hat{J} und die lineare Phasenverschiebung in zunehmender Werkstofftiefe zu erkennen. In radialer Richtung hingegen nimmt der Gradient der Wirbelstromamplitude von der Oberfläche in die Werkstofftiefe deutlich ab, bis an der Position B in einer Entfernung von 38mm eine nahezu gleichmäßige Wirbelstromdichte von der Werkstoffoberfläche in die Werkstofftiefe erreicht wird. Der Betrag der Amplitudenwerte ist jedoch entsprechend der angeführten Grauwertskalierung um mehrere Zehnerpotenzen verringert. Der Unterschied der Phasenwerte zwischen der Werkstoffoberfläche und der Werkstofftiefe verringert sich mit zunehmender Entfernung von der Erregerwicklung.

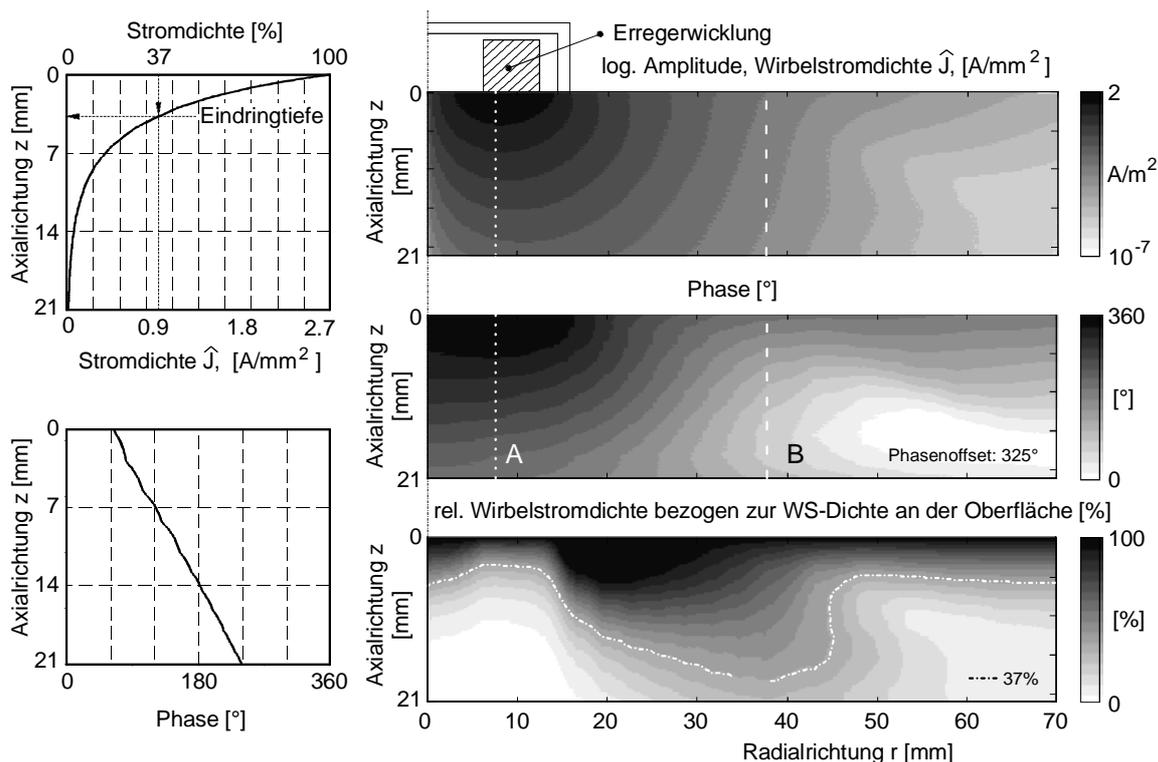


Bild 5.5: Amplitude und Phase der Wirbelstromdichte und relative Eindringtiefe elektrische Abschirmung der Spule: $\sigma=14.84\text{MS/m}$ (Messing), Werkstoff $\mu_{\text{rel}}=2$ Erregerfrequenz $f=3000\text{Hz}$

Entsprechend der Definition der Eindringtiefe ist die Verteilung der relativen Wirbelstromdichte im unteren Teil von Bild 5.5 gezeigt. Hierbei ist die Wirbelstromdichte im Werkstoffinneren in Bezug zu der Wirbelstromdichte an der Oberfläche gesetzt. Die Position mit gegenüber der Oberfläche auf 37%

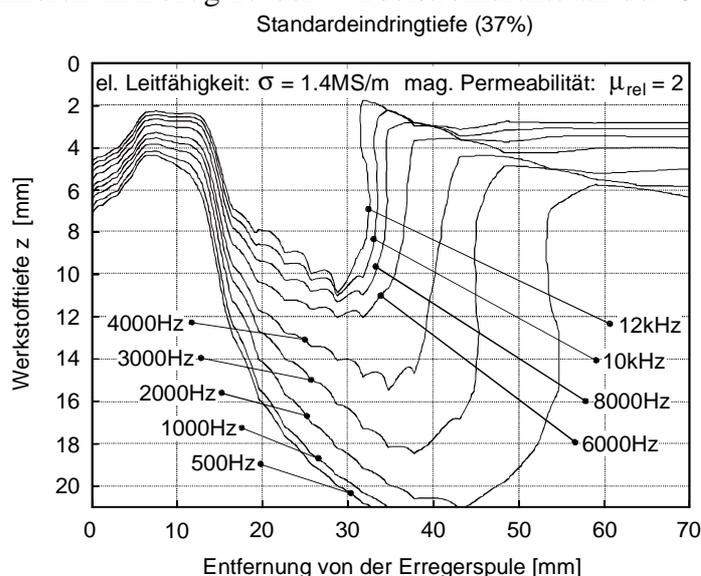


Bild 5.6: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz f , elektrische Abschirmung der Spule: $\sigma=14.84\text{MS/m}$ (Messing)

verringerten Wirbelstromdichte ist mit der weißen Strichpunktlinie markiert. Deutlich erkennbar ist die zunehmende Eindringtiefe mit zunehmendem Abstand von der Erregerspule bis zu einem Maximalwert in einer Entfernung von ca. 46mm. Diese U-förmige Ausbildung ist charakteristisch für den Verlauf der Eindringtiefe im Werkstoff bei der Erregung mit abgeschirmten Spulen.

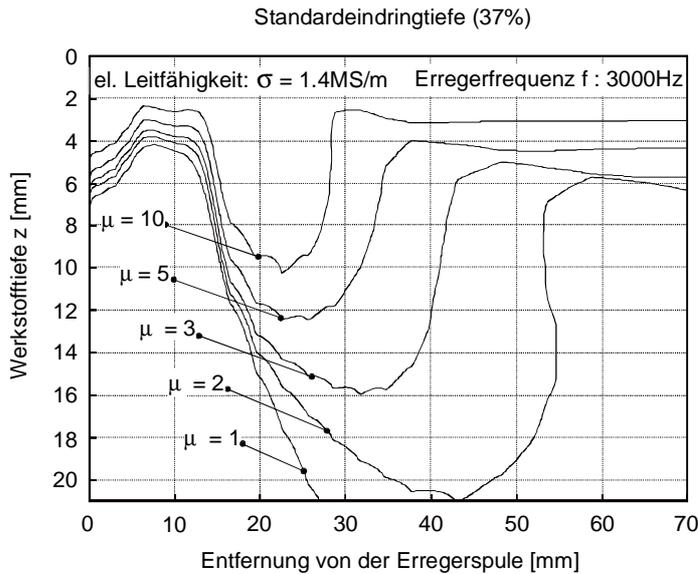


Bild 5.7: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der relativen Permeabilität μ des Werkstoffes, elektrische Abschirmung der Spule: $\sigma=14.84\text{MS/m}$ (Messing)

tiefe in Richtung der Erregerspule. Oberhalb von 6000Hz verringert sich der Einfluß der Erregerfrequenz auf die Eindringtiefe signifikant.

Zur qualitativen Abschätzung des Einflusses der elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften auf die Eindringtiefe sind Berechnungen mit unterschiedlichen Permeabilitäten und Leitfähigkeiten durchgeführt worden. Austenitischer Stahl ist aufgrund seiner kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur paramagnetisch mit einer relativen Permeabilität von $\mu \approx 1$. Technischer austenitischer Stahl kann

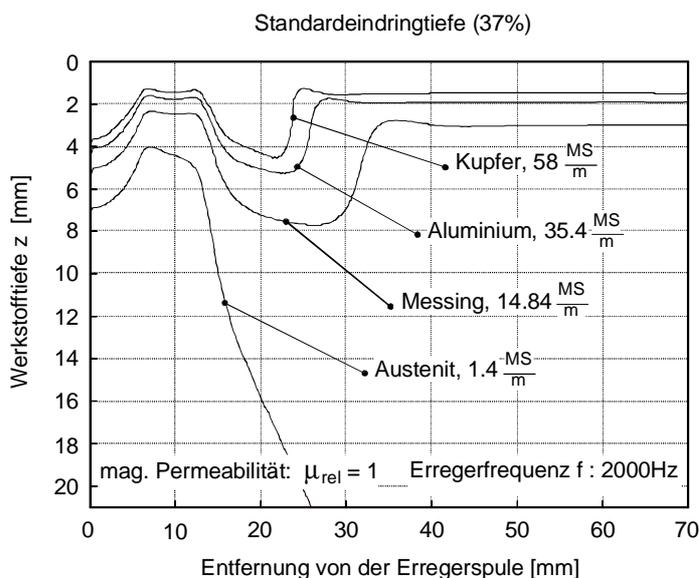


Bild 5.8: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit σ des Werkstoffes, elektrische Abschirmung der Spule $\sigma=14.84\text{MS/m}$ (Messing)

Durch die ortsabhängige Analyse der Eindringtiefe ergibt sich somit die Möglichkeit zur Bestimmung des Einflusses der elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften, der Prüfbedingungen und der Sensorgegestaltung, um Bereiche mit einer hohen Eindringtiefe im Werkstoff zu erkennen.

In Bild 5.6 sind die Eindringtiefen in Abhängigkeit der Erregerfrequenzen zwischen 500Hz bis 12kHz dargestellt. Deutlich ist mit zunehmender Frequenz f eine Verringerung der Eindringtiefe zu beobachten. Zugleich verlagert sich die Position mit maximaler Eindringtiefe

in Richtung der Erregerspule. Oberhalb von 6000Hz verringert sich der Einfluß der Erregerfrequenz auf die Eindringtiefe signifikant. In Bild 5.7 ist die Eindringtiefe bei stufenweiser Erhöhung der magnetischen Permeabilität aufgezeigt. Der Verlauf der Eindringtiefe ist vergleichbar mit den Darstellungen in Bild 5.6. Die Eindringtiefe verringert sich mit zunehmender Permeabilität μ bei gleichzeitiger Verlagerung der maximalen Eindringtiefe in Richtung der Erregerspule.

Die elektrische Leitfähigkeit σ von austenitischen Werkstoffen wird durch Unterschiede in der Legierungszusammensetzung nur unwesentlich beeinflusst. Dennoch ist die Kenntnis des Einflusses der elektrischen Leitfähigkeit auf die Eindringtiefe von Interesse zur Übertragung der Wirbelstromtechnik mit abgeschirmten Spulensystemen auf nicht ferromagnetische Strukturwerkstoffe. In Bild 5.8 ist der Einfluß der elektrischen Leitfähigkeit σ auf die Eindringtiefe gezeigt. Entsprechend zu den Ergebnissen in Bild 5.6 und 5.7 verringert sich die Eindringtiefe mit zunehmender Leitfähigkeit σ bei gleichzeitiger Verlagerung des Bereichs maximaler Eindringtiefe in Richtung der Erregerspule.

5.2.3 Einfluß der Abschirmung auf die Felddausbildung

Neben den Werkstoffeigenschaften des Prüfteils und der Prüffrequenz wird die Felddausbildung durch die elektromagnetischen Eigenschaften der Erregerspule vorgegeben. Diese wird bestimmt durch die Induktivität der Erregerwicklungen, die magnetische Permeabilität der ferritischen Abschirmung und durch die Leitfähigkeit der elektrischen Abschirmung.

Die elektrische Abschirmung dient als zusätzliche Kurzschlußwicklung, in der sich ebenfalls Wirbelstromverteilungen ausbilden. Durch die phasenverschobenen Wirbelfelder in der Abschirmung wird eine weitere Dämpfung des Feldes im Halbraum oberhalb des Werkstoffes erreicht. Dieses führt zu einem erheblichen Einfluß auf die Ausbildung der Wirbelstromverteilung im Werkstoff. Die Wahl der Kombination von den magnetischen und den elektrischen Eigenschaften der Abschirmung bestimmt somit zusätzlich die Empfindlichkeit des Wirbelstromsensors zum Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen und ist an die Prüfaufgabe anzupassen.

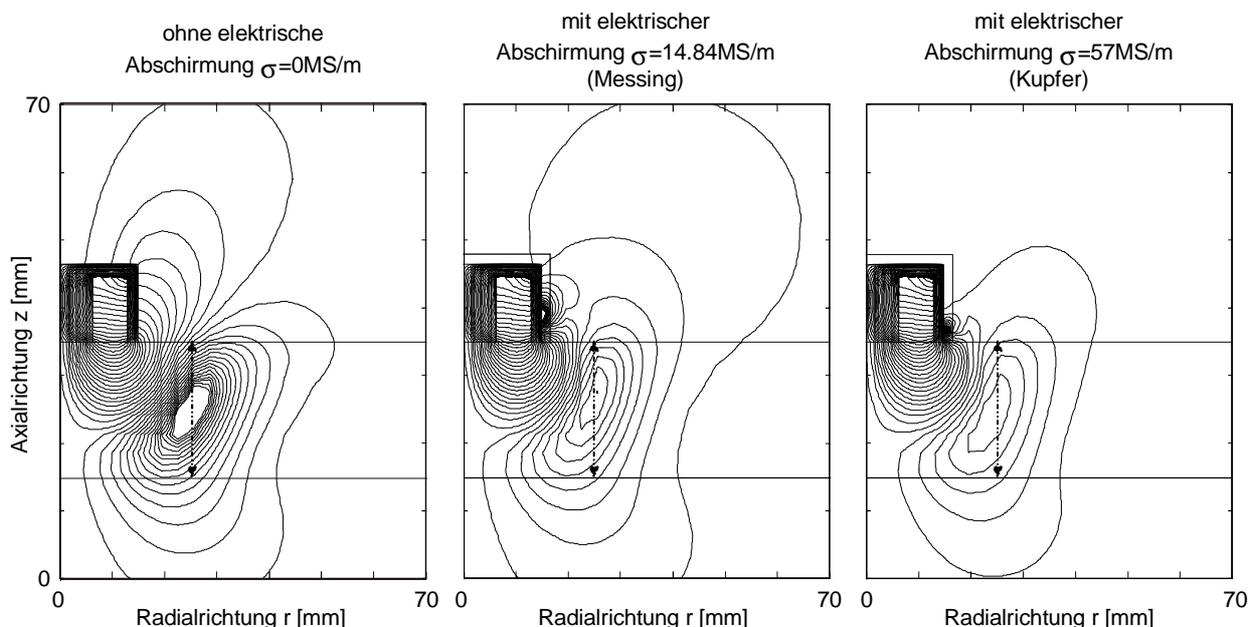


Bild 5.9 Einfluß unterschiedlich elektrisch leitfähiger Abschirmungen auf die Felddausbildung, log. Vektorpotential, Realteil, $t=0$; Erregerfrequenz $f=3000\text{Hz}$, $\mu_{\text{rel}}=2$

In Bild 5.9 sind die Equipotentiallinien des Vektorpotentials A für unterschiedlich abgeschirmte Erregerspulen gezeigt. Gegenübergestellt ist die Feldausbildung ohne – und mit steigender Leitfähigkeit einer elektrischen Abschirmung.

Die Anzahl der Potentiallinien im Werkstoff, die sich nicht durch die Erregerwicklungen schließen, verringert sich mit Zunahme der Leitfähigkeit bei der gewählten einheitlichen logarithmischen Skalierung. Dieses ist zu interpretieren als eine Verringerung der Feldgrößen bei gleichzeitiger Abnahme der Gradienten innerhalb dieses Werkstoffbereiches. Mit der Zunahme der Leitfähigkeit erfolgt zudem eine Abnahme der Equipotentiallinien im Halbraum über dem Werkstoff, welches auf eine Verringerung der Feldgrößen im Werkstoff hinweist.

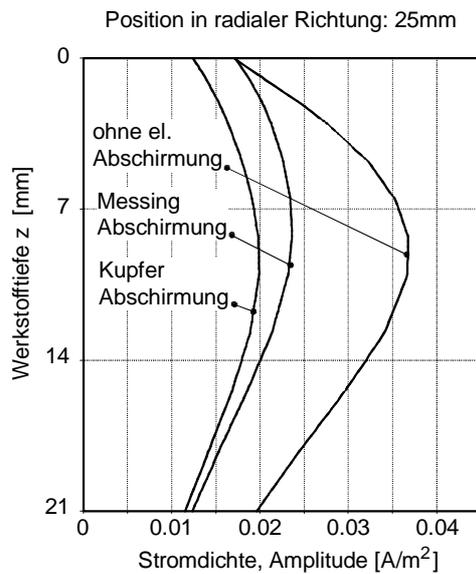


Bild: 5.10: *Einfluß der elektrischen Abschirmung auf die Wirbelstromdichte*

Bild 5.10 zeigt die Verläufe der Wirbelstromdichte als Amplitudenwerte von der Werkstoffoberseite zu der -unterseite in einer Entfernung von 25mm von der Erregerspule. Diese Positionen sind in Bild 5.9 durch die Strichpunktlinien angegeben. Im Gegensatz zu der in Bild 5.5 gezeigten Verteilung der Wirbelstromdichte unterhalb der Erregerwicklung (Position A) ist keine exponentielle Abnahme von der Ober- zur Unterseite erkennbar. Die höchste Stromdichte wird ungefähr in der Mitte des Werkstoffes erreicht.

Für einen empfindlichen Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen auf der Werkstoffunterseite ist eine möglichst homogene Wirbelstromverteilung ausgehend von der Werkstoffober- zu der -unterseite von Vorteil. Der bauchige Verlauf der Wirbelstromdichte ohne elektrische Abschirmung der Erregerspule

erfüllt diese Forderung in geringem Maße, obgleich die absolute Stromdichte gegenüber den elektrisch abgeschirmten Erregerspulen am größten ist. Die Verwendung von leitfähigen Werkstoffen als zusätzliche Abschirmung führt zu geringeren Gradienten der Wirbelstromdichte im Werkstoff seitlich neben der Erregerwicklung, welches die Nachweisgrenze für verdeckte Werkstofftrennungen erhöht. Mit der Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit der Abschirmung wird eine zunehmende Dämpfung der Wirbelstromverteilung im Werkstoff erreicht. Zunächst ist dieses förderlich, um eine homogene Wirbelstromverteilung zu erzielen. Bei zu geringen Wirbelstromdichten im Werkstoff wird jedoch nur eine schwache Wechselwirkung mit einer Werkstofftrennung verursacht. Daher muß ein Kompromiß bei der Wahl der Abschirmwerkstoffe eingegangen werden, um eine möglichst gleichmäßige Wirbelstromverteilung zu gewährleisten, ohne jedoch die absolute Wirbelstromdichte unnötig zu verringern. Die Abnahme der Induktion auf der Werkstoffober- und der Werkstoffunterseite mit zunehmender Leitfähigkeit optionaler elektrischer Abschirmungen ist durch experimentelles Erfassen der Feldausbildungen bestätigt worden.

5.3 Vergleich rechnerischer und gemessener Felddarstellungen

Der qualitative Vergleich von experimentellen und numerisch berechneten Werten ermöglicht eine Abschätzung der Aussagefähigkeit der durch die FEM-Berechnungen gefundenen Zusammenhänge. Das erweiterte Verständnis für die Einflüsse auf die Felddarstellungen ist notwendig für die konstruktive Anpassung des Sensors an die Prüfaufgabe. Mit den Erkenntnissen können Fehler bei dem Sensordesign vermieden werden.

Zum experimentellen Erfassen der realen Feldverhältnisse im Werkstoff wird eine Meßspule verwendet. Dabei ergibt sich die Meßspannung $V(t)_{mess}$ durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses $\Phi(t)$ durch die Querschnittsfläche der Spule A_{Spule} und die Anzahl der Wicklungen N_{Spule} entsprechend Gleichung 5.16. Die Größe des magnetischen Flusses Φ wird durch die Meßspulenfläche A und die Flußdichte B nach Gleichung 5.15 bestimmt.

$$(5.15) \quad \Phi = A_{Spule} \cdot \hat{B} \quad \text{magnetischer Fluß durch die Spulenwicklungen}$$

$$(5.16) \quad V(t)_{mess} = -N_{Spule} \cdot \frac{d\phi_{Spule}}{dt} \quad \text{Induktionsspannung in einer Luftspule}$$

Bei einer sinusförmigen Erregung wird der zeitliche Verlauf des magnetischen Flusses $\Phi(t)$ durch die Gleichung 5.17 beschrieben:

$$(5.17) \quad \phi(t) = \hat{\phi} \cdot \sin(\varpi \cdot t) = A_{Spule} \cdot \hat{B} \cdot \sin(\varpi \cdot t) \quad \text{zeitliche Änderung der Flußdichte}$$

In Verbindung mit Gleichung 5.16 ergibt sich die periodisch wechselnde Spulenspannung in Gleichung 5.18 zu:

$$(5.18) \quad V(t)_{mess} = -N_{Spule} \cdot \varpi \cdot A_{Spule} \cdot \hat{B} \cdot \cos(\varpi \cdot t) \quad \text{zeitliche Änderung der Spulenspannung} \\ \text{mit } \varpi = 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{in Abhängigkeit der Flußdichte}$$

Durch die Bezugsbildung der Meßspannung $V(t)_{mess}$ mit einem periodischen Referenzsignal gleicher Frequenz kann Gleichung 5.18 als phasenverschobene Sinusfunktion gemäß Gleichung 5.19 abgebildet werden.

$$(5.19) \quad V(t)_{mess} = \hat{V} \cdot \sin(\varpi \cdot t + \varphi) \quad \text{bezogene Spulenspannung}$$

Ausgehend von dem magnetischen Vektorpotential A , sind entsprechend Gleichung 5.11 und 5.12 die magnetische Flußdichte \vec{B}_r und \vec{B}_z als komplexe Werte berechnet worden. Die Amplitudenwerte der Flußdichte \hat{B}_r und \hat{B}_z sind im Anschluß durch die geometrische Addition des Real- und des Imaginärteiles für jede Ortsposition bestimmt worden. Die Anzahl der Spulenwicklungen N , die Querschnittsfläche A_{Spule} und die Erregerfrequenz f sind während einer Messung gleichbleibend. Damit ist die Meßspulenspannung V_{mess} proportional zu der Änderung der Flußdichte an der entsprechenden Ortsposition. Dieser Zusammenhang ermöglicht den qualitativen Vergleich der berechneten Verteilungen der Flußdichte der Meßspulenspannung als Funktion des Ortes. Die Meßspannung ist dabei abhängig von der räumlichen Ausrichtung der Meßspule in Bezug zu der Richtung des magnetischen Flusses durch die Meßspule.

Zur Erfassung der Spannungen in der Meßspule wurde ein Lock-In Verstärker verwendet. Dieser ermöglicht eine erweiterte Signalanalyse hinsichtlich der Signalamplitude und der Phasenlage des Meßsignals in Bezug zu einem Referenzsignal. Das Referenzsignal wird bei dem Meßaufbau aus dem Erregersignal gebildet, so daß die Phasenlage des Meßpulensignals in Bezug zu der Phasenlage des Erregersignals ermittelt wird. Dadurch werden die im Werkstoff ausgebildeten Phasenverschiebungen der Feldgrößen an den betrachteten Ortspositionen miteinander in Bezug gesetzt. Die Meßdatenausgabe erfolgt ebenfalls in Form von komplexen Größen zur Beschreibung des sinusförmigen Meßsignals. Dieses ermöglicht den quantitativen Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit den tatsächlichen Felddarstellungen. Zur Verifizierung ist der Verlauf der Flußdichte \hat{B}_z auf der Unterseite des Werkstoffes in radialer Richtung ausgewertet.

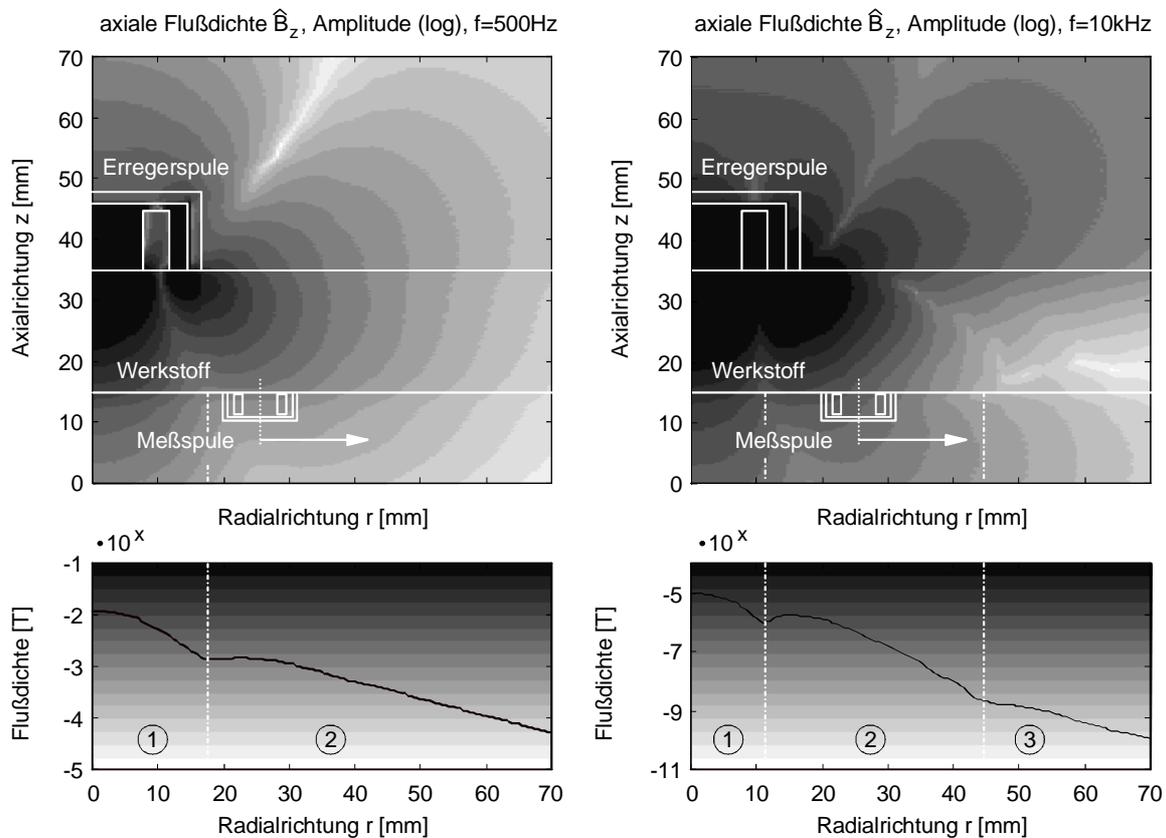


Bild 5.12: Verlauf der Amplitude der Flußdichte \hat{B}_z im Berechnungsgebiet auf der Werkstoffunterseite, Erregerfrequenz $f=500\text{Hz}$ und $f=10\text{kHz}$

In Bild 5.12 sind die Amplitudenwerte der numerisch berechneten axialen Flußdichte \hat{B}_z (vertikale Komponente) als Graustufenbilder innerhalb des Berechnungsraumes bei Erregerfrequenzen von $f=500\text{Hz}$ und $f=10\text{kHz}$ gezeigt. Die Verteilung der axialen Flußdichte \hat{B}_z entspricht dem magnetischen Fluß, der zur Induktion der Meßspannungen in der Meßspule beiträgt. Die auf der Werkstoffunterseite ausgebildete Flußdichte \hat{B}_z ist als Funktion des Ortes in Radialrichtung entsprechend der logarithmischen Skalierung im unteren Bildteil gezeigt. Deutlich sind in den Grauwertbildern einzelne charakteristische Feldbereiche erkennbar, deren Übergangsbereiche sich durch Gradientenänderungen abbilden. Ursache hierfür sind

Richtungsänderungen im Umlauf des magnetischen Flusses um die Erregerspule oder um Teilbereiche innerhalb des Werkstoffes, entsprechend Bild 5.15.

Bei der niedrigen Erregerfrequenz von $f=500\text{Hz}$ ergeben sich mittig unter der Erregerspule die höchsten Beträge der Flußdichte \hat{B}_z in axialer Richtung. Mit zunehmendem radialen Abstand von der Erregerspule verringern sich die Amplitudenwerte bis zu der ersten Steigungsänderung von Bereich 1 zu Bereich 2. Nach der Steigungsänderung verringert sich die Flußdichte mit zunehmender Entfernung, jedoch mit geringeren Gradienten. Wird die Erregerfrequenz auf $f=10\text{kHz}$ erhöht, so entwickelt sich ein weiterer 3. Feldbereich, der ebenfalls durch eine Gradientenänderung erkennbar ist. Dieser Übergangsbereich kennzeichnet tatsächlich die Ausbildung eines Fernfeldes, wie in Abschnitt 5.4 gezeigt wird. Entsprechend dem Skin-Effekt sind die absoluten Feldgrößen bei einer Erregerfrequenz von 10kHz auf der Werkstoffunterseite geringer als bei einer Frequenz von 500Hz . Dementsprechend sind die Grauwertskalierungen für beide Erregerfrequenzen angepaßt. Die Positionen der Gradientenänderung an den Übergängen zwischen den einzelnen Feldbereichen ergeben signifikante Merkmale, die einen qualitativen Vergleich der berechneten Flußdichte mit dem Spannungsverlauf einer axial zur Werkstoffoberfläche ausgerichteten Meßspule ermöglichen.

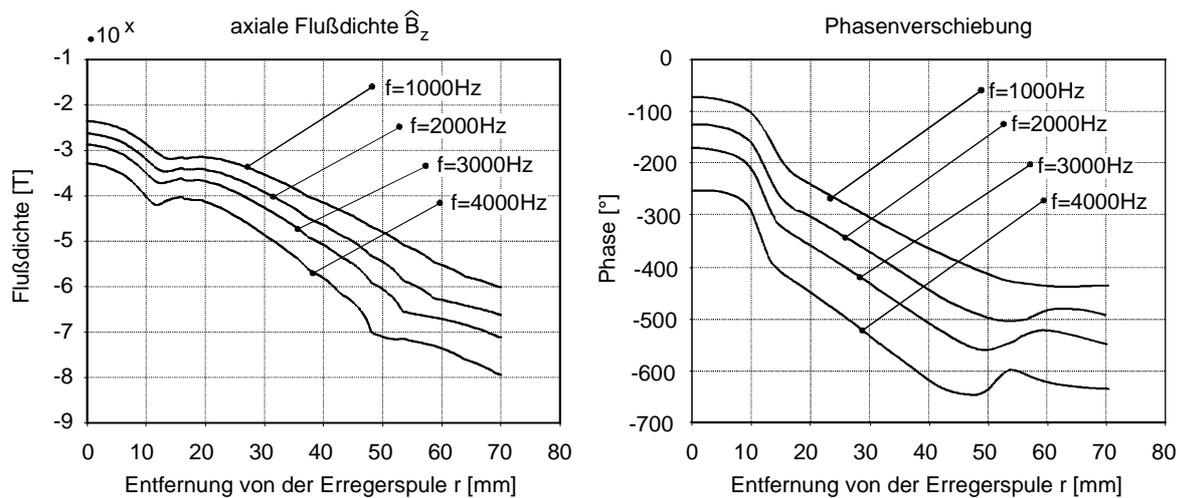


Bild 5.13: Berechnete Flußdichte \hat{B}_z und Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Erregerfrequenz auf der Unterseite des Werkstoffes

In Bild 5.13 sind die berechnete Flußdichte \hat{B}_z und die Phasenverschiebung als Funktion des Ortes auf der Unterseite des Werkstoffes für Erregerfrequenzen von $f=1000\text{Hz}$ bis $f=4000\text{Hz}$ gezeigt. In den Amplitudenwerten von \hat{B}_z und den Phasenwerten ist eine Verlagerung des ersten Übergangsbereichs in Richtung der Erregerspule mit zunehmender Frequenz erkennbar. Mit Zunahme der Frequenz verringert sich die absolute Größe der Flußdichte. Gleichzeitig bildet sich eine zweite Unstetigkeit in radialer Entfernung von ca. 50mm aus, die sich ebenfalls in Richtung Erregerspule verlagert. An dieser Position ändern sich die Phasenwerte der Flußdichte B_z in positive Richtung, wobei der Gesamtbetrag dieser Änderung mit zunehmender Frequenz steigt.

Bild 5.14 zeigt im Vergleich die experimentell bestimmte Spulenspannung \hat{V} und die relative Phasenänderung des Meßspulensignals als Funktion der Ortsposition auf der Unterseite des Werkstoffs für Erregerfrequenzen von 1000Hz bis 4000Hz. Vergleichbar mit den Werten der berechneten Flußdichte \hat{B}_z wird mittig unter der Erregerspule die höchste Spannung in der Meßspule induziert. Mit zunehmender Entfernung von der Erregerspule verringern sich die Spannungswerte bis zu dem Übergang zwischen dem 1. und 2. Feldbereich in einer Entfernung von 15 bis 25mm. Entsprechend den berechneten Werten der Flußdichte \hat{B}_z verlagern sich die Übergangsbereiche mit steigender Frequenz in Richtung der Erregerspule. Korrespondierend zu den berechneten Phasenwerten erfolgt an der Position der 1. Unstetigkeit eine negative Phasendrehung. Mit zunehmender Erregerfrequenz bildet sich die 2. Unstetigkeit innerhalb der Spannungsamplitude \hat{V} aus, die sich ebenfalls in Richtung der Erregerspule verlagert. Zugleich ändern sich die Phasenwerte an dieser Position in positiver Richtung, wobei der Gesamtbetrag der Phasenänderung mit zunehmender Frequenz steigt.

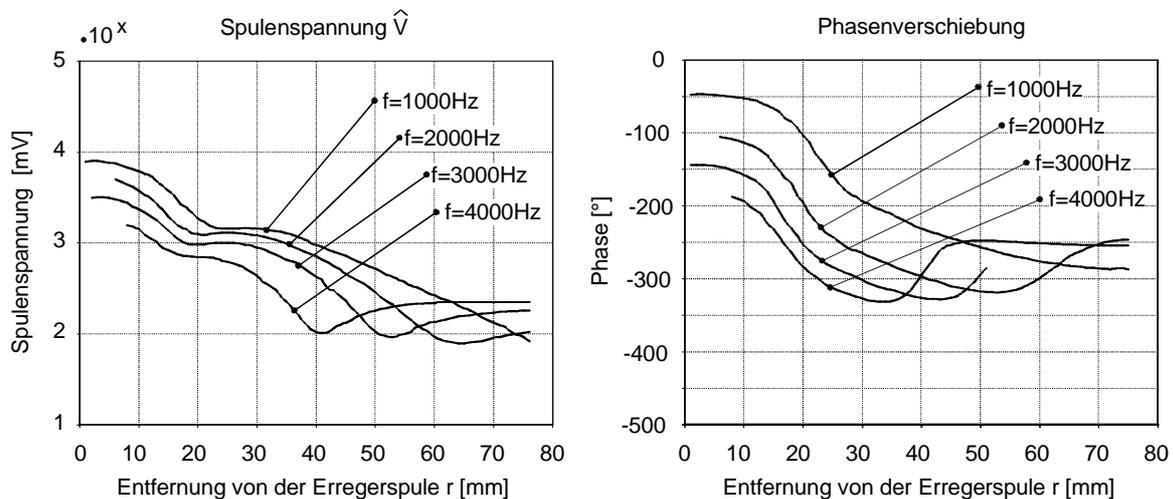


Bild 5.14: Experimentell gemessene Spulenspannung \hat{V} und Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Erregerfrequenz auf der Unterseite des Werkstoffs

5.4 Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der Fernfeldausbildung

Der Begriff der Wirbelstrom-Fernfeldprüfung ist erstmalig zu Beginn der 50-er Jahre bei der Rohrprüfung geprägt worden. Hierbei erfolgt die Feldinduktion mit Hilfe einer Innendurchlaufspule im Rohrrinnern. Die Meßspule ist in einer Entfernung des 2- bis 3-Fachen des Rohrdurchmessers in Bezug zu der Erregerspule angeordnet. Experimentelle Beobachtungen zeigen, daß sich mit dieser Anordnung charakteristische Felder im Rohrwerkstoff ausbilden, die zu der hohen Empfindlichkeit hinsichtlich der Detektion von Werkstofftrennungen auf der Außenseite und der Innenseite der Rohrwandung führen. Auch größere Wandstärken können so vollständig untersucht werden. Durch Berechnungen und experimentelle Untersuchungen ist gezeigt worden, daß sich in einer bestimmten Entfernung in Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Rohrwerkstoffes ein schwaches, jedoch die Rohrwandung umschließendes magnetisches Feld ergibt /Ostermeyer 1997/. Dieses Feld wird als Fernfeld bezeichnet. Ursache für diese Feldausbildung sind unterschiedliche

Phasenverschiebungen im Werkstoff, die abhängig sind vom Weg der Felder durch die Rohrwandung und dem Luftraum im Rohrrinneren /Schmidt 1998/. Die Phasenverschiebung im Werkstoff wird entsprechend Gleichung 5.19 wiedergegeben.

$$(5.19) \quad \varphi = d \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad \text{Phasenverschiebung der Wirbelstromausbildung}$$

Aus der Überlagerung von Feldern unterschiedlicher Phasenlagen resultiert eine Verstärkung oder Schwächung des Gesamtfeldes an bestimmten Positionen im Werkstoff. Bei der Innenrohrprüfung mit Durchlaufspulen ergeben sich die notwendigen physikalischen Voraussetzungen für eine die Rohrwandung umschließende Feldausbildung durch die geometrische Anordnung von zwei Symmetrieebenen in horizontaler und vertikaler Richtung. Dadurch wird eine vollständig achsensymmetrische Feldausbildung ermöglicht.

Bei der Wirbelstromprüfung von geraden Platten mit radial zur Oberfläche orientierten Tastspulen ergibt sich nur eine vertikale Symmetrieachse durch die Spulenummitte, welche zunächst nicht ausreicht für die Ausbildung eines den Werkstoff möglichst beidseitig umschließenden Feldes. In Bild 5.15 ist das Vektorpotential für diese Anordnung mit einer Luftspule dargestellt. Deutlich umschließen die Equi-Potentiallinien die Erregerwicklungen, wobei diese einer geringen Verzerrung durch die Wirbelstromausbildung im austenitischen Werkstoff unterliegen. In der Abbildung sind an drei Positionen auf der Werkstoffunterseite die quasistationären Feldlinien in ihre vektoriellen Komponenten aufgeteilt. Diese repräsentieren die Richtungen des magnetischen Flusses im Werkstoff. Der Vorzeichenwechsel des magnetischen Flusses B_z in vertikaler Richtung markiert einen Richtungswechsel der Feldlinien. Mit zunehmender Entfernung von der Erregerwicklung sind Potentiallinien erkennbar, die einen Teilbereich im Werkstoff für diesen Zeitpunkt zu umschließen beginnen. Für den Nachweis, daß diese Feldlinien tatsächlich einen Werkstoffbereich vollständig umschließen, ist jedoch die Indikation eines weiteren Richtungswechsels von B_z notwendig.

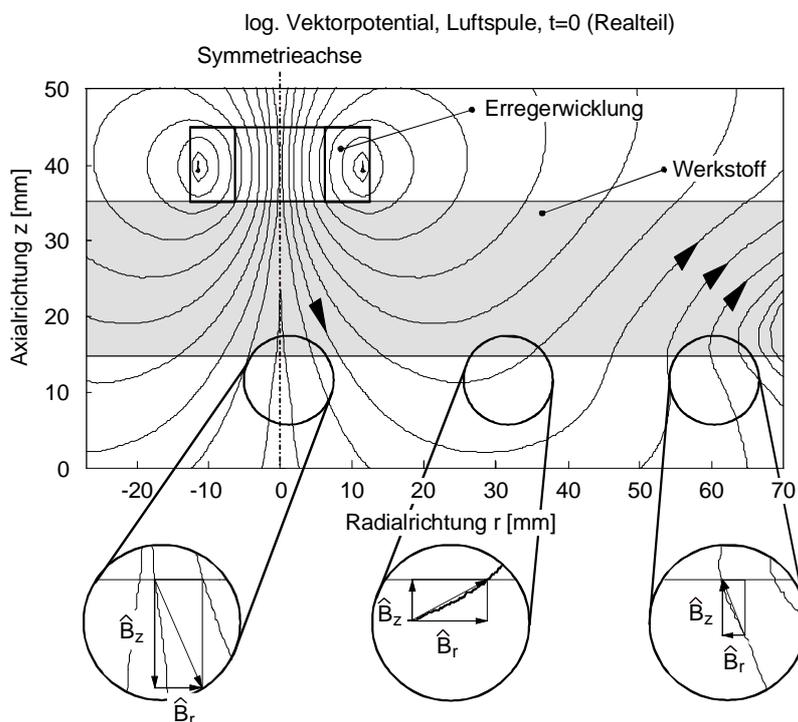


Bild 5.15: Modellvorstellung zur räumlichen Verteilung der Flussdichte \hat{B}_r und \hat{B}_z unterhalb des Werkstoffes, $t=0$ (Realteil), Erregerfrequenz $f=500\text{Hz}$, Luftspule mit austenitischem Werkstoff, $\mu_{rel}=1$

repräsentieren die Richtungen des magnetischen Flusses im Werkstoff. Der Vorzeichenwechsel des magnetischen Flusses B_z in vertikaler Richtung markiert einen Richtungswechsel der Feldlinien. Mit zunehmender Entfernung von der Erregerwicklung sind Potentiallinien erkennbar, die einen Teilbereich im Werkstoff für diesen Zeitpunkt zu umschließen beginnen. Für den Nachweis, daß diese Feldlinien tatsächlich einen Werkstoffbereich vollständig umschließen, ist jedoch die Indikation eines weiteren Richtungswechsels von B_z notwendig.

Die Richtungswechsel in den horizontalen und vertikalen Komponenten des magnetischen Flusses sind verbunden mit einer Ab- und Zunahme der entsprechenden Zeigerlängen in den hervorgehobenen Bereichsvergrößerungen. In Bild 5.16 sind die Amplitudenwerte der axialen \hat{B}_z und der radialen \hat{B}_r Flußdichte logarithmisch skaliert für eine Luftspule mit austenitischem Werkstoff dargestellt. Die Richtungswechsel des Umlaufs des magnetischen Flusses bilden sich hierbei als ausgeprägte Gradientenänderungen in den Graustufendarstellungen ab.

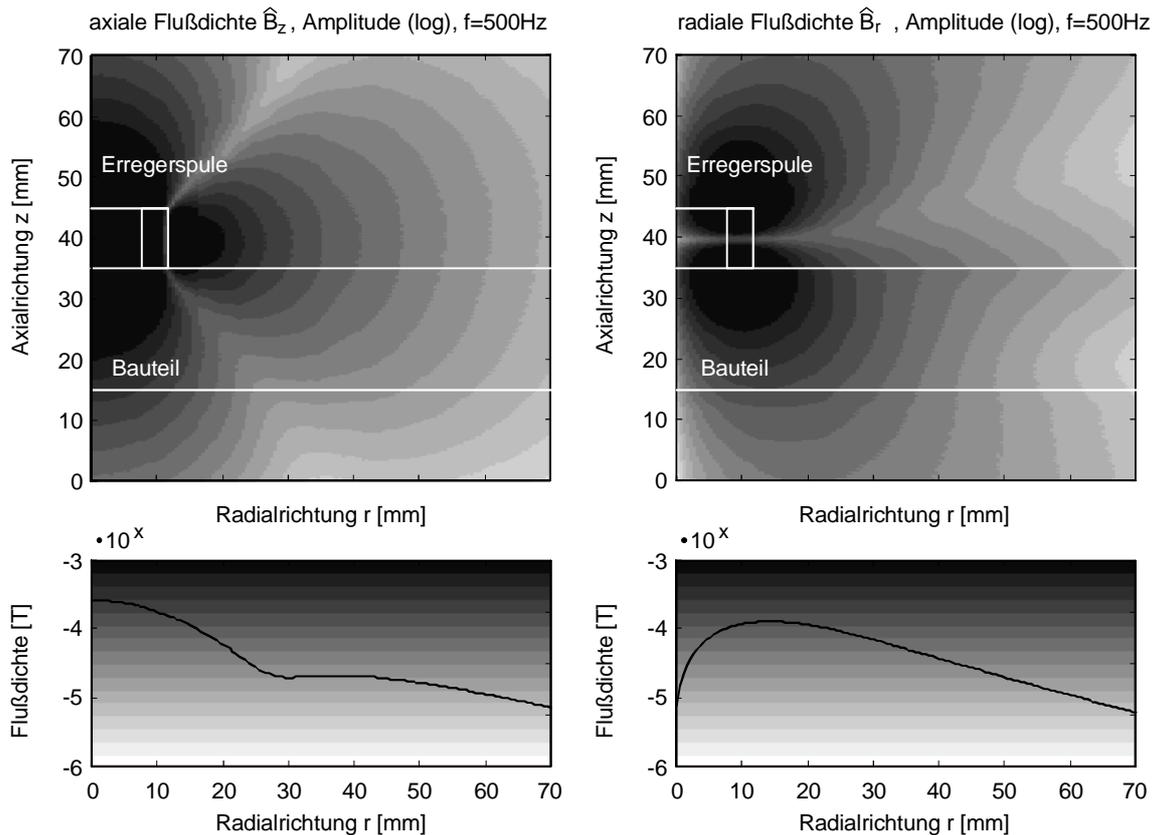


Bild 5.16: Ausbildung der Flußdichte \hat{B}_z und \hat{B}_r im Werkstoff,

Luftspule mit austenitischem Werkstoff, Erregerfrequenz $f=500\text{Hz}$, $\mu_{rel}=1$

Entsprechend der Vorstellung der sich kreisförmig um die Erregerspule schließenden Feldlinien, zeigen die vertikalen Komponenten der Flußdichte B_z in der Spulenmitte die größten Beträge (linke Bildhälfte). Dieses Maximum bildet sich ebenfalls in der Darstellung der Einzelwerte der Flußdichte B_z auf der Unterseite des Werkstoffes ab. Im Verlauf der Einzelwertdarstellung ist die erwartete Unstetigkeit erkennbar, die sich durch den Richtungswechsel des magnetischen Flusses und der Vektorpotentiallinien um die Erregerspule ergibt. Die Positionen der Richtungswechsel der Potentiallinien um die Erregerspule sind in der flächigen Wertedarstellung von B_z ebenfalls seitlich, oberhalb und unterhalb neben der Erregerspule erkennbar. Die horizontalen Komponenten der Flußdichte B_r zeigen im Bereich der Spulenmitte ein Minimum (rechte Bildhälfte). Ober- und unterhalb der Erregerwicklungen bilden sich entsprechend dem Umlauf des magnetischen Flusses Maxima aus. Im Verlauf der Einzelwertdarstellung der horizontalen Anteile des magnetischen Flusses B_r ist keine Unstetigkeit erkennbar.

Aus den Betrachtungen in Bild 5.15 und 5.16 ergibt sich, daß eine einmalige Unstetigkeit im Feldverlauf von B_z nicht ausreicht, um die Ausbildung eines eigenständigen Feldbereiches in einem Teilbereich des Werkstoffes zu identifizieren. Mit steigenden Erregerfrequenzen und zusätzlichen Abschirmungen der Erregerwicklungen werden in der Ausbildung der magnetischen Flußdichte \hat{B}_z jedoch weitere Unstetigkeiten in den Gradienten erkennbar (vgl. Bild 5.13 und 5.14). Diese weisen dann auf eine mehrmalige Richtungsänderung des magnetischen Flusses im Werkstoff hin. Solche Unstetigkeiten konnten rechnerisch und experimentell in den Felddarstellungen erkannt werden. Hieraus ist der Schluß möglich, daß sich tatsächlich ein Feldbereich ausbildet, der Parallelen zu der Felddarstellung bei der Fernfeld-Innenrohrprüfung aufweist, sowohl hinsichtlich der Phasenänderungen in den Übergangsbereichen zwischen Feldbereichen als auch bei der Ausbildung von lokalen Minima. Diese Feldbereiche durchdringen nicht notwendigerweise vollständig den Werkstoff und sind bei den abgeschirmten Spulensystemen erheblich von der Erregerfrequenz und dem Sensoraufbau bei der Prüfung von austenitischen Werkstoffen abhängig.

Der Nachweis einer erhöhten Empfindlichkeit des Spulensystems hinsichtlich der Detektion von verdeckten Werkstofftrennungen durch die Ausbildung dieser Feldbereiche kann nicht erkannt werden. Der Frequenzbereich, in dem eine hohe Empfindlichkeit für verdeckte Werkstofftrennungen erreicht wird, liegt unterhalb des Frequenzbereiches, in dem diese eigenständigen Feldbereiche nachgewiesen wurden. Ursache für die große Tiefenwirkung abgeschirmter Spulensysteme sind demnach kleine Gradienten innerhalb der Verteilung der Wirbelstromdichte im Werkstoff. Dieses wird durch eine hohe Dämpfung der primären Felder der Erregerspule im Halbraum über dem Werkstoff erreicht.

Hieraus ergibt sich eine erweiterte Definition des Begriffes der Fernfeld-Wirbelstromprüfung /Sun 1996/. Diese ist gekennzeichnet durch eine Unterdrückung des direkten magnetischen Flusses von der Erregerspule zu der Meßspule. Dadurch wird die Phasenlage des Meßsignals primär durch die Werkstoffeigenschaften des Prüfteiles ausgebildet.

5.5 Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der numerischen Feldberechnung

Durch die Berechnung der elektromagnetischen Feldverteilungen werden wesentliche Informationen hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung der Wirbelstromsensoren und der Prüfparameter zur Verfügung gestellt.

Die grundsätzlichen Unterschiede in der Felddarstellung zwischen Luftspulen und abgeschirmten Spulen auf dem austenitischen Werkstoff sind durch die Gegenüberstellungen des Vektorpotentials gezeigt. Die zeitabhängigen Darstellungen der Feldverteilungen zeigen charakteristische Feldbereiche im Werkstoff, die nicht unmittelbar von dem primären magnetischen Fluß der Erregerspule induziert werden. Diese zeigen Parallelen zu den Felddarstellungen bei der Fernfeld-Wirbelstromprüfung von Rohren mit Innen-Durchlaufspulen. Die Ausbildung dieser Feldbereiche bei der Wirbelstromprüfung mit abgeschirmten Tastspulen wird wesentlich durch die Gestaltung der Abschirmung und die Prüfparameter bestimmt.

Zur Interpretation der numerischen Berechnungsergebnisse ist die Bestimmung der Eindringtiefe der Wirbelstromverteilung herangezogen worden. Die Einflußgrößen auf die Felddausbildungen sind durch ein Parameterfeld systematisch untersucht worden. Dieses umfaßt den Einfluß der elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften und der Prüffrequenz. Hierbei zeigen sich relativ geringe Eindringtiefen unterhalb der Erregerspule und ein Bereich mit hohen Eindringtiefen seitlich neben der Erregerspule. Diese Bereiche zeigen eine große Ortsabhängigkeit in Bezug zu der Erregerfrequenz, der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität. Bei der Gestaltung der Wirbelstromsensoren zum Nachweis von verdeckten Werkstofftrennungen ist die Position der Meßspule an diese Ortspositionen anzupassen.

Um den Einfluß unterschiedlicher Abschirmwerkstoffe auf die Felddausbildung und die Eindringtiefe zu bestimmen, ist die Verteilung der Wirbelstromdichte seitlich neben der Erregerspule bestimmt worden. Hierbei wurde eine Abnahme der Wirbelstromdichte im Werkstoff mit zunehmender Abschirmung von der primären Felddausbildung erkannt. Dadurch wird die Wechselwirkung der Wirbelstromausbildung mit verdeckten Werkstofftrennungen bei nicht angepaßter Auslegung der Spulenabschirmung verringert.

Die Ergebnisse der numerischen Felddberechnungen lassen sich qualitativ bestätigen mit den experimentell bestimmten realen Feldverhältnissen. Dadurch bestätigen die numerischen Berechnungen die Zusammenhänge bei der Felddausbildung in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz, den elektromagnetischen Eigenschaften des Werkstoffes und den Spulenabschirmungen. Der qualitative Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den experimentellen Meßwerten zeigt nicht zu vernachlässigende Abweichungen aufgrund der Linearisierung der Werkstoffeigenschaften im Rechenmodell. Durch die Annahme feldstärkeunabhängiger magnetischer Permeabilitäten ergeben sich qualitative Unterschiede zwischen den numerisch berechneten Felddausbildungen und den experimentellen Messungen. Insbesondere die Linearisierung der Werkstoffeigenschaften der ferritischen Abschirmungen der Erreger- und der Meßspule führt zu den beobachteten Abweichungen. Dennoch ist gezeigt, daß sich die aus den Ergebnissen der Finiten Elemente Berechnungen ermittelten Zusammenhänge qualitativ auf die reale Felddausbildung im Werkstoff übertragen lassen.

Aus den Ergebnissen der zweidimensionalen Felddberechnungen kann nicht unmittelbar auf die zu erwartende Wirbelstrom-Signalausbildung einer verdeckten Werkstofftrennung geschlossen werden. Daher sind zur Anpassung der Wirbelstromsensoren an die Prüfaufgabe der konstruktive Sensoraufbau und die Prüfparameter durch experimentelle Untersuchungen an prüfrelevanten Testfehlergeometrien zu ermitteln. Durch die numerisch ermittelten Zusammenhänge bei der Felddausbildung werden jedoch richtungsweisende Hilfestellungen zur Sensoroptimierung gegeben.

6 Experimentelle Sensoranpassung zur Prüfung sphärisch gekrümmter Oberflächen

Nachdem die qualitativen Zusammenhänge über die Felddausbildung im Werkstoff in Abhängigkeit der Erregerfrequenzen und der Werkstoffeigenschaften bestimmt sind, kann der Wirbelstromsensor an die Prüfaufgabe angepaßt und optimiert werden. Ziel ist eine hohe Meßempfindlichkeit, entsprechend dem geforderten Nachweisvermögen von Werkstofftrennungen im Volumen des austenitischen Grundwerkstoffs. Voraussetzung ist der ausreichende Einfluß der Werkstofftrennung auf die induzierte Wirbelstromverteilung, um sich auf der Werkstoffoberfläche abzubilden. Das Nachweisvermögen des Wirbelstromsensors wird wesentlich bestimmt durch die Möglichkeit der Unterscheidung von Signalen, verursacht von Werkstofftrennungen und Störsignalen durch Werkstoffinhomogenitäten, Oberflächenunebenheiten oder Abhebeeffekten der Sensorik von der Rohroberfläche. Diese Einflußgrößen können nicht durch Berechnungsverfahren bestimmt werden, so daß eine experimentelle Sensoranpassung notwendig ist. Eine umfassende Kenntnis der Signalausbildung der Wirbelstromsonden für verdeckte, eingeschlossene und Oberflächenfehler in Abhängigkeit der Prüfparameter bildet die Grundlage für die experimentelle Optimierung des Sensors. Entsprechend der Signalausbildung des Wirbelstromsensors sind Kennwerte an den Einzelsignalen zu bestimmen, um die Interpretation und Klassifikation der Meßsignale zu gewährleisten.

6.1 Auswahl prüfrelevanter Testfehlergeometrien

Zur Anpassung der Sensortechnik sind prüfaufgabenbezogene Testfehlergeometrien auszuwählen. Diese sind künstliche Werkstofftrennungen mittels Sägeschnitten oder funkenerosiv hergestellte Nuten in Rohrabschnitten. Die geometrischen Abmessungen für Testfehler, ausgehend von der Rohr-Innenoberfläche, entsprechen den Vorgaben für die wiederkehrende Ultraschallprüfung in den sicherheitstechnischen Regeln KTA 3201 (Teil 4 Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung) /KTA 3201.4/. Hierbei ist die Prüfempfindlichkeit für Wandstärken s von $20\text{mm} < s \leq 40\text{mm}$ an einer Nut mit einer Tiefe von 2mm mit einer Fehler-Basislänge von 20mm zu ermitteln, wobei der Nutauslauf nicht berücksichtigt wird.

Bei der Wirbelstromprüfung wird die Registriergrenze anhand von Vergleichskörper-Messungen an rißartigen Testfehlergeometrien mit einer Tiefe von 20% bestimmt, ausgehend von der Rohr-Innenwandung. Hinsichtlich der Sensoranpassung an die Prüfaufgabe wird dieser Testfehler als Bezugsgröße gewählt. Hervorgehend aus den Vorgaben für die Ultraschallprüfung zur Bestimmung der Nachweisgrenze, soll die Werkstofftrennung mit einer Tiefe von 10% der Rohrwandstärke (2mm) den Übergang zur verfahrensbedingten Rauschgrenze bilden. Weiterhin sind eingeschlossene Trennungen im Werkstoffvolumen mit unterschiedlichem Ligament, mit unterschiedlicher Fehlerhöhe und Orientierung zur Bauteiloberfläche ausgewählt. Die Zusammenstellung aller zur Verfügung stehenden Testfehlergeometrien ist in Tabelle 6.1 wiedergegeben.

Austenitisches Flachmaterial Querschnittsfläche: 100mm x 20mm	Werkstoff: X 6 CrNiNb 18 10 1.4550
Querfehler:	Fehlertiefe: t=10%, 20%, 30%, 40%
Austenitische Rohrabschnitte $D_a=220\text{mm}$; $s=20\text{mm}$:	Werkstoff: 1.4550 / 1.4435
Innen-Längsfehler:	Fehlertiefe: t=10%, 20%, 30%, 40%
Innen – Querfehler:	Fehlertiefe: t=10%, 20%, 30%, 40%
Schleifstellen, Außenfehler – Beulen:	Werkstoffabtrag: t=0.2, 0.5, 0.7, 1.0mm
Innen – Diagonalfehler:	Fehlertiefe: t=10%, 20%, 30%, 40%
Eingeschlossene Fehler:	Ligament 2 ... 14mm Fehlerhöhe: 2 ... 6mm
Schlagstellen, ferromagnetische Störstellen	Fehlertiefe: t = 0.1mm

Tabelle 6.1: Testfehlerauswahl für Wandstärken s
 $20\text{mm} < s \leq 40\text{mm}$

Die verwendeten Bezeichnungen für die Abmessungen der Testfehlergeometrien innerhalb der Rohrwandung zeigt Bild 6.1. Reißartige Werkstofftrennungen, die von der Rohr-Innenwandung ausgehen, haben eine Fehler-Basislänge von 20mm unter Vernachlässigung des Fehlerauslaufs im Werkstoff. Die Tiefe der Sägeschnitte wird angegeben durch die prozentuale Höhe in Bezug zu der Gesamtwandstärke von 20.3mm. Eingeschlossene Fehler sind weder zur Rohr-Innenoberfläche noch zur Rohr-Außenoberfläche geöffnet. Sie werden beschrieben durch die Fehlerhöhe im Werkstoff. Das Ligament bezeichnet die Höhe des verbleibenden Werkstoffes zur Rohr-Außenoberfläche.

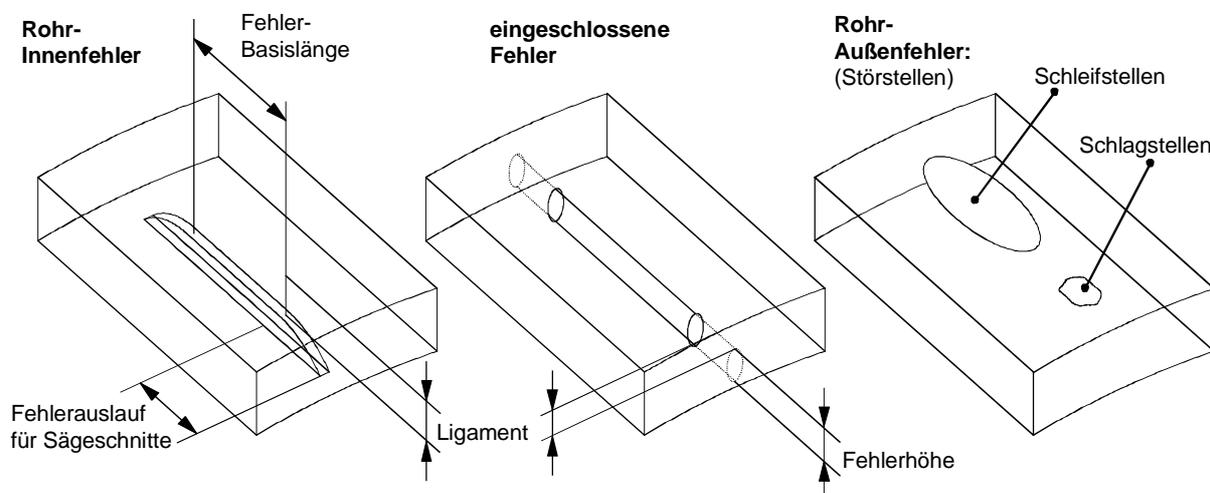


Bild 6.1: Prüfrelevante Testfehlergeometrien und geometrische Bezeichnungen

Zur Anpassung der Prüfparameter hinsichtlich der Unterdrückung von Störeinflüssen auf das Wirbelstromsignal sind entsprechende Testfehlergeometrien in der Rohr-Außenoberfläche eingebracht.

Störsignale durch Lift-Off Effekte entstehen durch die Verfahrbewegung über lokale Unstetigkeiten im Oberflächenverlauf. Zur Nachbildung von Bearbeitungsstellen, wie sie bei der Fertigung und Montage der Rohrbögen auftreten, sind Schleifstellen großflächig mit Tiefen von 0.2mm bis 1mm von der Rohr-Außenoberfläche abgearbeitet worden. Hierdurch ändern

sich bei den Bewegungen des Sensors auf der Rohr-Außenoberfläche die Orientierungen der Erreger- und Meßspule zueinander, welches sich als Störsignal auswirkt.

Lokale elektromagnetisch inhomogene Werkstoffausbildungen führen ebenfalls zu Störungen in der Wirbelstromsignalausbildung. Diese werden hervorgerufen durch bereits beschriebene martensitische Gefügeumwandlungen des metastabilen austenitischen Rohrwerkstoffs, was zu ferromagnetischen Werkstoffbereichen in dem paramagnetischen Werkstoffgefüge führt. Lokale Bauteilbereiche ohne Werkstoffabtrag mit geringen ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften werden durch Kratz- und Schlagstellen mit plastischen Werkstoffverformungen in der Rohr-Außenoberfläche nachgebildet. Werkstoffbereiche mit ausgeprägten ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften werden durch auf die Rohr-Außenoberfläche aufgeklebte dünne Folien aus Baustahl simuliert.

6.2 Erfassung der Wirbelstromsignale

Durch die besondere geometrische Anordnung der abgeschirmten Erregerspule und der seitlich positionierten Meßspule ergeben sich charakteristische Sensoreigenschaften, die bestimmend sind für die Signalausbildung. Von Bedeutung sind hierbei die Feldverteilungen aufgrund der Prüfbedingungen, die elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften und die gewählte Prüffrequenz. Weiterhin wird die Signalausbildung bestimmt von der geometrischen Ausrichtung einer Werkstofftrennung in Bezug zu der Orientierung des Wirbelstromsensor-systems. Bild 6.2 zeigt schematisch die Anordnung der Wirbelstromsonde und die Bewegungsrichtungen auf der Prüfteiloberfläche zur Meßdatenaufnahme. Die maximale Empfindlichkeit wird entsprechend der Darstellung erreicht, wenn die Werkstofftrennung parallel zu einer Verbindungslinie zwischen der Erreger- und der Meßspule orientiert ist. Die maximale Empfindlichkeitsrichtung steht somit stets rechtwinklig zur Längsrichtung der Werkstofftrennung.

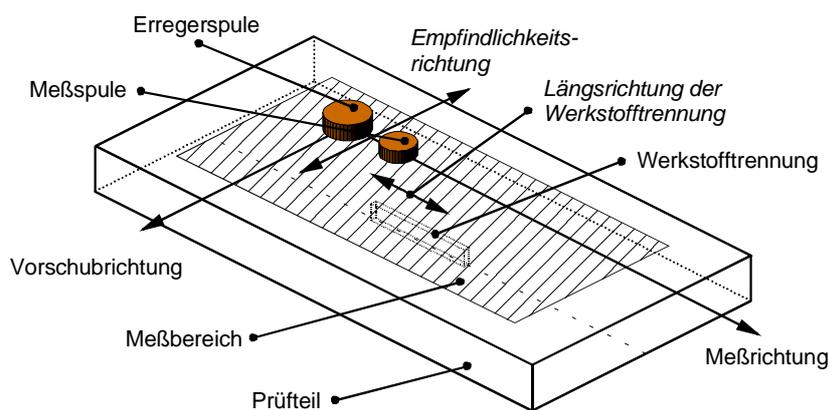


Bild 6.2: Flächige 2D-Wirbelstrom-Signalaufnahme an einem ebenen Prüfteil

Zur Bereitstellung der Meßdaten für eine flächige Signaldarstellung wird die Oberfläche des Prüfteils mechanisiert abgetastet. Die Bewegung des Sensor-systems erfolgt in Einzelspuren kammförmig auf der Prüfkörperoberfläche, wobei die Wirbelstromsignale einschließlich der Ortsposition gespeichert werden. Die Datenanalyse erfolgt nach dem Beenden der Meßdatenaufnahme. Den x- und y-Komponenten des Wirbelstromsignals werden entsprechend ihren Meßwerten Farbwerte zugeordnet. In Verbindung mit der Ortsposition

ergibt sich eine flächige Darstellung aus den einzelnen Meßwertgrößen. Diese zweidimensionale Darstellung der Wirbelstromkomponenten in Farbabstufungen über der Prüffläche ermöglicht die Bestimmung der geometrischen Ausdehnung und Orientierung von Wirbelstromindikationen auf der Bauteiloberfläche. Diese Wirbelstrom 2D-Bild Darstellung ist besonders geeignet, um Merkmale zur Signalklassifikation und Kriterien für die Sensoroptimierung zu bestimmen. Bild 6.3 zeigt beispielhaft eine Wirbelstrom 2D-Bild Darstellung von Signalen eines Innenfehlers mit einer Tiefe von 30% (6mm) in einer 20mm starken austenitischen Stahlplatte. Die Länge der Werkstofftrennung beträgt 20mm. Innerhalb der Konturdarstellung markieren die horizontale und die vertikale Linie die Positionen, an denen die Einzelspuren aus den Datenfeldern als Wegdarstellung in Meß- und Vorschubrichtung dargestellt sind. Damit stehen die Meßdaten für eine detaillierte Meßwertanalyse an der entsprechenden Ortsposition aus dem Meßgebiet zur Verfügung. Das Wirbelstromsignal in der Impedanzebene ist in der rechten Bildhälfte gezeigt. Die Darstellung und Bewertung in der Impedanzebene erfolgt grundsätzlich anhand der Meßwerte in Empfindlichkeitsrichtung des Sensorsystems.

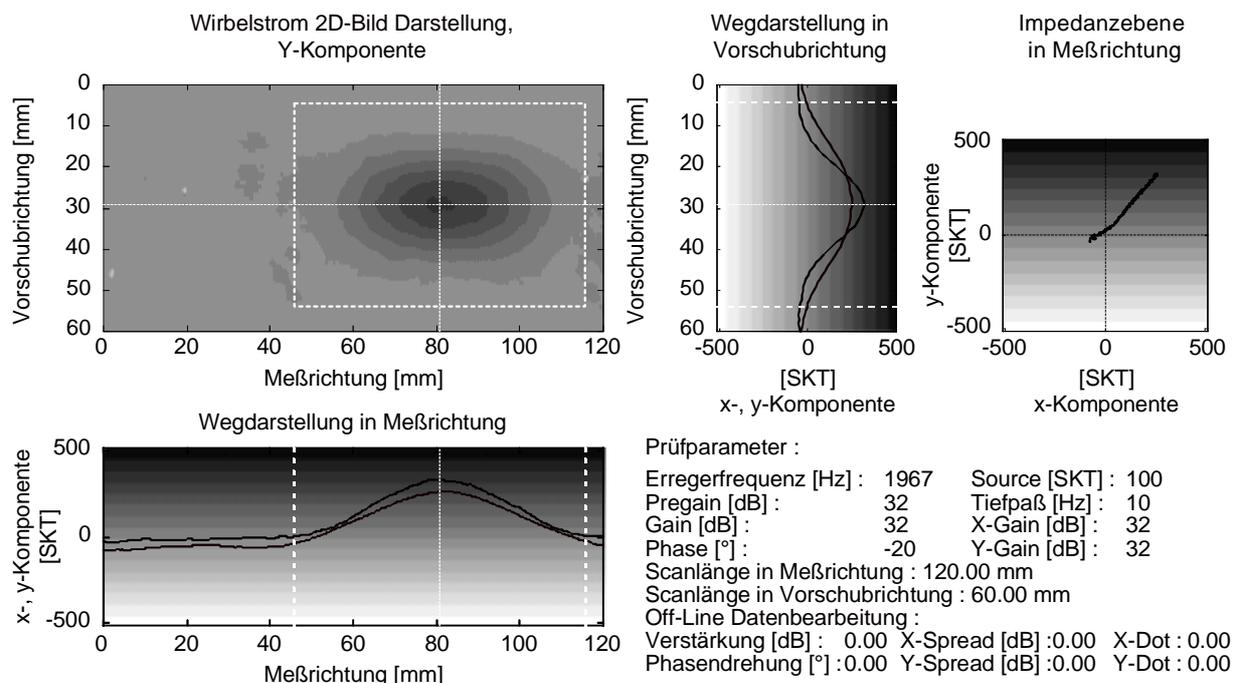


Bild 6.3: Wirbelstrom 2D-Bild Darstellung einer verdeckten Werkstofftrennung, Wandstärke $s=20\text{mm}$, Fehlertiefe $t=30\%$, Werkstoff 1.4550

6.3 Techniken der Wirbelstrom-Signalauswertung

Zur Optimierung der Wirbelstromsonden sind charakteristische Kennwerte der Wirbelstromsignale zu bestimmen, die einen objektiven Vergleich der Signalausbildung bei unterschiedlichen Prüfparametern ermöglichen. Diese Kennwertbildung erfolgt im Zeitbereich durch die Komponentenauswertung oder die Betragsauswertung nach DIN 54142 entsprechend Bild 6.4 /DIN 54142/.

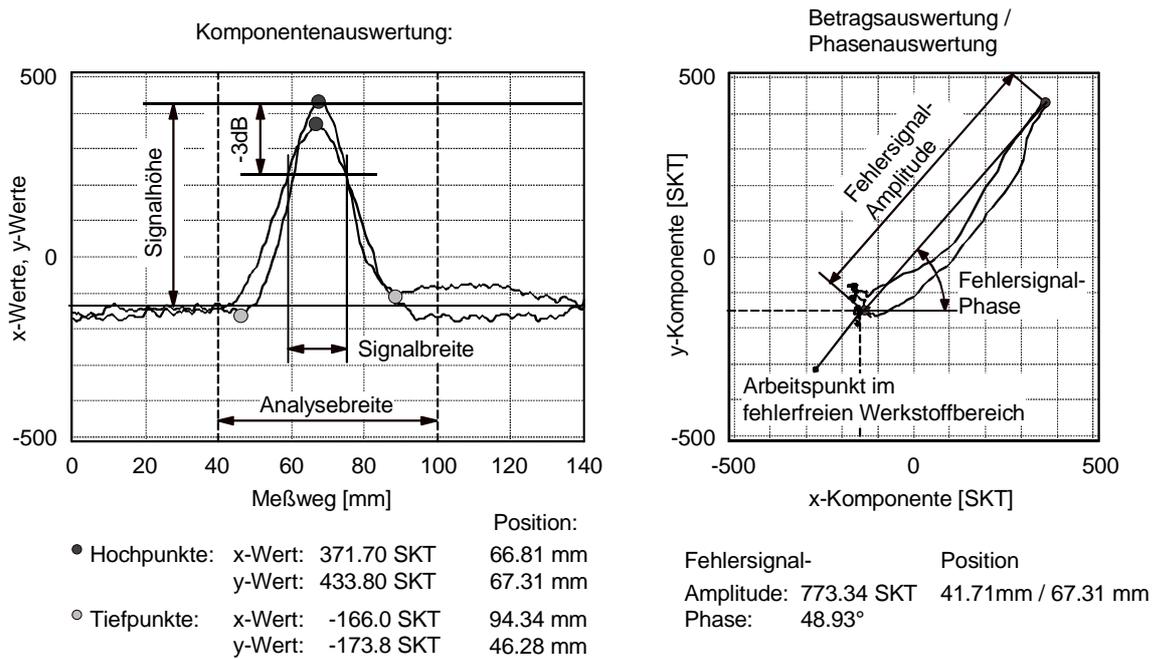


Bild 6.4: Komponenten- und Betragsauswertung nach DIN 54142 Teil 3

Bei der Komponentenauswertung werden die Einzelsignale (x- oder y-Komponente) in Abhängigkeit der Bewegungsparameter (Wegzuordnung, Zeitpunktzuordnung) der Spule untersucht. Üblicherweise werden Absolutsignale im Zeitbereich durch die Angabe der Extremwerte charakterisiert. Die Wiedergabe der Wirbelstromsignale als flächige Darstellung ermöglicht die Auswahl signifikanter Meßsignalausbildungen im Meßgebiet, um die Extremwerte entsprechend der Komponentendarstellung zu bestimmen. In Bild 6.3 ist der rechteckige Analysebereich in Meß- und Vorschubrichtung durch die weiße Begrenzungslinie markiert. Innerhalb dieses flächigen Bereiches werden die Extremwerte und ihre Ortsposition in einfacher Weise ermittelt.

Diese Extremwerte sind jedoch abhängig von dem gewählten Arbeitspunkt im fehlerfreien Werkstoffbereich und von der Richtung der Signaländerung in der Impedanzebene. Bei der Prüfung von sphärisch gekrümmten Oberflächen kann der Arbeitspunkt während der Meßdatenaufnahme aufgrund von Orientierungsänderungen der Spulenachsen zur Bauteiloberfläche aus dem Ursprung der Impedanzebene verlagert werden. Daher ist die Signalebewertung mit Hilfe von Extremwertbestimmungen für die Prüfaufgabe ungeeignet.

Entsprechend der DIN 54142 Teil 3 wird die Ausdehnung des wirksamen Tastspulenfeldes als Signalbreite durch die Bestimmung der Schnittpunkte mit einer Horizontalen, parallel zur Weg- oder Zeitachse bei einem Signalabfall von -3dB ermittelt. Die in Bild 6.4 gezeigte Bestimmung der Signalbreite in der Komponentenauswertung ist von der Fehlersignal-Phase des Absolutsignals abhängig. Zur praktischen Ermittlung vergleichbarer Signalbreiten in Meß- oder Vorschubrichtung wird daher stets eine Phasenkorrektur des Wirbelstromsignals durchgeführt, so daß eine maximale Signaländerung in der betrachteten Wirbelstromkomponente erreicht wird.

Bei der Betragsauswertung wird die geometrisch größte Distanz zwischen den Signalgrößen im fehlerfreien Werkstoffbereich und der maximalen Signalauslenkung im Bereich einer Werkstofftrennung in der Impedanzebene bestimmt. Die Fehlersignal-Amplitude entspricht somit der maximalen Länge der Auslenkung und die Fehlersignal-Phase der Winkeldifferenz der Verbindungsline zwischen der maximalen Arbeitspunktverlagerung zur positiven x-Achse. Die Analyse eines Einzelsignals erfolgt in Meß- oder Vorschubrichtung für die entsprechende Signalsignatur innerhalb einer angemessenen Analysebreite. Die Ortsposition der interessierenden Meßspur kann anhand der flächigen Darstellung der Einzelkomponenten rechnerunterstützt ausgewählt werden. Diese Kenngrößen sind unabhängig von der Wahl des Arbeitspunktes in der Impedanzebene und bieten einen erheblichen Vorteil bei der Signalcharakterisierung gegenüber der Komponentenauswertung.

6.4 Abbildungseigenschaften von abgeschirmten Sensorsystemen

Bei der Anwendung der Wirbelstrom C-Scan Technik wird die flächige Signaldarstellung aus den Wirbelstromkomponenten der einzelnen Meßspuren gebildet. Demzufolge werden die Abbildungseigenschaften der Wirbelstromsensoren durch die Ausbildung der Einzelkomponenten der Signale bestimmt. Voraussetzung zur Detektion von Werkstofftrennungen im Werkstoffvolumen ist, daß diese in den dargestellten Einzelsignalen abgebildet werden.

Entsprechend dem Aufbau des Wirbelstrom-Sensorsystems, bestehend aus der Erreger- und der Meßspule, ergibt sich bei der Sensorgestaltung eine Vielzahl unterschiedlicher Freiheitsgrade, die einen erheblichen Einfluß auf die Ausbildung der Einzelsignale zeigen. Die Gestaltungsmerkmale ergeben sich aus der Wahl der magnetischen und der elektrischen Werkstoffeigenschaften der Abschirmung für die Spulen. Hierzu gehören die Abmessungen der Erreger- und der Meßspule sowie die Abstände zwischen den Spulen. Die Prüfbedingungen werden vorgegeben durch die elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften des zu untersuchenden Bauteils. Ein Einfluß kann nur durch die Wahl der Erregerfrequenz und durch die Größe der magnetischen Erregung ausgeübt werden. In Abhängigkeit dieser an die Prüfaufgabe anzupassenden Einflußgrößen ergibt sich die Ausbildung der Einzelsignale, entsprechend den Eigenschaften der Werkstoffschädigungen.

Die Unterscheidungsmerkmale der Signalausbildungen in Abhängigkeit der Werkstoffschädigungen ergeben sich aus den Fehlersignal-Amplituden und Fehlersignal-Phasen in Bezug zu der Meßposition. Mit der flächigen Darstellung kann die geometrische Orientierung und die Ausdehnung von Werkstoffschädigungen charakterisiert werden. Zur Anpassung der Prüfparameter und der Sensorgestaltung an eine Prüfaufgabe ist zunächst die Kenntnis der Einflußgrößen auf die Signalausbildung notwendig.

6.4.1 Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude und der Fehlersignal-Phase in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz

Die charakteristische Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude und der Fehlersignal-Phase in Abhängigkeit der Erregerfrequenz ist in Bild 6.5 aufgezeigt. Die Meßergebnisse sind an Innennuten mit Tiefen von 20%, 30% und 40% bei festem Abstand zwischen der Erreger- und der Meßspule ermittelt. In der Darstellung ist zunächst eine Erhöhung der Amplitudenwerte mit steigender Erregerfrequenz erkennbar. Dieses ist im wesentlichen auf zwei sich überlagernde Effekte zurückzuführen. Zunächst führt die Frequenzerhöhung zu einer schnelleren Änderung des magnetischen Flusses $\dot{\Phi}$ im Werkstoff, welches entsprechend dem Induktionsgesetz zu einer Erhöhung der Wirbelstromdichte in dem Bauteilquerschnitt führt. Bei weiterer Erhöhung der Erregerfrequenz steigt jedoch der komplexe Spulenwiderstand in der Erreger-spule, so daß die Gesamtdurchflutung durch die Erreger-spule weiter abnimmt. Entsprechend der Verringerung der Feldgrößen nehmen die Fehlersignal-Amplituden für die Testfehlergeometrien mit steigender Frequenz ab.

Die Fehlersignal-Phasen zeigen bei niedrigen Erregerfrequenzen für die betrachteten Fehler-tiefen vergleichbare Werte. Mit steigender Frequenz nehmen die absoluten Phasenwerte ab, und es treten Unterschiede zwischen den untersuchten Testfehlertiefen auf. Ursache hierfür ist eine verstärkt inhomogene Verteilung der Wirbelstromausbildung im Werkstoffquerschnitt hinsichtlich der Amplituden- und Phasenausbildung.

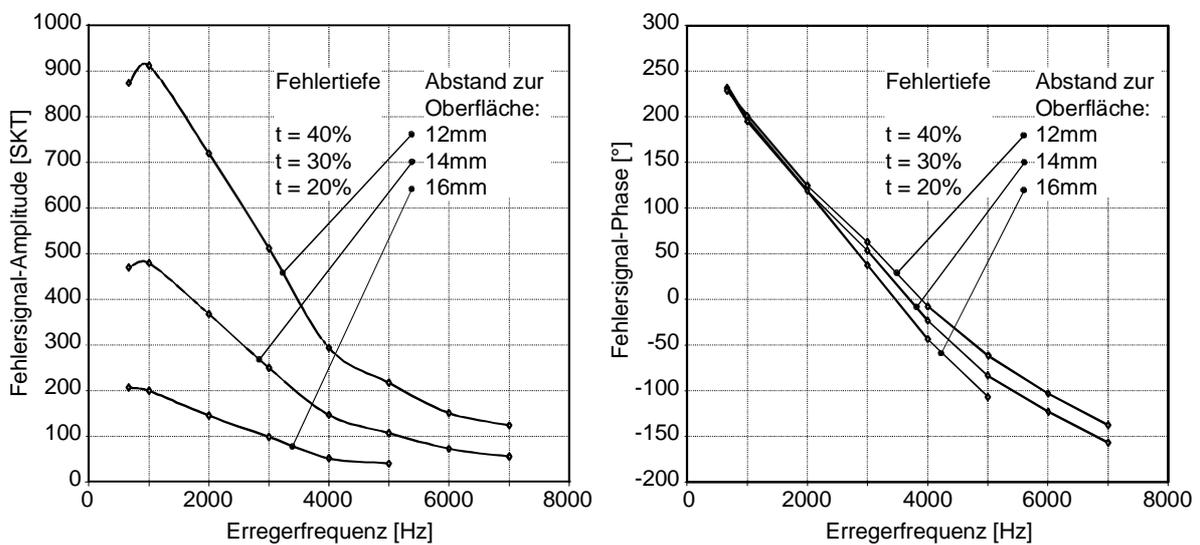


Bild 6.5: Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude und der Fehlersignal-Phase
Werkstoff: 1.4550, Wandstärke $s=20\text{mm}$, Mitten-Spulenabstand $a=37\text{mm}$

Die Abhängigkeit der Fehlersignalausbildung von der Erregerfrequenz wird von der Verteilung der Wirbelstromdichte im Werkstoffquerschnitt bestimmt. Daher lassen sich die experimentellen Ergebnisse der Fehlersignalausbildung qualitativ den Berechnungsergebnissen der Wirbelstromdichte gegenüberstellen.

In Bild 6.6 sind die berechnete Wirbelstromdichte und die Phase exemplarisch in unterschiedlichen Werkstofftiefen bei gleichbleibendem Abstand von der Erregerspule bestimmt. In Analogie zu den in Bild 6.5 gezeigten Verläufen der Fehlersignal-Amplituden erhöhen sich zunächst die Wirbelstromdichten in unterschiedlichen Werkstofftiefen mit zunehmender Frequenz bis zu einem Maximalwert. Bei weiterer Erhöhung der Erregerfrequenz verringern sich die Wirbelstromdichten asymptotisch an die Abszisse. Die Werte für die Wirbelstromphase zeigen bei geringen Erregerfrequenzen annähernd gleiche Beträge im Werkstoff von der Ober- zur Unterseite. Mit zunehmender Erregerfrequenz bilden sich Phasendifferenzen von der Werkstoffober- zur Werkstoffunterseite aus, die auf eine zunehmend inhomogene Feldverteilung hinweisen.

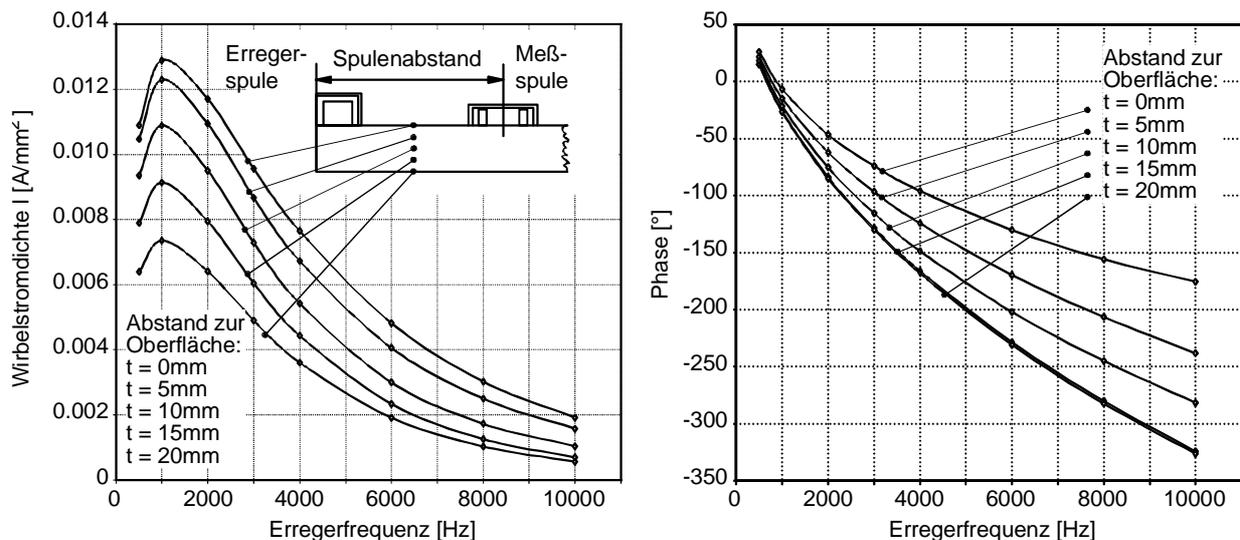


Bild 6.6: Berechnungsergebnis der Wirbelstromdichte im Werkstoffquerschnitt
Werkstoff: 1.4550, Wandstärke $s=20mm$, horizontaler Abstand der
Berechnungspunkte von der Erregerspule: 35mm

Die Darstellung der Zusammenhänge der Fehlersignal-Amplitude und der Phase in Abhängigkeit der Prüfbedingungen bestätigt nochmals qualitativ die mit Hilfe der numerischen Feldberechnungen bestimmten Verhältnisse bei der Feldausbildung im Werkstoff.

6.4.2 Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude in Abhängigkeit des Abstandes Werkstoffoberfläche - Wirbelstromsensor

In der Wirbelstromtechnik hat der Abstand zwischen dem Sensor und der Werkstoffoberfläche eine erhebliche Bedeutung. Zu unterscheiden sind der Einfluß auf die Signalausbildung bei planparallelem Abstand zwischen Werkstoffoberfläche und Wirbelstromsensor sowie ungleichmäßige Abstandsänderungen durch Abhebeeefekte der Spulen-anordnung bei der Bewegung des Sensors über der Bauteiloberfläche.

Eine gleichmäßige Abstandserhöhung führt zu einer Schwächung der induzierten Feldgrößen und zu einer Abnahme der Signalgrößen. Bei der Fehlerprüfung ist zu gewährleisten, daß Feldstörungen sich trotz verringerter Intensität in den Wirbelstromsignalen abbilden. In Bild 6.7 ist die Reduzierung der Fehlersignal-Amplitude in Abhängigkeit des Abstandes zur Werkstoffoberfläche gezeigt. Die Signalkenngrößen sind bestimmt an Signalverläufen, die gemessen wurden bei planparallelem Abheben der Erreger- und der Meßspule von der Werkstoffoberfläche. Deutlich erkennbar ist die Verringerung der Fehler-Signalamplitude mit zunehmendem Abstand. Bei dem gewählten Labor-Meßaufbau ist jedoch auch bei einem Sensorabstand von 10mm zum Prüfkörper der Nachweis der Werkstofftrennungen in den Einzelsignalen möglich.

Ungleichmäßige Abstandsänderungen haben einen wesentlich stärkeren Störeinfluß auf die Signalausbildung. Hierdurch können Störsignale bei Abstandsänderungen der Spulen zu der Werkstoffoberfläche einer Werkstofftrennung überlagert werden. Die Trennung zwischen stochastisch auftretenden Abstandsänderungen und den Feldstörungen durch Werkstofftrennungen sind ein wesentliches Kriterium für eine Sensoroptimierung.

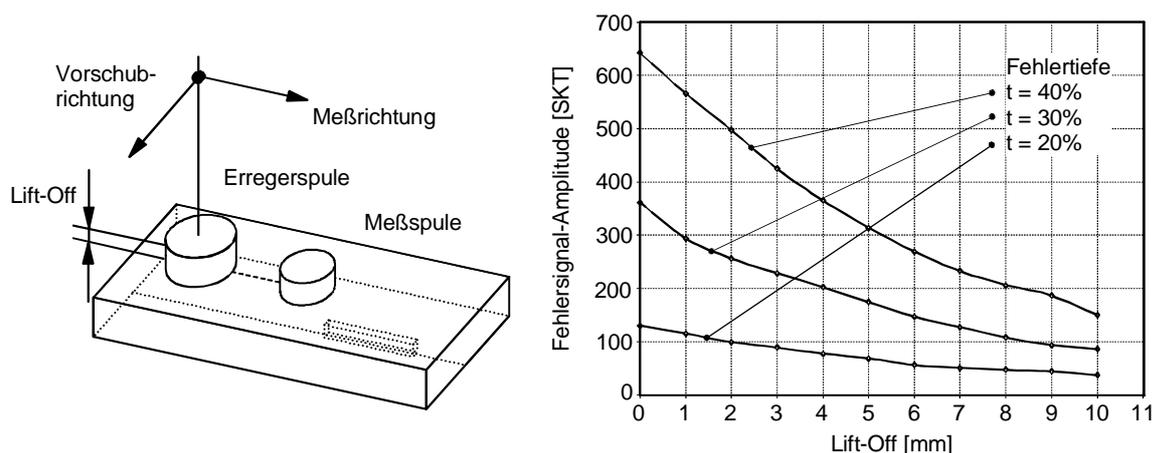


Bild 6.7: Fehlersignal-Amplitude in Abhängigkeit des planparallelen Sensorabstandes zur Werkstoffoberfläche, Werkstoff: 1.4550, Abstand Erregerspule - Meßspule: $a=50\text{mm}$

6.4.3 Position des Fehlersignal-Maximums

Entsprechend dem Aufbau des Sensorsystems, das aus der räumlich getrennten Erreger- und Meßspule besteht, verursacht eine Werkstofftrennung im Bauteil eine Störung der Wirbelstromverteilung zwischen der Erreger- und der Meßspule. Durch die von der Erregerfrequenz bestimmten Feldverhältnisse ergibt sich ein frequenzabhängiger Zusammenhang zwischen der Position der meßbaren Wirbelstromsignalausbildung auf der Bauteiloberfläche und der örtlichen Position der verdeckten Werkstofftrennung in der Werkstofftiefe.

Die flächige Wirbelstrom 2D-Bild Darstellung der Einzelkomponenten ermöglicht die einfache Bestimmung der Ortsposition der Extremwerte in Bezug zur Position der Erregerspule innerhalb des Meßbereiches.

In Bild 6.8 ist die Anordnung zur Bestimmung der Ortsposition der Extremwerte in Bezug zu dem Mittelpunkt der Erregerspule vereinfacht wiedergegeben. Zur genauen Bestimmung der Ortsposition der Maximalwerte in Bezug zu der Position der Werkstofftrennung ist die Bauteiloberfläche bei verschiedenen Frequenzen, entsprechend der Darstellung in Meß- und Vorschubrichtung, flächig erfaßt. In Vorschubrichtung bildet sich das Signalmaximum über der Werkstofftrennung in der Sensormitte aus. In Meßrichtung überfährt die Meßspule die Werkstofftrennung in Längsrichtung, wobei die Signalausbildung zeitlich und örtlich nachlaufend ausgebildet wird. In der rechten Bildhälfte ist die Ortsposition der Maximalwerte der Wirbelstromkomponente als Funktion der Erregerfrequenz dargestellt. Für niedrige Erregerfrequenzen ergibt sich unabhängig von der Fehlertiefe eine ähnliche Position des Signalmaximums. Mit steigender Erregerfrequenz verlagern sich die Positionen des Signalmaximums für die einzelnen Fehlertiefen von 20%, 30% und 40% an unterschiedliche Positionen in Richtung der Erregerspule. Die geringste Verlagerung zeigt die tiefste Werkstofftrennung bei Erhöhung der Erregerfrequenz. Die größte Verlagerung in Richtung auf die Erregerspule mit steigender Erregerfrequenz zeigt die Werkstofftrennung mit einer Tiefe von 20%.

Die Erklärung für die Verlagerung der Signalmaxima bei unterschiedlichen Fehlertiefen ergibt sich wiederum aus der mit steigender Erregerfrequenz zunehmenden inhomogenen Wirbelstromverteilung im Werkstoff. Entsprechend den Erkenntnissen aus den Feldberechnungen verlagern sich die Bereiche mit einer relativ homogenen Verteilung der Wirbelstromdichte in den Nahbereich der Erregerspule. Diese homogenen Feldverteilungen sind die Voraussetzung für eine Abbildung der Werkstofftrennungen in der Wirbelstromverteilung auf der Bauteiloberfläche. Folglich verlagern sich die Maximalwerte der Meßsignale mit steigender Frequenz in Richtung der Erregerspule.

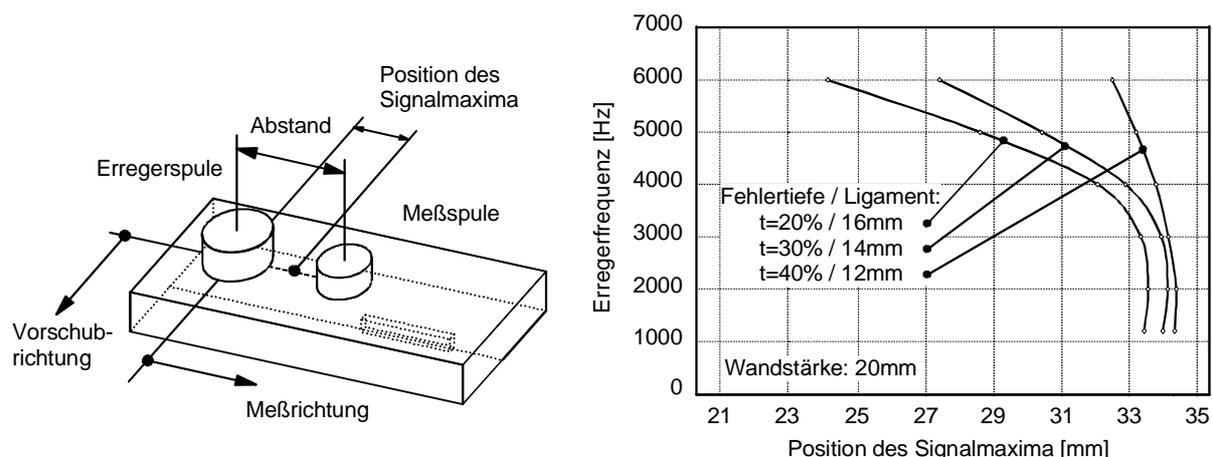


Bild 6.8: Position der Maximalwerte in Abhängigkeit der Erregerfrequenz f , Abstand Erregerspule - Meßspule: $a=37\text{mm}$

Bild 6.9 zeigt die Verlagerung der Ortsposition der maximalen Wirbelstromdichte auf der Werkstoffunterseite mit steigender Frequenz aus den berechneten Feldgrößen im austenitischen Grundwerkstoff. In der linken Bildhälfte sind zur Veranschaulichung des Frequenzeinflusses die Wirbelstromdichte unterhalb der abgeschirmten Erregerspule bei niedriger und hoher Erregerfrequenz für den Imaginärteil, Zeitpunkt $t=\pi/2$, gezeigt. Entsprechend der angegebenen Skalierung zeigt sich bei der niedrigen Erregerfrequenz eine deutlich geringere Abnahme der Wirbelstromdichte in der Werkstofftiefe als bei der hohen Erregerfrequenz.

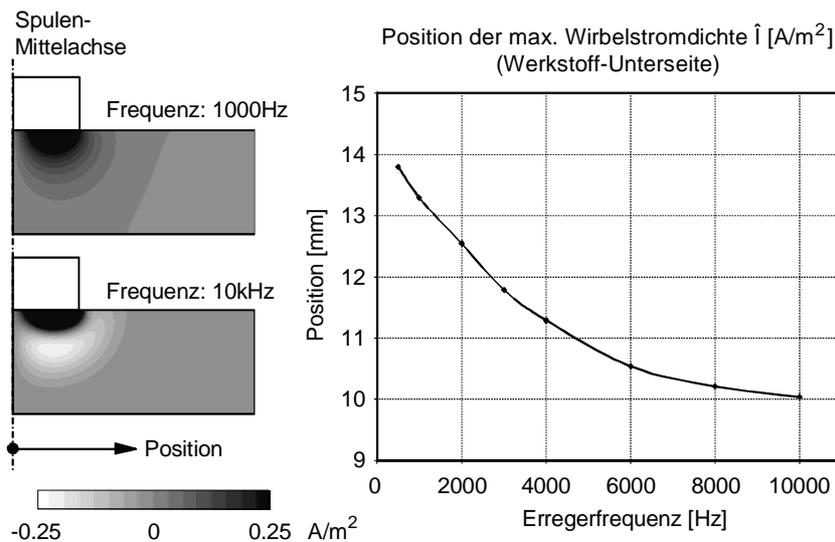


Bild 6.9: Verteilung der Wirbelstromdichte im Werkstoff unterhalb der abgeschirmten Erregerspule Erregerfrequenz $f=1\text{kHz}$ und 10kHz , Imaginärteil, $t=\pi/2$

Die Ortspositionen der numerisch berechneten Maximalwerte in Abhängigkeit der Erregerfrequenz auf der Werkstoffunterseite sind in der rechten Seite in Bild 6.9 wiedergegeben. Entsprechend der Darstellung, verlagern sich mit steigender Erregerfrequenz die Positionen der maximalen Wirbelstromdichte exponentiell in Richtung der Erregerspule. Dieser Zusammenhang bestätigt qualitativ die experimentell beobachtete Verlagerung der Signalmaxima bei

der Ausbildung der Wirbelstromsignale in Abhängigkeit der Erregerfrequenz.

Die frequenzabhängige Verlagerung der Feldbereiche hat für die Verarbeitung der Wirbelstromsignale von abgeschirmten Spulensystemen weitreichende Auswirkungen. Diese betrifft die Zuordnung einer Wirbelstromindikation zu der Ortsposition einer Werkstofftrennung bei der Datenanalyse sowie den Einsatz der Mehrfrequenz-Mischtechnik.

Die Anwendung der Mehrfrequenz-Mischtechnik zur Unterdrückung von Störsignalen kann bei dieser Meßspulenordnung nicht angewendet werden, da die Ortsposition der Feldstörung im Werkstoffvolumen nicht die Ortsposition der Signalbildung einer Störung auf der Werkstoffoberfläche ist. Bei der Mehrfrequenz-Mischtechnik werden Störsignale bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen aufgenommen. Durch eine angepaßte Signalbearbeitung werden diese gleichwertig gewichtet und anschließend gegenseitig subtrahiert. Hierdurch wird eine Elimination der ausgewählten Störanteile erreicht, ohne die gewünschte Meßinformation zu verlieren. Dieses Vorgehen ist bei der betrachteten Sensortechnik nicht möglich, da die ortsgleiche Signalüberlagerung des Störsignals bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen nicht gegeben ist. Eine ortsgleiche Signalausbildung, unabhängig von der Prüffrequenz, wird

im allgemeinen bei der Prüfung von oberflächenoffenen Werkstofftrennungen mit konventionellen Wirbelstromsensoren erreicht.

Aus der unterschiedlichen Verlagerung der Signalmaxima in Abhängigkeit der Prüffrequenz und der Fehlertiefe ergibt sich eine zusätzliche Möglichkeit der Fehlertiefenabschätzung. Hierbei wird das Wirbelstromsignal einer unbekanntem Anzeige mit steigenden Erregerfrequenzen aufgenommen und die Verlagerung der Meßsignalausbildung in Abhängigkeit der Erregerfrequenz bestimmt. Werkstofftrennungen mit einem kleinen Ligament zeigen eine nur geringe Verlagerung der Signalmaxima bei steigenden Prüffrequenzen. Werkstofftrennungen mit einem großen Ligament zeigen eine große Verlagerung der Signalmaxima bei steigenden Erregerfrequenzen. Dieser Zusammenhang bietet eine alternative Möglichkeit der Absicherung von Ergebnissen der Fehlertiefenbestimmung anhand von Kalibrierkurven, die bei diskreten Erregerfrequenzen an bekannten Testfehlergeometrien aufgenommen wurden.

6.4.4 Ausbildung der Fehlersignal-Breite

Die Frequenzabhängigkeit der Feldausbildung beeinflusst die Breitenverhältnisse in Meß- und Vorschubrichtung in der flächigen Darstellung der Wirbelstromkomponenten für Signale von rißartigen Werkstofftrennungen. Entsprechend der räumlichen Ausbildung der Wirbelstromverteilung bei Vorhandensein einer Werkstofftrennung, wird die Signalausbildung sowohl von der Erregerfrequenz als auch von der Ortsposition der Meßspule in Bezug zu der Erregerspule beeinflusst. In Bild 6.10 ist auf der Ordinate die Wirbelstrom-Signalbreite in Meßrichtung als dreidimensionales Kennfeld in Abhängigkeit der Erregerfrequenz und des Abstands zwischen Erreger- und Meßspule wiedergegeben. Die Signalbreite ist entsprechend dem in Bild 5.19 vorgestellten Verfahren nach DIN 54142 Teil 3 bestimmt. Die qualitativen Zusammenhänge werden durch die eingezeichneten Strichpunktlinien wiedergegeben.

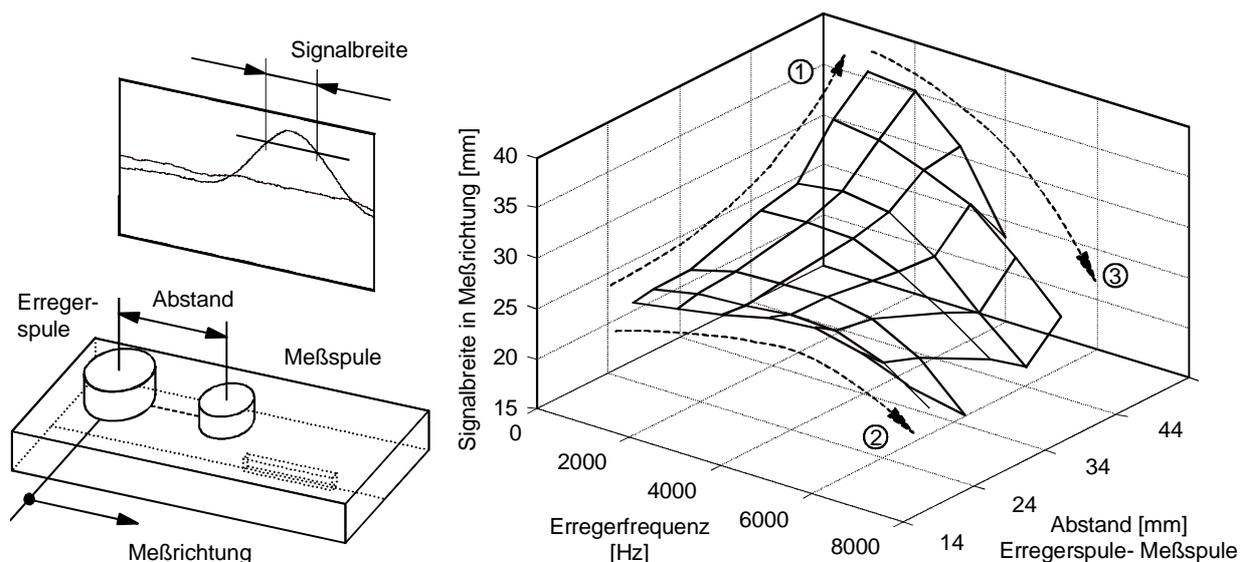


Bild 6.10: Signalbreite in Abhängigkeit der Erregerfrequenz und des Abstands zwischen Erregerspule und Meßspule

Kennzeichnung 1 zeigt die Zunahme der Signalbreite bei einer Vergrößerung des Abstands zwischen der Meß- und der Erregerspule bei geringer Erregerfrequenz. Mit zunehmendem Abstand der Spulen folgt eine Zunahme der Signalbreite in der flächigen Abbildung der Wirbelstrom-Signalausbildung. Gleichzeitig verringern sich die Beträge der Fehlersignalamplitude exponentiell, so daß die Erkennbarkeit durch die Verringerung der Gradienten in der flächigen Darstellung signifikant abnimmt. Damit verringert sich die Ortsauflösung des Fehlersignals mit zunehmendem Abstand zwischen Erreger- und Meßspule.

Kennzeichnung 2 zeigt die Änderung der Signalbreite mit Erhöhung der Erregerfrequenz bei einem geringen Abstand zwischen Erreger- und Meßspule. Zunächst ist eine geringe Zunahme der Signalbreite erkennbar. Bei einer weiteren Erhöhung verkleinert sich die Signalbreite entsprechend der Markierung. Bei diesen geringen Abständen ist die Meßspule vor dem eigentlichen Empfindlichkeitsbereich angeordnet. Mit zunehmender Frequenz verlagert sich der Empfindlichkeitsbereich in Richtung der Erregerspule, so daß die Signalbreite etwas zunimmt. Insgesamt befindet sich die Meßspule jedoch im Nahbereich der Erregerspule, so daß die Wirbelstromsignale von der Werkstofftrennung überlagert werden von primären Feldanteilen der Erregerspule.

Kennzeichnung 3 zeigt die Ausbildung der Signalbreite bei relativ großem Abstand zwischen Erreger- und Meßspule. Bei dem großen Abstand werden in der Meßspule nur schwache Meßsignale aufgrund geringer Wirbelstromdichten induziert, die entsprechend Kennzeichnung 1 zu sehr breiten Signalausbildungen führen. Mit Zunahme der Erregerfrequenz und der einher gehenden Verlagerung der Wirbelstromverteilungen in Richtung der Erregerspule verringern sich die Amplitudenwerte der Signalkomponenten erheblich, so daß eine signifikante Meßwertausbildung bei Frequenzen oberhalb von 4000Hz nicht möglich ist. Hierdurch verringert sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, so daß eine reproduzierbare Analyse der Signalkomponenten nicht gegeben ist .

6.4.5 Richtungsabhängigkeit der Signalausbildung

Die Ausbildung der Wirbelstromsignale der untersuchten Wirbelstrom-Sensoranordnung ist abhängig von der Winkelstellung zwischen der Anordnung Erregerspule – Meßspule in Bezug zu der Fehlerorientierung. In Abbildung 6.11 sind exemplarisch einzelne Wirbelstrom 2D-Darstellungen für abweichende Winkelstellungen von 0° , 45° und 90° dargestellt. Die Anordnung der Erreger- und Meßspule in Bezug zu der Ausrichtung der Werkstofftrennung ist in Bild 6.12 schematisch dargestellt. Die Position der Werkstofftrennung innerhalb des Meßgebietes ist in der Darstellung markiert. Die Einzelkomponenten in Vorschubrichtung im Mittenbereich der Werkstofftrennung sind an der Position der weißen Strichpunktlinie als Wegdarstellung unterhalb der 2D-Bilder präsentiert. In den Wirbelstrom 2D-Darstellungen ist anschaulich der große Einfluß der Winkelstellung auf das Abbildungsverhalten der Werkstofftrennung erkennbar.

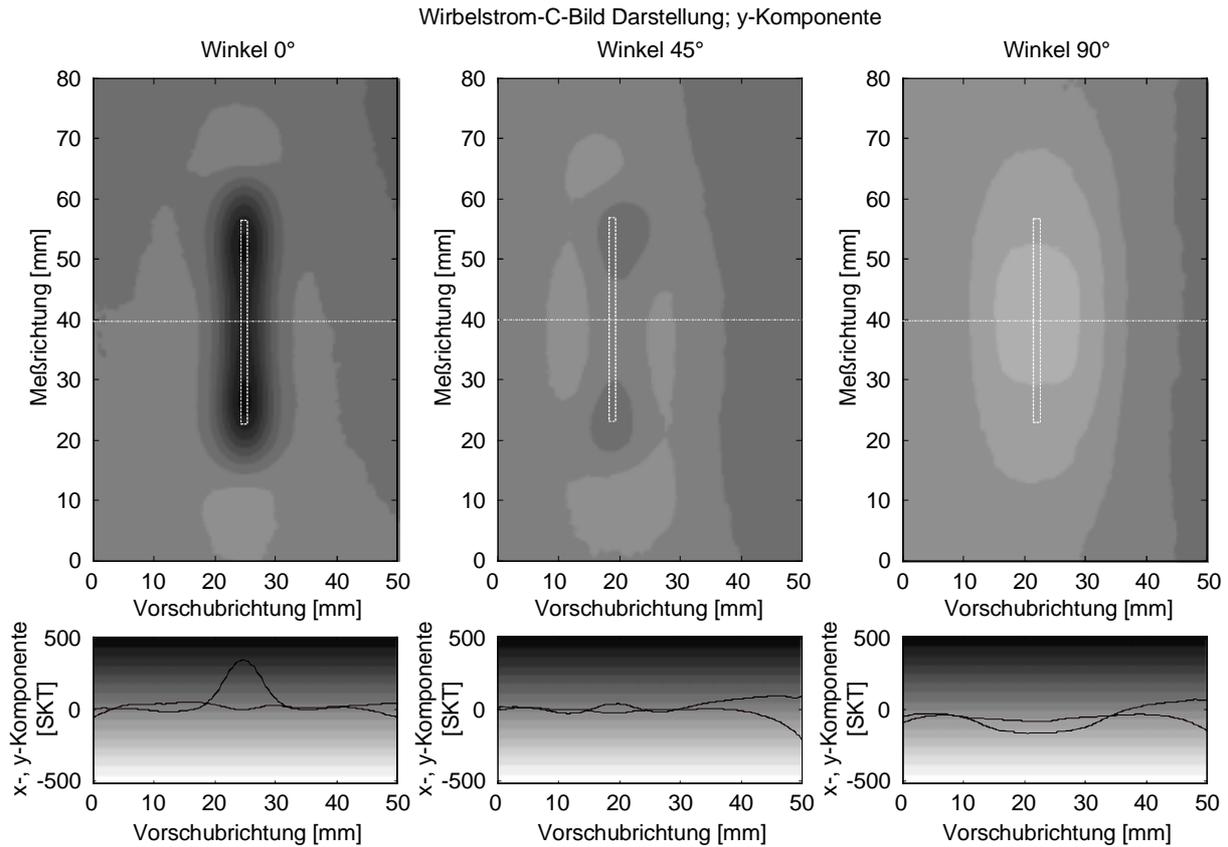


Bild 6.11: Wirbelstrom-Signalabbildung für Winkelstellungen von 0° , 45° , 90° ,
abweichend zur maximalen Empfindlichkeitsrichtung
Werkstoff: 1.4550, Dicke: 6mm, Fehlertiefe: 33%, Meßfrequenz: 2300Hz

Die höchste Meßempfindlichkeit wird bei einer parallelen Ausrichtung des Wirbelstromsensors ohne Winkelabweichung erreicht. Die flächige Darstellung in dem Wirbelstrom 2D-Bild ergibt für diese Winkelstellung eine Abbildung, die aufgrund des Längen – Breitenverhältnisses der Signalausbildung den Charakter des Längsrisses in Meßrichtung wiedergibt. Bei einer Winkelabweichung von 45° in Bezug zu der Fehlerausrichtung zerfällt der Eindruck in eine symmetrische Abbildung von jeweils vier Minima- und zwei Maximalwerten rechts- und linksseitig von der Rißgeometrie. Wird die Sonde mit einer Winkelabweichung von 90° über die Werkstofftrennung geführt, so ergibt sich wiederum eine gleichförmige flächige Abbildung. Jedoch ist der visuelle Eindruck eines schmalen Längsrisses nicht vorhanden. Zudem ergibt sich eine negative Werteänderung der Signalkomponente, die zunächst nicht zu dem Rückschluß auf eine rißartige Werkstofftrennung führt.

Die Änderung der Einzelkomponenten als Funktion der Winkelstellung von 0° bis 180° sind in Bild 6.12 gezeigt. Entsprechend den Konturdarstellungen, verringern sich die x- und y-Komponenten mit zunehmender Winkelstellung zwischen der Fehler- und Sondenorientierung. Durch die gewählten Prüfbedingungen und Geräteeinstellungen wird die Signaländerung in der y-Komponente abgebildet. Die geringsten Wirbelstromkomponenten werden

bei einer Winkelstellung von 90° erreicht. Wird die Winkelstellung über 90° hinaus verändert, vergrößern sich die Signalkomponenten wieder.

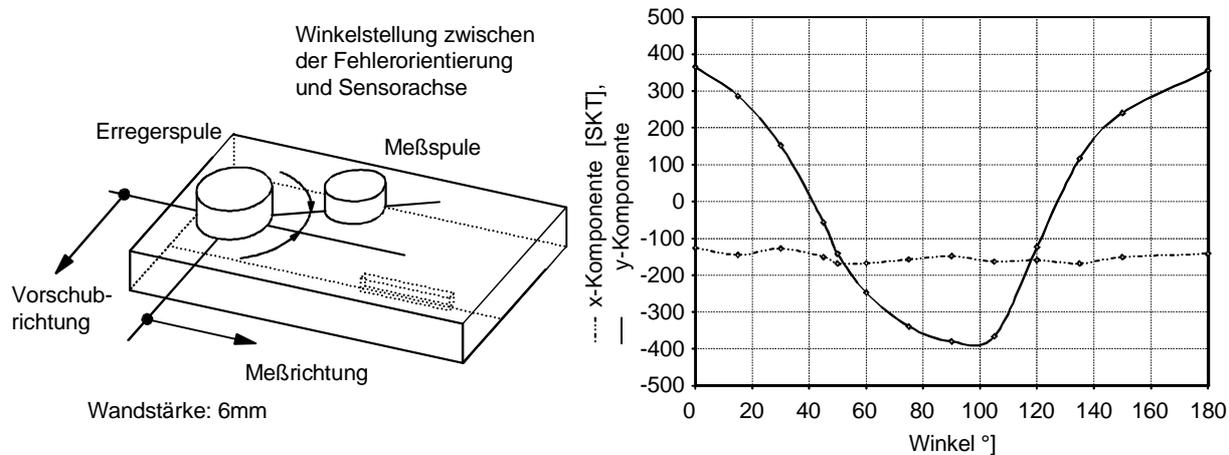


Bild 6.12: Änderung der Wirbelstromkomponenten in Abhängigkeit des einschließenden Winkels zwischen Sensorausrichtung und Orientierung der Werkstofftrennung

6.5 **Schlußfolgerungen aus den experimentellen Untersuchungen zur Signalausaltung**

Die Anwendung der Wirbelstrom 2D-Bild Darstellung und der anschließenden Off-Line Signalanalyse ermöglicht eine erweiterte Charakterisierung der Meßsignale. Die Kennwerte der Fehlersignal-Amplitude und der Fehlersignal-Phase sind zur qualitativen Charakterisierung des Meßsignals eingesetzt worden. Damit sind systematische Zusammenhänge zwischen der Prüffrequenz und dem Aufbau des Wirbelstromsensors auf die Ausbildung der Wirbelstromsignale analysiert.

Aus der Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Fehlersignal-Amplitude und der Fehlersignal-Phase zu der berechneten Wirbelstromdichte und der Wirbelstromphase im Werkstoff in Abhängigkeit der Prüffrequenz ergeben sich vergleichbare Zusammenhänge. Daher können die erwarteten Zusammenhänge bei der Signalausaltung in Abhängigkeit der Prüfbedingungen auch aus den Ergebnissen der numerischen Feldberechnung erfolgen, obwohl die Berechnungen nur die Felddarstellungen ohne den Einfluß von Werkstofftrennungen widerspiegeln.

Planparallele Abstandsänderungen zeigen einen nur geringen Einfluß auf die Ausbildung der Wirbelstromsignale und die Prüfempfindlichkeit. Bei einem Abstand von 2mm zur Oberfläche reduziert sich die Fehlersignal-Amplitude um weniger als 1/3 des Maximalwertes im Vergleich zu der Signalausaltung bei aufgesetzter Meßspulenanordnung.

Die Signifikanz, mit der sich eine Werkstofftrennung in der 2D-Bild-Darstellung abbildet, wird wesentlich von den gewählten Prüfbedingungen und dem Sensoraufbau bestimmt. Die systematische Erfassung der Abbildungseigenschaften in Abhängigkeit der Prüfbedingungen

und dem Sensoraufbau bildet die Voraussetzung zur Anwendung der 2D-Bild-Darstellung bei der Interpretation von Wirbelstromsignalausbildungen im Prüfeinsatz.

Durch die ausgesprochene Richtungsabhängigkeit der untersuchten Sensortechnik wird die Genauigkeit, mit der die geometrische Abmessung einer Werkstofftrennung innerhalb des Meßgebietes abgeschätzt werden kann, von der Ausrichtung des Sensors zur Orientierung der Werkstofftrennung bestimmt. Bei der Entwicklung eines Prüfkonzeptes ist die Richtungsabhängigkeit der Sensorsysteme zu berücksichtigen.

Grundsätzlich ist die Eignung eines Wirbelstromsensorsystems abhängig von der Möglichkeit, Informationen über Werkstofftrennungen und Störsignale zu unterscheiden. Störeinflüsse sind bei der bisherigen systematischen Erfassung der Signalausbildung in Abhängigkeit der Prüfbedingungen nicht berücksichtigt worden. Zur Optimierung der Sensortechnik sind alle bekannten Ursachen für Signalstörungen umfassend zu berücksichtigen, um deren Einfluß auf die Signalausbildung zu erkennen und zu minimieren. Hierfür ist eine prüf-aufgabenangepaßte Optimierungstrategie zu entwickeln, die auch Störgrößen berücksichtigt.

6.6 Anpassung der Sensorgestaltung und der Prüfparameter an die Prüfaufgabe

Zur Detektion von verdeckten Werkstofftrennungen muß eine hohe Meßempfindlichkeit durch die Anpassung der Sensortechnik erzielt werden. Infolgedessen werden Lift-Off Effekte und Veränderungen in den elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften ebenfalls empfindlich erfaßt. Daher sind diese Störsignalanteile zu minimieren und von Indikationen durch verdeckte Werkstofftrennungen zu unterscheiden.

Lift-Off Effekte der Wirbelstromsignale in der Impedanzebene resultieren aus den Verfahrbewegungen über die sphärisch gekrümmte Oberfläche der Rohrbögen. Hierbei ändert sich die Winkelstellung der Erreger- und der Meßspule zueinander. Diese Lift-Off Effekte mit einer geringen Signaldynamik überlagern sich mit den Lift-Off Effekten durch lokale Störungen in der Oberflächenkontur der Rohrbögen durch Schleifstellen.

Innerhalb eines Rohrbogens werden durch die unterschiedlichen plastischen Werkstoffverformungen in den neutralen Fasern, in der Druck- und Zugzone geringe Änderungen in den elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften verursacht. Hierdurch wird der Arbeitspunkt des Wirbelstromsignals beeinflusst, wobei diese Signaländerung mit einer geringen Signaldynamik bei dem Überfahren der unterschiedlichen Bogenbereiche erfolgt. Diese Arbeitspunktänderungen werden überlagert von Signalausbildungen mit hoher Signaldynamik durch lokale ferromagnetische Werkstoffbereiche von Schlag- oder Kratzstellen auf der Rohrbogen-Außenoberfläche.

Werkstofftrennungen in der Rohrbogen-Innenoberfläche führen zu einer Signalausbildung mit einer hohen Signaldynamik. Durch eine angepaßte Signalverarbeitung sind diese Signaländerungen von denen mit geringer Signaldynamik zu trennen.

Bei der Durchführung der Optimierung sind teilweise widersprüchliche Forderungen miteinander zu verbinden. So sind beispielsweise möglichst hohe Feldstärken aufzuprägen, um eine hohe Nachweistiefe zu erreichen. Hierfür sind große Erregerspulen zu verwenden. Gleichzeitig muß eine hohe Ortsauflösung realisiert werden, welche sich bei der Anwendung von großen Spulensystemen jedoch verringert. Zudem ist die Baugröße der Sensorsysteme zu beschränken, um die Sonden über die sphärisch gekrümmte Oberfläche führen zu können. Daher ist das Sensorsystem in kompakter Bauweise auszuführen.

6.6.1 Unterscheidung von WS-Signalen durch Lift-Off Effekte und verdeckte Werkstofftrennungen

Die Trennung von Fehlersignalen und Lift-Off Effekten wird erreicht durch die Wahl einer geeigneten Erregerfrequenz. Entsprechend der Frequenzabhängigkeit der Feldverteilungen im Werkstoff, wird eine Phasenselektion der Wirbelstromkomponenten in der Impedanzebene erreicht. Die gezielte Modulierung der Feldverteilungen im Werkstoff wird entsprechend den Ergebnissen der numerischen Feldberechnungen unterstützt durch die Kombination unterschiedlicher ferromagnetischer und elektrisch leitfähiger Werkstoffe für die Abschirmungen der Erreger- und der Meßspule.

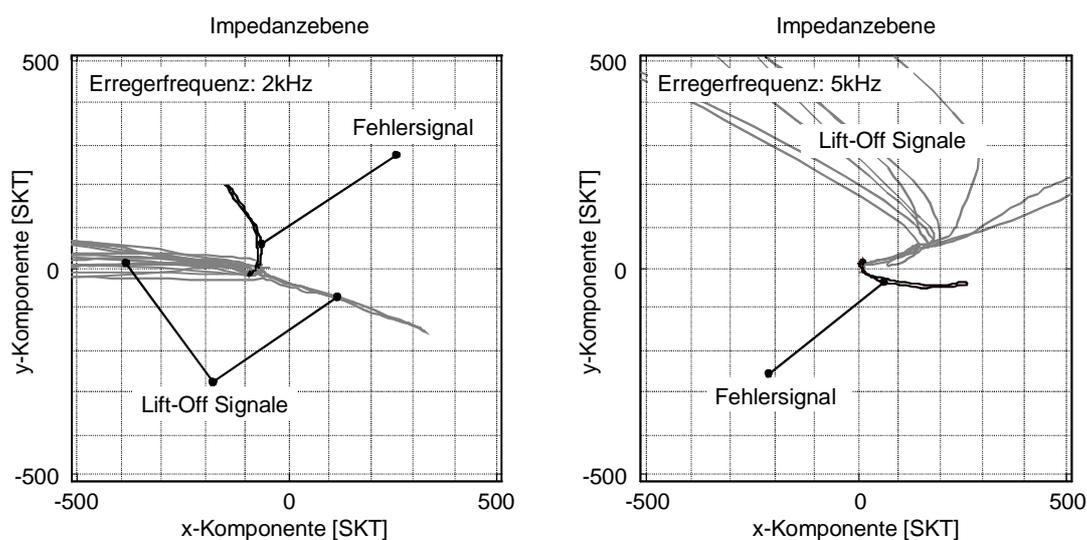


Bild 6.13: Phasenselektion zwischen Nutz- und Störsignal in Abhängigkeit der Erregerfrequenz

In Bild 6.13 sind beispielhaft das Fehlersignal einer verdeckten Werkstofftrennung und unterschiedliche Abhebesignale der Erreger- und der Meßspule gezeigt. Dabei sind jeweils die Erreger- und die Meßspule getrennt gegeneinander verkippt. In der linken Bildhälfte ist durch die Wahl der Abschirmwerkstoffe und einer geeigneten Erregerfrequenz eine eindeutige Phasentrennung zwischen dem Fehlersignal und den Lift-Off Signalen gegeben. Die Lift-Off Signale werden überwiegend in der x-Komponente abgebildet. Das Fehlersignal steht annähernd rechtwinklig zu den ausgebildeten Störsignalen. In der flächigen 2D-Bild Darstellung wird das Fehlersignal – bzw. Nutzsinal nun in der y-Komponente abgebildet.

In der rechten Bildhälfte ist die Signalausbildung für eine ungünstige Kombination der Prüfbedingungen gezeigt. Die Abhebesignale fächern sich in der Impedanzebene auf und überlagern das ausgebildete Fehlersignal. In der Impedanzebene und in der flächigen Darstellung der x- und der y-Komponente ist das Fehlersignal nicht unterscheidbar von Lift-Off Signalen.

6.6.2 Unterscheidung der WS-Signale von Rohr-Außenfehlern und Rohr-Innenfehlern

Damit eine Unterscheidung zwischen Wirbelstromindikationen von der Rohr-Außen- und Rohr-Innenoberfläche erreicht wird, muß experimentell eine Anordnung für die Erreger- und die Meßspule gefunden werden, mit deren Signalausbildung eine Fehlertiefenanalyse durchführbar ist.

Die Phasenausbildung der Wirbelstromsignale für unterschiedliche Fehlertiefen wird durch die verschiedenen Phasenlagen der Feldausbildung bei der Wechselwirkung mit dem Werkstoff bestimmt. Zur Unterscheidung von Rohr-Außen- und Rohr-Innen-Fehlern ist eine Ortsposition der Meßspule relativ zur Erreger- und Meßspule zu ermitteln, an der hierfür geeignete Feldverhältnisse vorliegen. Folglich sind experimentell die Ausbildungen von Fehler- und Oberflächensignalen für unterschiedliche Erregerfrequenzen in Abhängigkeit der Position der Meßspule aufzunehmen und hinsichtlich der Möglichkeit der Signalunterscheidung zu untersuchen.

Die Gradienten in der Feldausbildung in Abhängigkeit des Abstandes zu der Erreger- und Meßspule führen zu erheblichen Größenunterschieden in den Induktionsspannungen der Meßspule, welches den Vergleich der ausgebildeten Fehlersignal-Amplitude und -Phase für unterschiedliche Sensoranordnungen erheblich erschwert. Durch Relativierung der Fehlersignal-Amplitude in Bezug zu der Signalausbildung für den Vergleichsfehler mit einer Tiefe von 20% können die Fehlersignal-Amplituden für unterschiedliche Spulenanordnungen miteinander verglichen werden. Die nachträgliche Phasendrehung des Wirbelstromsignals mit einer Tiefe von 20% auf eine Bezugs-Phasenausbildung von 90° ermöglicht den Vergleich der Fehlersignal-Phase in Bezug zu dem Signalausbildungen für die unterschiedlichen Testfehlertiefen.

In Bild 6.14 sind die bezogenen Signalkennwerte für die Rohr-Innenfehler mit Fehlertiefen von 10%, 20% 30% und 40% und einer Beule als Beispiel für einen Rohr-Außenfehler in Abhängigkeit des Spulen-Mittenabstandes zwischen der Erreger- und der Meßspule gezeigt.

In der linken Bildhälfte ist die relative Fehlersignal-Phase wiedergegeben. Mit zunehmendem Abstand zwischen den Spulen verringert sich die Phasenabstand zwischen dem Oberflächenfehler und den Rohr-Innenfehlern. In einem Abstand von ca. 47mm ergibt sich bei der gewählten Prüffrequenz ein Phasenabstand von 90° zwischen dem Vergleichsfehler und dem Oberflächenfehler. Für diesen Spulenmittenabstand und bei der gewählten Erregerfrequenz

bilden sich die Signale des Vergleichsfehlers und des Rohr-Außenfehlers in der Impedanzebene senkrecht stehend zueinander aus.

In der rechten Bildhälfte ist die relative Fehlersignal-Amplitude in Abhängigkeit des Spulen-Mittenabstandes gezeigt. In der Darstellung ist die stetige Abnahme der Signalverhältnisse zwischen dem Vergleichsfehler und dem Oberflächenfehler zu erkennen. Bei einem Abstand von 37mm unterschreiten die Signale die Größenausbildung des Vergleichsfehlers. Hierdurch wird eine Minimierung der Fehlersignal-Amplitude durch Oberflächenfehler im Vergleich zu den Signalen der Rohr-Innenfehler verwirklicht.

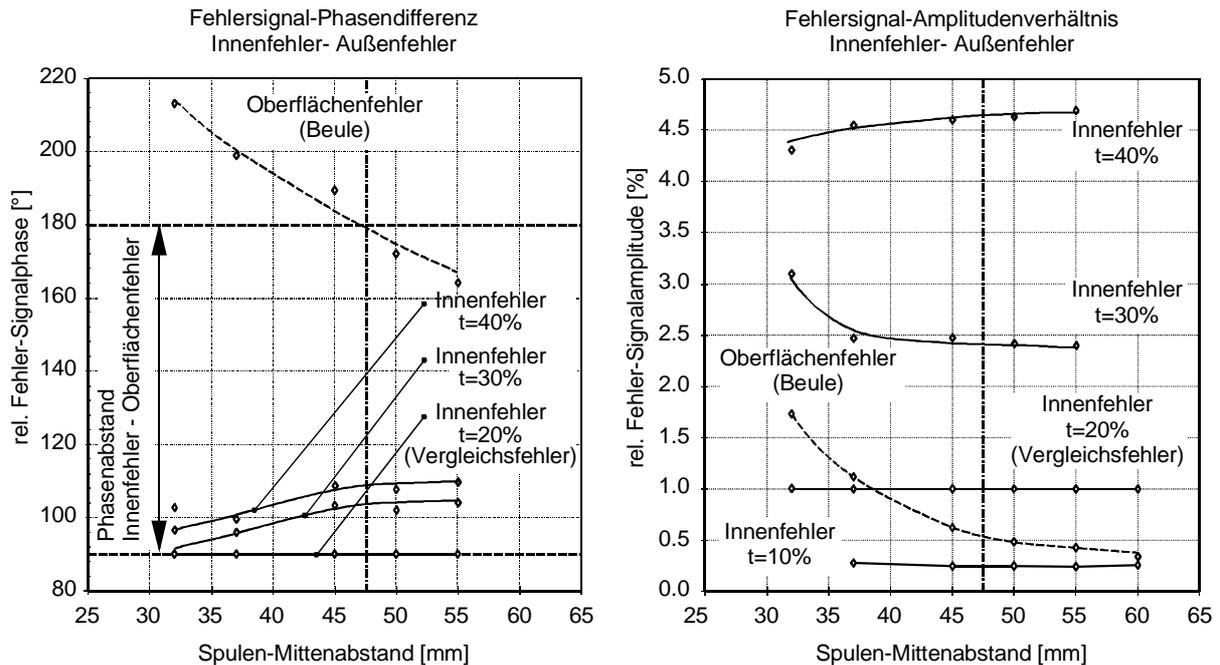


Bild 6.14: Phasentrennung zwischen Nutz- und Störsignal in Abhängigkeit des Spulen-Mittenabstands, Erregerfrequenz $f=2133\text{Hz}$

Um eine optimierte Spulenordnung zu entwickeln, ist dieser Zusammenhang für unterschiedliche Erregerfrequenzen und Spulen-Mittenabstände durchzuführen. Die Anzahl der Messungen bestimmt hierbei den Grad der Optimierung der Spulenordnung, mit der eine Fehlertiefenanalysen und damit eine Unterscheidung von Rohr-Außen- und Rohr-Innenfehler erreicht wird.

6.6.3 Erweiterte Signalanalyse zur Differenzierung zwischen WS-Signalen durch Werkstofftrennungen und durch ferromagnetische Werkstoffinhomogenitäten

Entsprechend der Neigung des metastabilen austenitischen Werkstoffes, ferromagnetische Phasenanteile auszubilden, muß die Wirbelstrom-Prüftechnik gewährleisten, Signale durch Werkstofftrennungen und ferromagnetischen Phasenanteilen zu unterscheiden. Ferromagnetische Phasenanteile führen zu einer Erhöhung der Permeabilität bei gleichzeitiger Zunahme charakteristischer Hystereseeigenschaften während der Magnetisierung des Werkstoffes.

Bei der Anwendung der Wirbelstromprüfung in Gegenwart von ferromagnetischem Werkstoff wird das aufgeprägte Wechselfeld durch die Hystereseeigenschaften der Magnetisierungskennlinien verzerrt /Feiste 1995/. Entsprechend Bild 6.15 erfährt das sinusförmige äußere Erregerfeld durch die ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften eine nichtlineare feldstärkeabhängige Modulation. In der linken Bildhälfte ist zunächst der monofrequente, sinusförmige Verlauf des Erregersignals gezeigt. Durch die magnetische Hysterese wird der Zusammenhang zwischen dem aufgeprägtem Magnetfeld $H(t)$ und der Ausbildung des magnetischen Flusses $B(t)$ innerhalb des ferromagnetischen Werkstoffes wiedergegeben. Der phasenverschobene und verzerrte zeitliche Verlauf des magnetischen Flusses $B(t)$ ist in der rechten Bildhälfte abgebildet. Aufgrund der durchlaufenen Hysterese bilden sich bei ferromagnetischen Werkstoffen höherfrequente Oberwellenanteile in den Empfängersignalen der Meßspule aus.

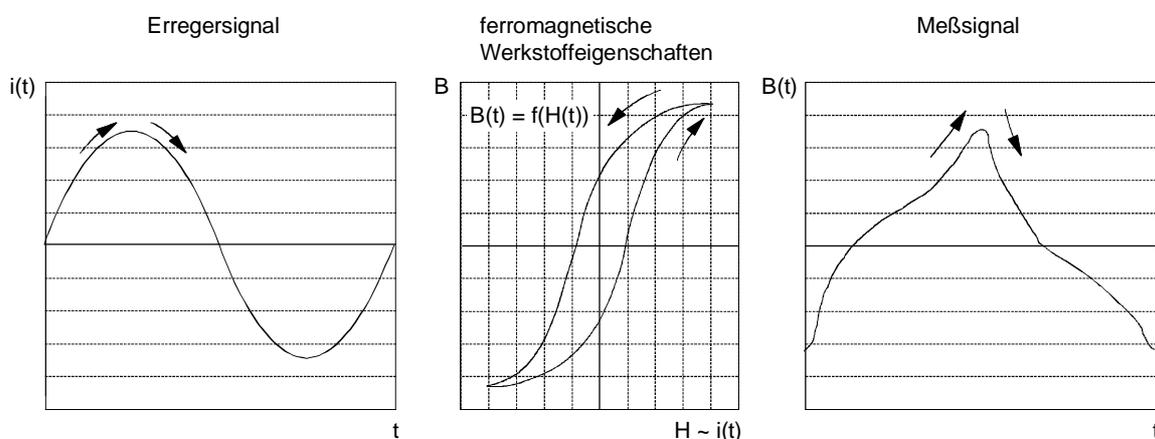


Bild 6.15: Schematische Darstellung der nichtlinearen Signalverzerrung durch ferromagnetische Werkstoffeigenschaften

Das verzerrte Meßsignal kann als Fourierreihenentwicklung in ungradzahlige gegeneinander phasenverschobene höherharmonische Signalanteile zerlegt werden. Durch diese Frequenzanalyse des Meßsignals werden die Oberwellen der höherfrequenten Signalanteile bestimmt. Die Darstellung der einzelnen Koeffizienten kann als Amplituden- und Phasenwerte oder als komplexe Wertedarstellung erfolgen. In Bild 6.16 ist schematisch die Darstellung der Signalausbildung im Frequenzbereich für das monofrequente Erregersignal und das modulierte Meßsignal durch ferromagnetische Werkstoffanteile gezeigt. Durch die Ausbildung der Oberwellen werden somit ferromagnetische Werkstoffanteile in den Rohrbögen identifiziert und charakterisiert.

Bei der Umformung des metastabilen austenitischen Werkstoffes induziert der Biegevorgang, entsprechend den unterschiedlichen plastischen Verformungsgraden im Bereich der Zug-, Druck- und neutralen Fasern, in Rohr-Umfangsrichtung unterschiedlich hohe Anteile von ferromagnetischen Phasenanteilen durch die α' -Martensitumwandlung. In Rohr-Längsrichtung ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung von ferromagnetischem Werkstoffgefüge.

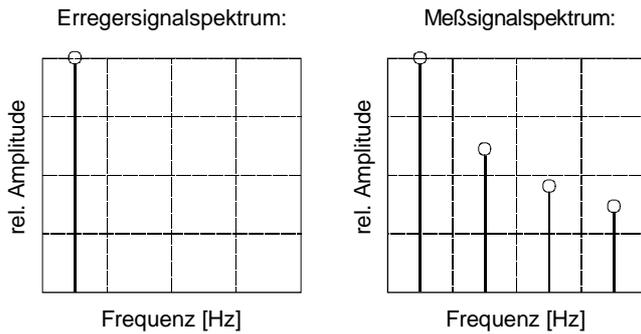


Bild 6.16: Schematische Darstellung des Erreger- und des Meßsignals im Frequenzbereich für ferromagnetische Werkstoffe

verformung am größten. Infolgedessen ist ebenfalls in diesem Bereich die Ausbildung der ferromagnetischen Phasenanteile am größten. In der Zugzone ist aufgrund der Spannungsverteilung bei dem Biegevorgang ebenfalls eine Erhöhung der ferromagnetischen Phasenanteile zu erkennen.

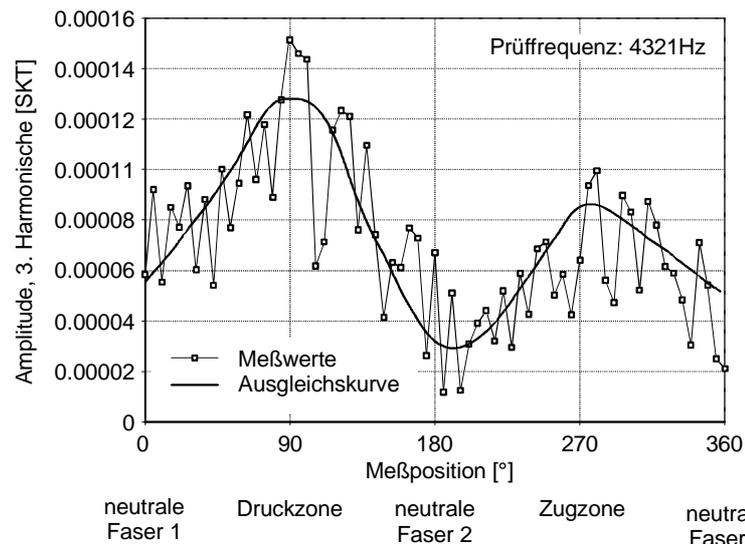
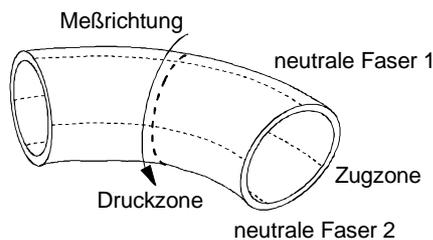


Bild 6.17: Änderung der magnetischen Werkstoffeigenschaften in Rohr-Umfangsrichtung

Im Anschluß an den Umformvorgang erfolgt eine Nachbearbeitung der Rohrbögen. Hierbei wird die Zunderschicht durch Schleif- und Polierarbeiten an der Außenoberfläche entfernt. Bei der Handhabung der Rohrbögen durch Spannwerkzeuge und Auflagepunkte entstehen Schlagstellen mit örtlich begrenzten, jedoch sehr hohen plastischen Werkstoffverformungen im Oberflächenbereich. Diese lokalen Werkstoffbereiche zeigen eine ausgeprägte Bildung von α' -Martensit mit örtlich erhöhten ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften gegenüber dem Grundwerkstoff. Bei dem Überfahren dieser Bereiche mit der Erreger- und der Meßspule bilden sich Wirbelstromsignale aus, deren Phasenwerte auf eine Werkstofftrennung verweisen können. Eine Unterscheidung zwischen lokalen oberflächigen ferromagnetischen Werkstoffbereichen und Werkstofftrennungen ist anhand der Wirbelstromsignalausbildung nicht

möglich. Daher wird das Signal der Meßspule parallel zu der Wirbelstromsignal demodulation auf die Entstehung von lokal erhöhten Oberwellenanteilen analysiert.

Die Auswertung der harmonischen Signale erfolgt in gleicher Weise wie die Signalauswertung der Wirbelstromindikationen mit Hilfe der Wirbelstrom 2D-Bild Darstellung. In der linken Hälfte von Bild 6.18 sind die Signalausbildungen für einen simulierten örtlichen ferromagnetischen Werkstoffbereich auf der Außenoberfläche gezeigt. Das zugehörige Wirbelstromsignal in der Impedanzebene weist auf einen Signalanteil in der y-Komponente hin. Damit besteht die Möglichkeit einer Fehlinterpretation des Signals als verdeckte Werkstofftrennung. Im Vergleich hierzu sind in der rechten Bildhälfte das Wirbelstromsignal und das Signal der 3. Oberwelle einer Werkstofftrennung mit einer Tiefe von 30% dargestellt.

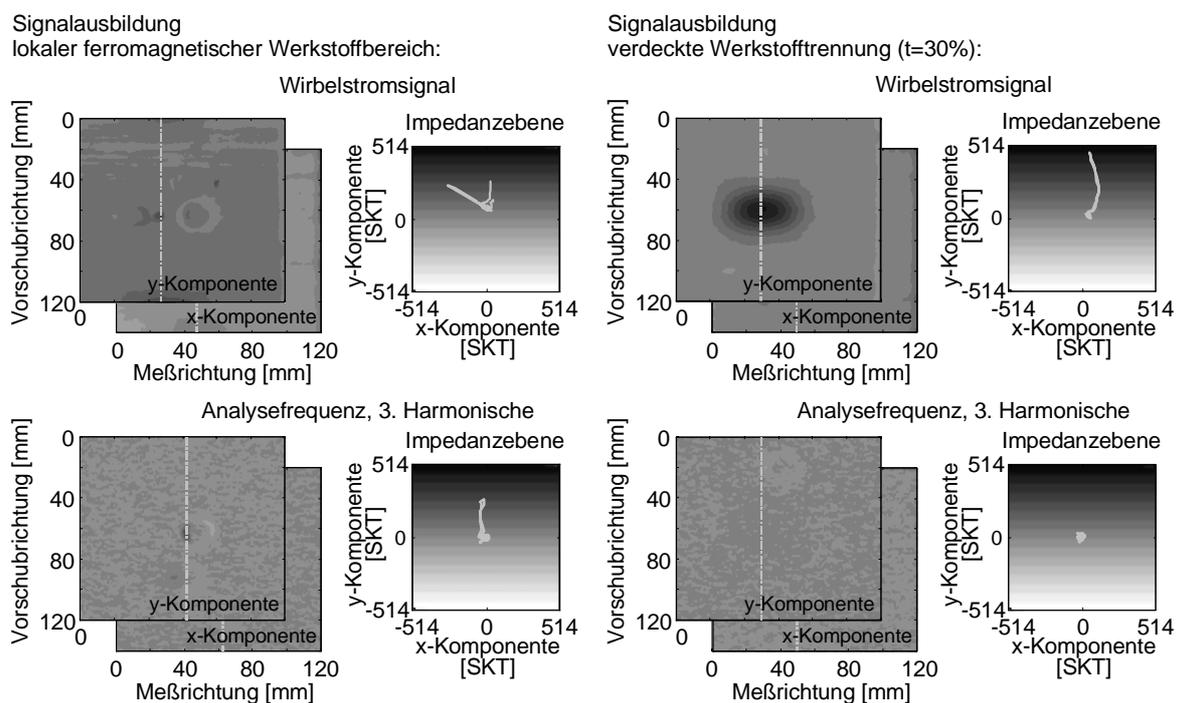


Bild 6.18: Trennung von Wirbelstromindikationen aufgrund von ferromagnetischen Werkstoffbereichen und Werkstofftrennungen

In dem unteren Teil der Darstellung ist die Ausbildung der 3. Harmonischen als 2D-Bild wiedergegeben. Die Verlagerung des Arbeitspunktes für die Analysefrequenz der 3. Harmonischen in der Impedanzebene indiziert eindeutig die lokale Gefügeveränderung durch ferromagnetischen Werkstoff im Oberflächenbereich. Im Vergleich hierzu zeigt die Analysefrequenz der 3. Harmonischen keine Signalverlagerung in der Impedanzebene für die Werkstofftrennung.

Durch diesen logischen Vergleich der Signalausbildung einer lokalen ferromagnetischen Gefügeausbildung und einer Werkstofftrennung in den Impedanzebenen des Wirbelstromsignals und die Analysefrequenz der 3. Harmonischen ist die eindeutige Signalanalyse zur Differenzierung zwischen Wirbelstromsignalen durch Werkstofftrennungen und ferromagnetische Werkstoffinhomogenitäten gegeben /Weber 2000/.

6.7 Wirbelstrommessungen an Prüfkörpern mit Testfehlergeometrien

Die Charakterisierung von Signalausbildungen der angepassten Fernfeld-Wirbelstromsensoren erfolgt durch Messungen an Kalibrier-Testkörpern mit künstlichen Fehlergeometrien auf der Rohr-Innenoberfläche, im Werkstoffvolumen und auf der Rohr-Außenoberfläche.

Bild 6.19 zeigt die flächige Wirbelstrom-Signaldarstellung für Innen-Längsfehler und Störstellen auf der Rohr-Außenoberfläche.

- Rohr-Testkörper mit Längsfehlern:
 - Fehlertiefe: 10%, 20%, 30%, 40%
 - Fehlerbasislänge: 20mm
 - Rohrwandstärke: 20.3mm

Die Zuordnung der Grauwertabstufungen in der flächigen Signalansicht zu den Signalgrößen ist in der Einzelsignaldarstellung in Rohr-Umfangsrichtung wiedergegeben. Mit dem entwickelten Fernfeld-Wirbelstrom Sensorsystem sind unter Verwendung optimierter Prüfparameter die Innen-Längsfehler mit einer Fehlertiefe von 20% durch eine Fehlerprüfung von der Außenoberfläche eindeutig nachweisbar. Auch der 10% Innenfehler zeichnet sich mit einem Grauwertwechsel und der 20% Diagonalfehler durch zwei Grauwertstufen in der Abbildung ab. Störsignalanteile aufgrund von Schlag- und Schleifstellen werden durch die Phasenselektion der Wirbelstromkomponenten nicht in dem Nutzsinal wiedergegeben.

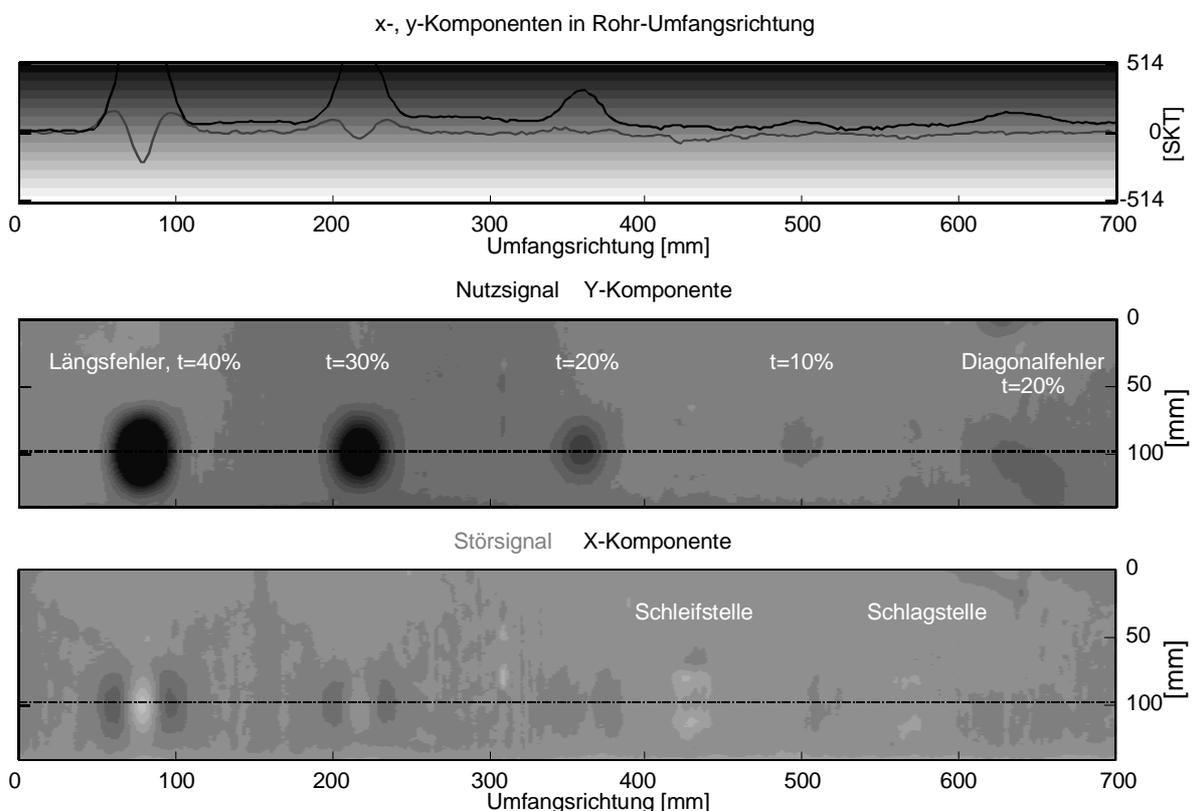


Bild 6.19: Flächige Darstellung von Wirbelstromsignalen, Rohr-Testkörper mit Innen-Längsfehlern und Störstellen auf der Rohr-Außenoberfläche

Die geringe Empfindlichkeit des Meßsystems auf Störeffekte wie Lift-Off oder Beulen in der Nutzsinal-Komponente wird durch Messungen an einem Rohr-Testkörper mit eingeschliffenen Beulen bestätigt. In Bild 6.20 sind die Signalausbildungen der Rohr-Außenfehler in der Störkomponente gezeigt. Nur die Ausbildung der Signale einer relativ großen Beule mit einem Werkstoffabtrag von 1mm zeigt sich geringfügig in dem Nutzsinal.

- Rohr-Testkörper mit Beulen:
 - Fehlertiefe: 0.3, 0.6, 0.7, 1.0mm
 - Rohrwandstärke: 20.3mm

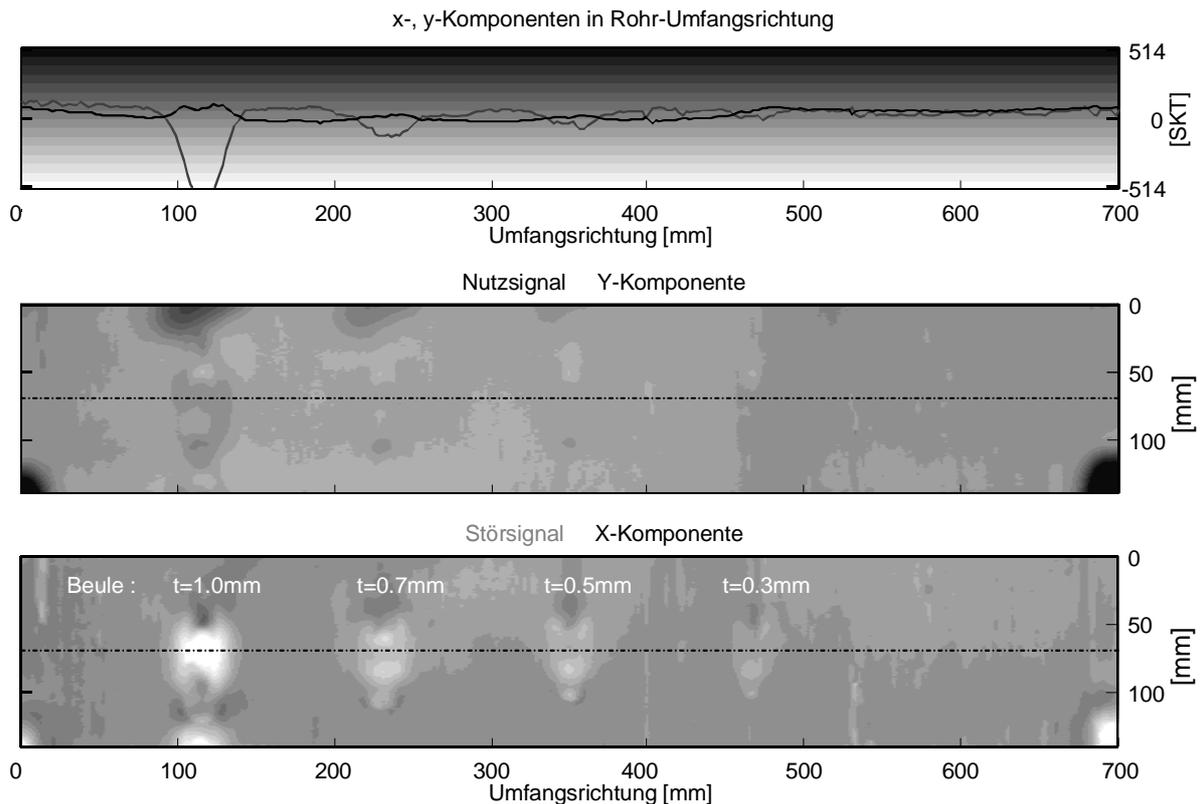


Bild 6.20: Flächige Darstellung von Wirbelstromsignalen, Rohr-Testkörper mit Außenfehler-Beulen und Innen-Diagonalfehlern

Entsprechend der Richtungsabhängigkeit des Sensorsystems werden Diagonalfehler mit einer verringerten Signalausbildung wiedergegeben. Bild 6.21 veranschaulicht die Abnahme der Signalgrößen der Innenfehlergeometrien im Vergleich zu den Signalausbildungen bei idealen Winkelbedingungen in Bild 6.19. Dennoch bilden sich die Diagonalfehler mit ausreichenden Signalgrößen im Nutzsinal ab, um identifiziert zu werden.

- Rohr-Testkörper mit Diagonalfehlern:
 - Fehlertiefe: 10%, 20%, 30%, 40%
 - Fehlerbasislänge: 20mm
 - Orientierung: 45°
 - Rohrwandstärke: 20.3mm

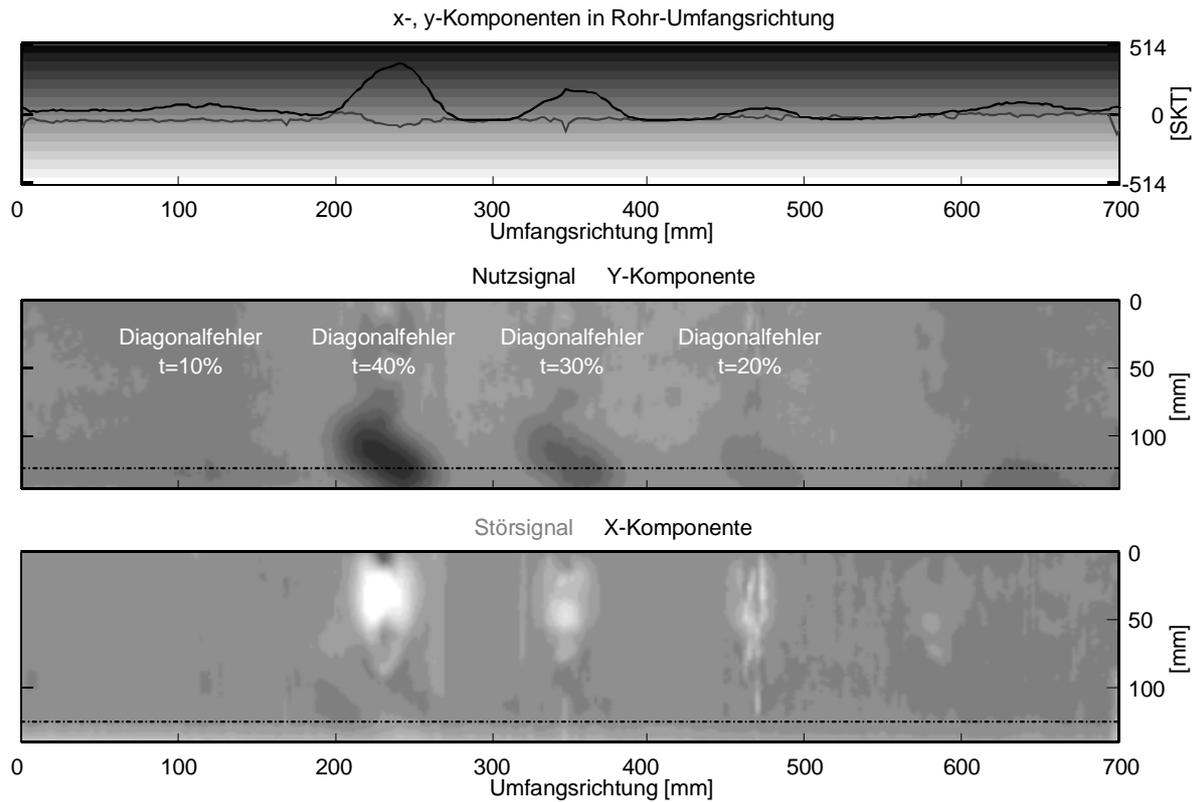


Bild 6.21: Flächige Darstellung von Wirbelstromsignalen, Rohr-Testkörper mit Innen-Diagonalfehlern und Außenfehler-Beulen

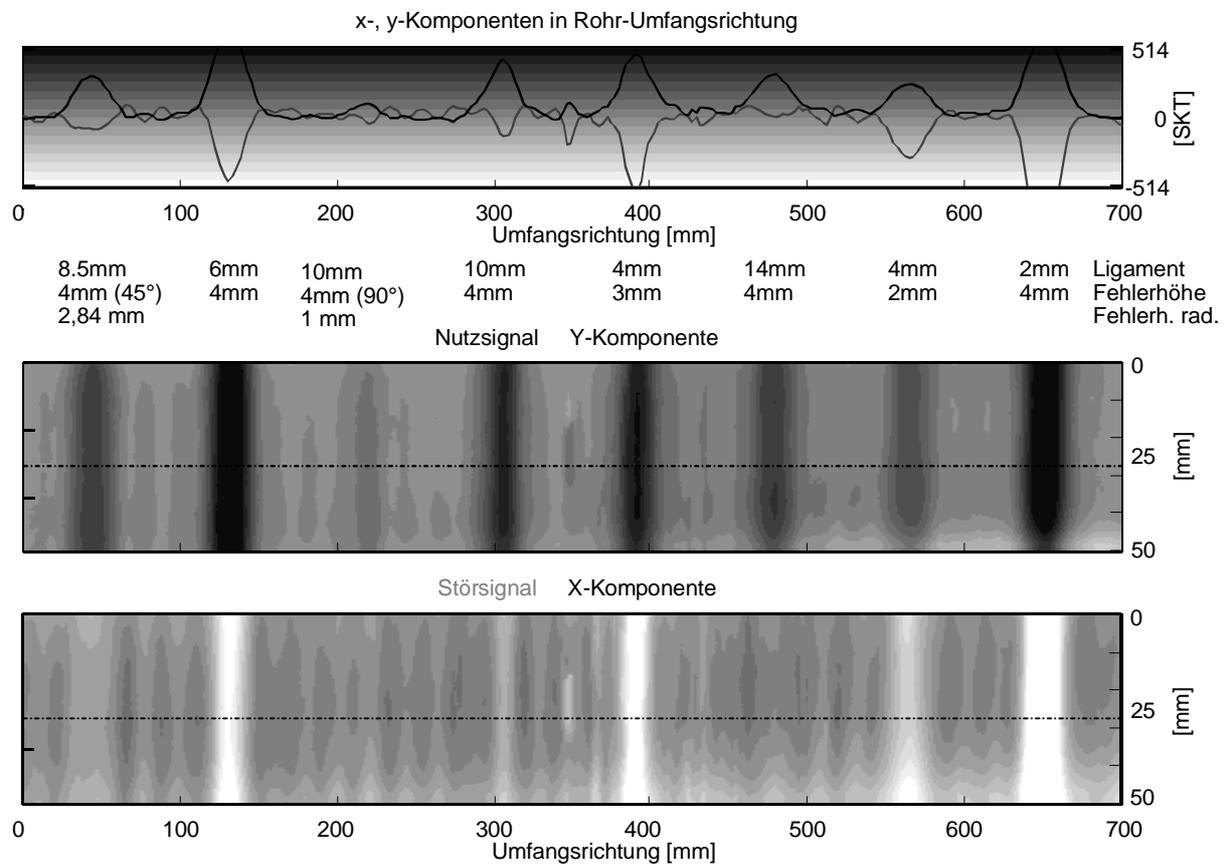


Bild 6.22: Flächige Darstellung von Wirbelstromsignalen, Rohr-Testkörper mit eingeschlossenen Fehlern

Eine weitere Fehlerklasse neben den Innen- und Außenfehlern sind sogenannte eingeschlossene Fehler, welche weder zur Innen- oder Außenoberfläche der Rohrwand durchgängig sind. Die in einen Rohrabschnitt in unterschiedlichen Tiefenlagen eingebrachten Testfehler mit verschiedenen Fehlerausbildungen sind entsprechend Bild 6.22 empfindlich nachweisbar.

- Rohr-Testkörper mit eingeschlossenen Fehlern

Ligament:	2...14mm	Fehlerhöhe radial:	1...4mm
Fehlerhöhe:	2...6mm	Fehlerlänge axial:	150mm
Rohrwandstärke s:	20.3mm		

In Bild 6.23 sind zusammenfassend die Wirbelstromindikationen in der Impedanzebene für jeweils eine der drei Fehlergruppen gezeigt. Aus der Darstellung wird ersichtlich, daß sich die Fehlertiefenlage innerhalb der Rohrwandung im wesentlichen in der Phasenlage der Signale abbildet. Mit zunehmendem Ligament erfolgt eine Phasendrehung von 90° im Uhrzeigersinn von Oberflächenfehlern zu Rohr-Innenfehlern. Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage zur Entwicklung eines Bewertungskonzeptes für die Wirbelstrom-Signalausbildungen.

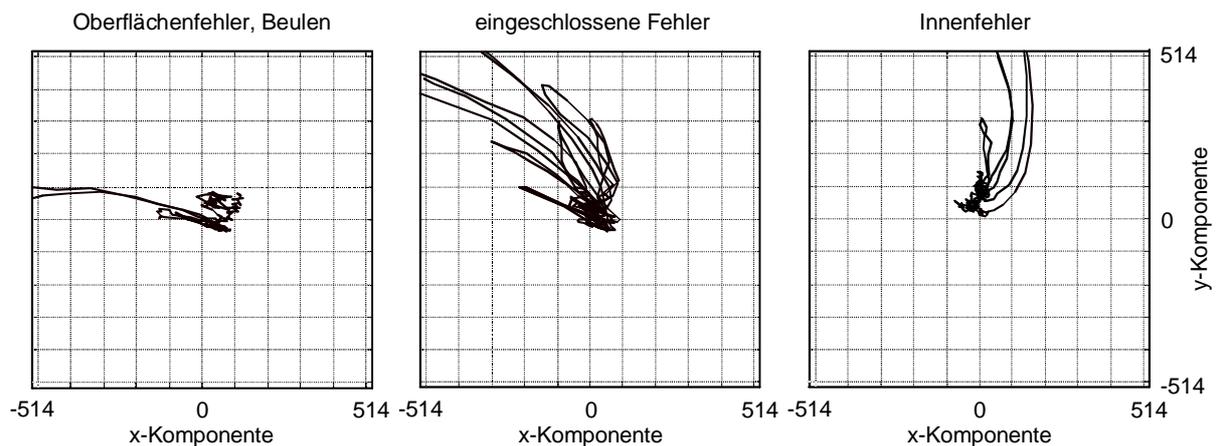


Bild 6.23: Wirbelstromindikationen für die Fehlergruppen Rohr-Außenfehler, eingeschlossene Fehler und Rohr-Innenfehler

Die flächigen Darstellungen der Wirbelstromsignalausbildungen dokumentieren, daß der entwickelte Wirbelstromsensor die gestellten Anforderungen der Prüfaufgabe erfüllt. Werkstofftrennungen mit einer Tiefe von 20% verursachen eine ausreichende Störung der Wirbelstromverteilungen im Werkstoff, um sicher im austenitischen Grundwerkstoff mit einer Wandstärke von 20.3mm erkannt zu werden. Die Werkstofftrennung mit einer Tiefe von 10% stellt die geforderte Nachweisgrenze dar, mit der Wirbelstromindikationen abgebildet werden. Störsignale durch lokale ferromagnetische Werkstoffausbildungen in der Rohr-Außenoberfläche werden durch die Oberwellenanalyse von Indikationen durch Werkstofftrennungen unterschieden. Störsignale durch Rohr-Außenfehler oder Lift-Off Effekte unterscheiden sich durch eine Phasenlage von ungefähr 90° in Bezug zu den Signalausbildungen durch Werkstofftrennungen in der Rohr-Innenoberfläche.

7 Realisierung des Prüfsystems

Die Realisierung eines Prüfsystems beinhaltet die Anpassung eines Manipulatorsystems und einer Sensorführungseinheit zur mechanisierten Meßdatenaufnahme an den Rohrbögen. Weiterhin ist zur Bewertung der Signalausbildungen ein Konzept zur Klassifikation der Wirbelstromindikationen zu entwickeln. Um den Einsatz der Prüftechnik als Wiederholungsprüfung zu gewährleisten, ist eine geeignete rechnerunterstützte Meßdatendokumentation auszuarbeiten. Hierdurch können die Meßdaten der Erstprüfung mit den Meßdaten von zeitlich folgenden Prüfungen verglichen werden.

7.1 Manipulatoraufbau zur Rohrbogenprüfung und Meßdatenaufnahme

Zur Durchführung der mechanisierten Meßdatenaufnahme ist ein Rohrbogenmanipulator der Firma DELTA-Test¹ modifiziert worden. Dieser Manipulator wurde zunächst für den Einsatz zur Oberflächenrißprüfung mit hochfrequenter Wirbelstromtechnik an Rohrbögen entwickelt. Für die Messungen mit der niederfrequenten Wirbelstromtechnik ist dieser Manipulatoraufbau mechanisch verstärkt, um die relativ großen Wirbelstromsonden zu führen. Entsprechend Bild 7.1 werden die Bewegungsrichtungen durch jeweils eine Achse in Rohr-Längsrichtung und Rohr-Umfangsrichtung verwirklicht. Die in Rohr-Umfangsrichtung orientierte Achse ist zur Montage an die Rohrbögen teilbar. Die Sondenhalterung ermöglicht eine Ausrichtung der Spulenchsen, entsprechend der Krümmung der Rohroberfläche. Weiterhin kann die Halterung um 90° verdreht werden, um die Empfindlichkeitsrichtung des Sensorsystems in Rohr-Umfangs- oder Rohr-Längsrichtung zu orientieren. Dieses ist notwendig, um eine vollständige Prüfung der Rohrwandung für beliebige Fehlerorientierungen zu gewährleisten.

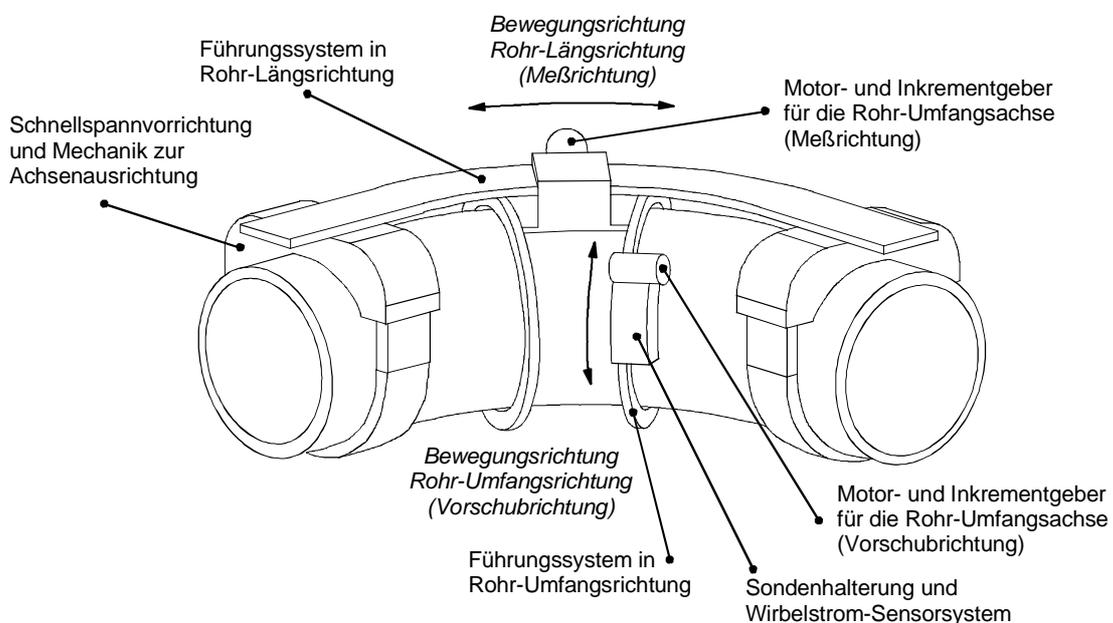


Bild 7.1: Aufbau und Bewegungsrichtungen des 2-Achsen Rohrbogenmanipulators

¹ Delta Test GmbH, Brigitta 15, 29313 Hambühren, www.deltatest.de

Die zur Manipulatorsteuerung und Wirbelstromsignalaufnahme notwendigen Teilfunktionen und Informationswege sind in Bild 7.2 schematisch dargestellt. Das rechnergestützte Meßwert-erfassungssystem koordiniert die Manipulation der Sondenbewegungen und die Wirbelstrom-Signalaufnahme.

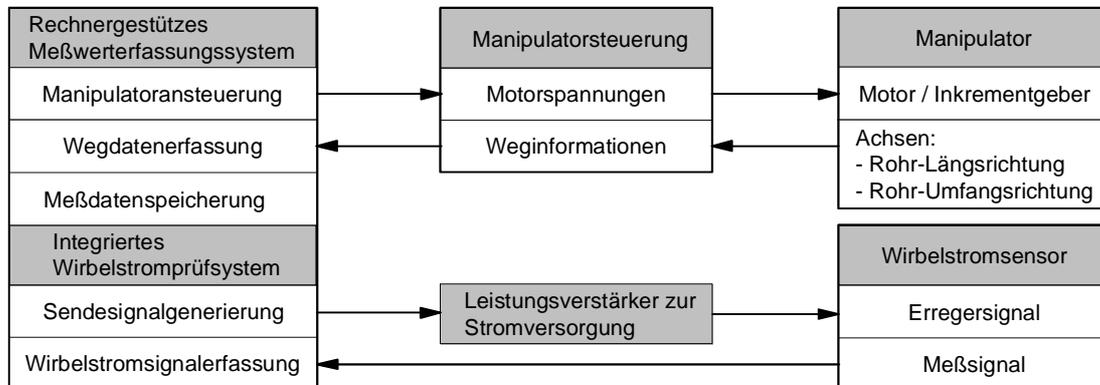


Bild 7.2: Schematisches Blockschaltbild zur Meßdatenaufnahme

7.2 Dynamische Kalibrierung der Wirbelstromsensoren

Die Bestimmung der Kennwerte der Wirbelstromsignale erfolgt mit zur Wirbelstromsignalanalyse entwickelten Programmroutinen. Hierbei wird zunächst die zu untersuchende Meßspur aus der flächigen Darstellung ausgewählt. Die Klassifikation der Wirbelstromsignale erfolgt zeilen- oder spaltenweise in Meß- oder Vorschubrichtung, entsprechend der maximalen Empfindlichkeit des Sensorsystems. Anhand der an den Testfehlergeometrien aufgenom-

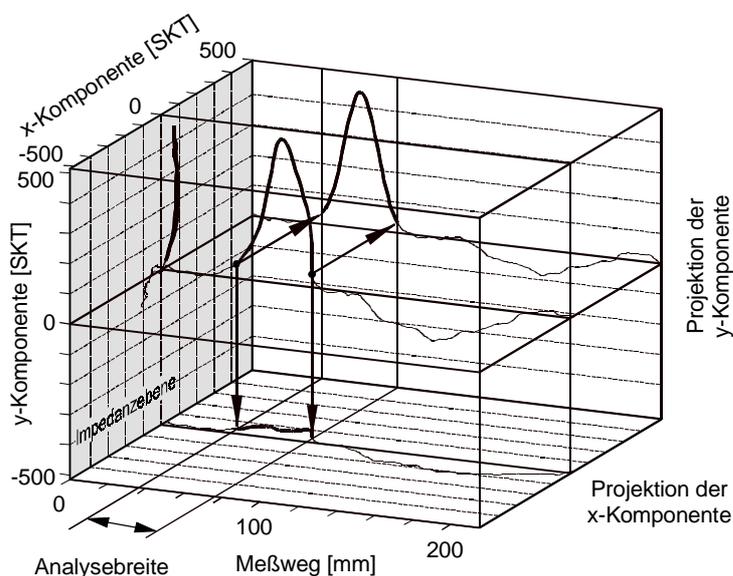


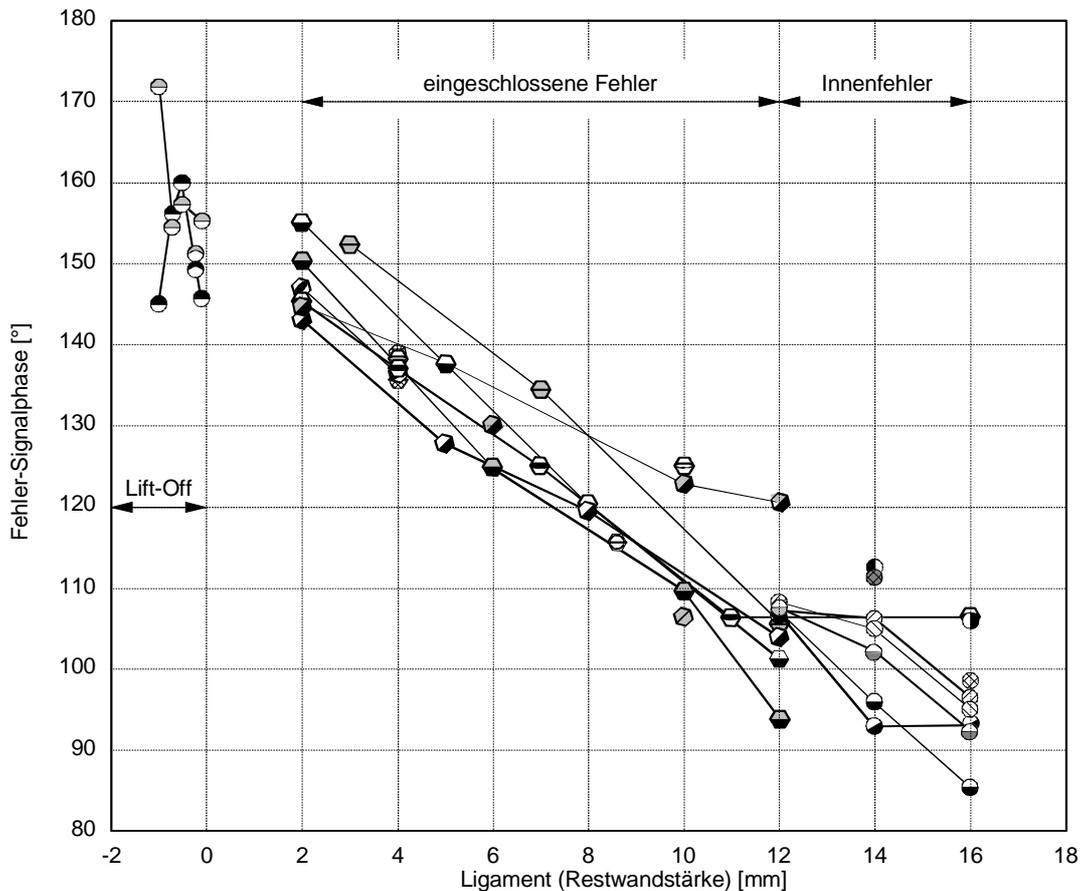
Bild 7.3: Bestimmung der Signalkennwerte innerhalb einer Einzelspur aus der flächigen Signaldarstellung

metrien präsentiert. Entsprechend der verwirklichten Gestaltung des Sensors, werden Störsignale aus Oberflächeneffekten ausschließlich in der x-Komponente abgebildet.

genommenen Wirbelstromsignalen ist empirisch eine geeignete Analysebreite für das Sensorsystem ermittelt. Entsprechend Bild 7.3 ist das Wirbelstromsignal als dreidimensionale Funktion wiedergegeben. Die Wirbelstromkomponenten in Meßrichtung werden in die Impedanzebene projiziert. Innerhalb des Signalabschnitts der Analysebreite werden die Fehlersignal-Amplitude und -Phase ermittelt.

In Bild 7.4 ist die Ausbildung der Fehlersignal-Phase in Abhängigkeit des Ligamentes für die Gesamtheit aller Testfehlergeometrien präsentiert.

Demzufolge werden Lift-Off- und Beulensignale in einer Phasenlage von 170° abgebildet. Mit zunehmendem Ligament in der Rohrwandung erfolgt eine Verringerung der Phasenwerte auf ca. 90° .



Legende: Q - Querfehlermessung; L - Längsfehlermessung

- | | |
|---|--|
| ○ Beule (Q) | ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=2\text{mm}$ (Messung 60°) |
| ● Beule (L) | ⊗ eingeschlossene Fehler, $t=3\text{mm}$ (Messung 60°) |
| ○ Außen-Schlagstelle, Fehlertiefe: 0.2mm | ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=4\text{mm}$ (Messung 60°) |
| ○ Außen-Schleifstelle, Fehlertiefe: 0.3mm | ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=6\text{mm}$ (Messung 60°) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=1\text{mm}$ (Messung 0°) | ● Innen-Diagonalfehler, -45° , $t=30\%$ (L) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=1\text{mm}$, parallel (Messung 0°) | ● Innen-Diagonalfehler, $+45^\circ$, $t=20\%$ (Q) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler Rohr 3, $t=2\text{mm}$ (Messung 0°) | ⊖ Innen-Diagonalfehler, -45° , $t=30\%$ (Q) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler Rohr 4, $t=2\text{mm}$ (Messung 0°) | ⊗ Innen-Diagonalfehler, $+45^\circ$, $t=20\%$ (L) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=2.88\text{mm}$; 45° (Messung 0°) | ○ Innen-Diagonalfehler (Q) |
| ⊗ eingeschlossene Fehler, $t=3\text{mm}$ (Messung 0°) | ○ Innen-Diagonalfehler (L) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=4\text{mm}$ (Messung 0°) | ○ Innen-Längsfehler, 60° (L) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=6\text{mm}$ (Messung 0°) | ○ Innen-Querfehler (Q) |
| ⊖ eingeschlossene Fehler, $t=1\text{mm}$ (Messung 60°) | ○ Innen-Längsfehler (L) |

Bild 7.4: Kennwerte der Wirbelstromsignale, Fehlersignal-Phase – Ligament

Für die Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude ergibt sich ein Kennfeld, entsprechend Bild 7.5. Hierbei sind jeweils die Meßergebnisse für Werkstofftrennungen mit gleichem Ligament bei unterschiedlichen Fehlerhöhen im Werkstoff durch einen Kurvenzug miteinander verbunden. Oberflächennahe Werkstofftrennungen mit einer großen Fehlerhöhe in der Rohrwandung werden mit großen Amplitudenwerten abgebildet. Mit zunehmendem Ligament

und kleiner Fehlerhöhe verringern sich die Beträge. Zur vollständigen Charakterisierung der Wirbelstromsignale ist zudem die Richtungsabhängigkeit der Signalausbildung zu erfassen. Entsprechend Bild 7.6 sind die Fehlersignal-Amplituden für ausgewählte Fehlergeometrien in Winkelgeraden von 90°, 45° und 0° in Bezug zu der Fehlerorientierung dargestellt.

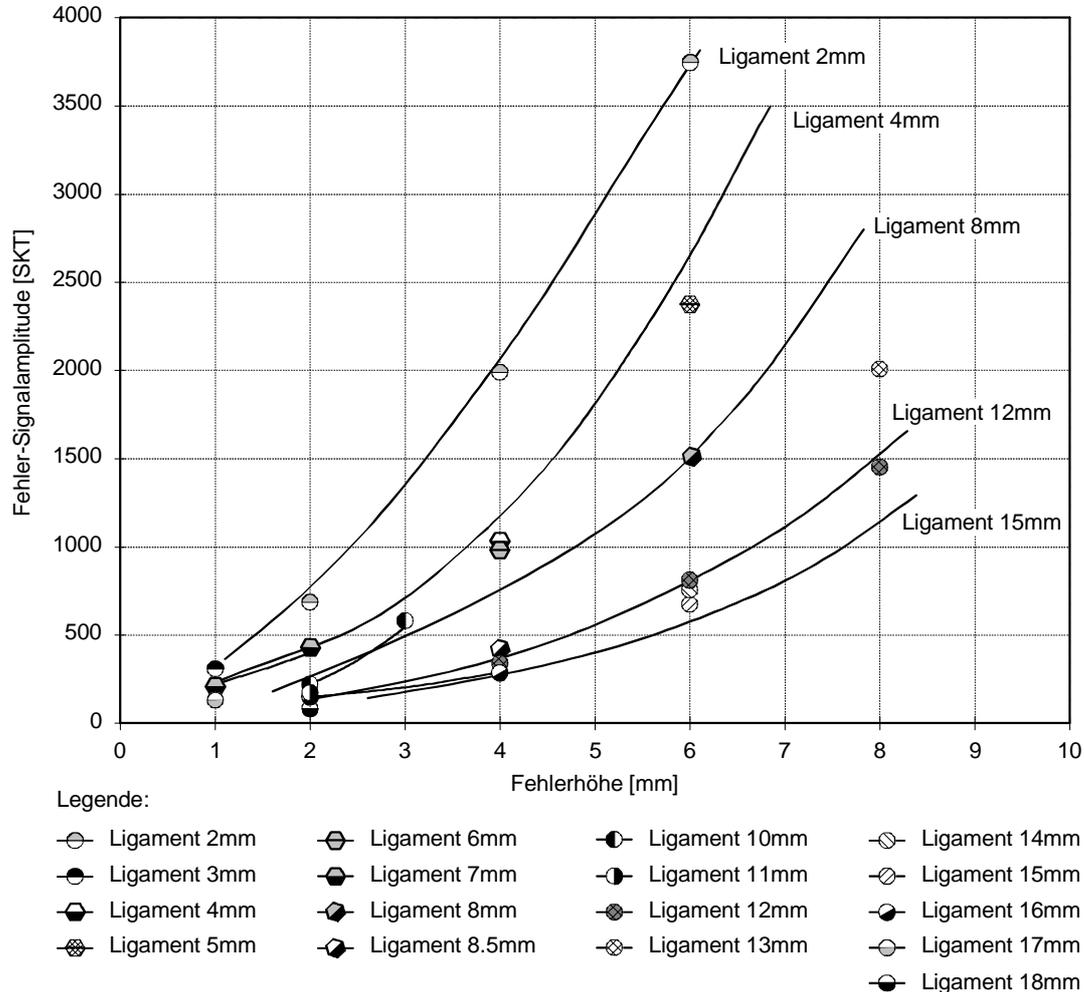


Bild 7.5: Kennwerte der Wirbelstromsignale, Fehlersignal-Amplitude – Fehlerhöhe

7.3 Prüfkonzept zur Wirbelstrom-Signalklassifizierung

Mit Hilfe der gefundenen Zusammenhänge bei der Wirbelstromsignalausbildung für die Testfehlergeometrien kann nun ein Bewertungskonzept für unbekannte Wirbelstromsignale aufgebaut werden. Dabei werden die Signale in Abhängigkeit der Beträge ihrer Kennwerte den gebildeten Zusammenhängen zugeordnet. Grundsätzlich erfolgt die Signalbewertung in Empfindlichkeitsrichtung, ausgehend von dem Arbeitspunkt in der Impedanzebene für einen ungestörten Werkstoffbereich. Zur Signalbewertung wird ein Fenster mit der festgelegten Analysebreite schrittweise entlang des Meßsignals geführt. Die Einzelschritte bei der Signalklassifikation zur Signalbewertung sind in dem Flußdiagramm in Bild 7.8 zusammengefaßt.

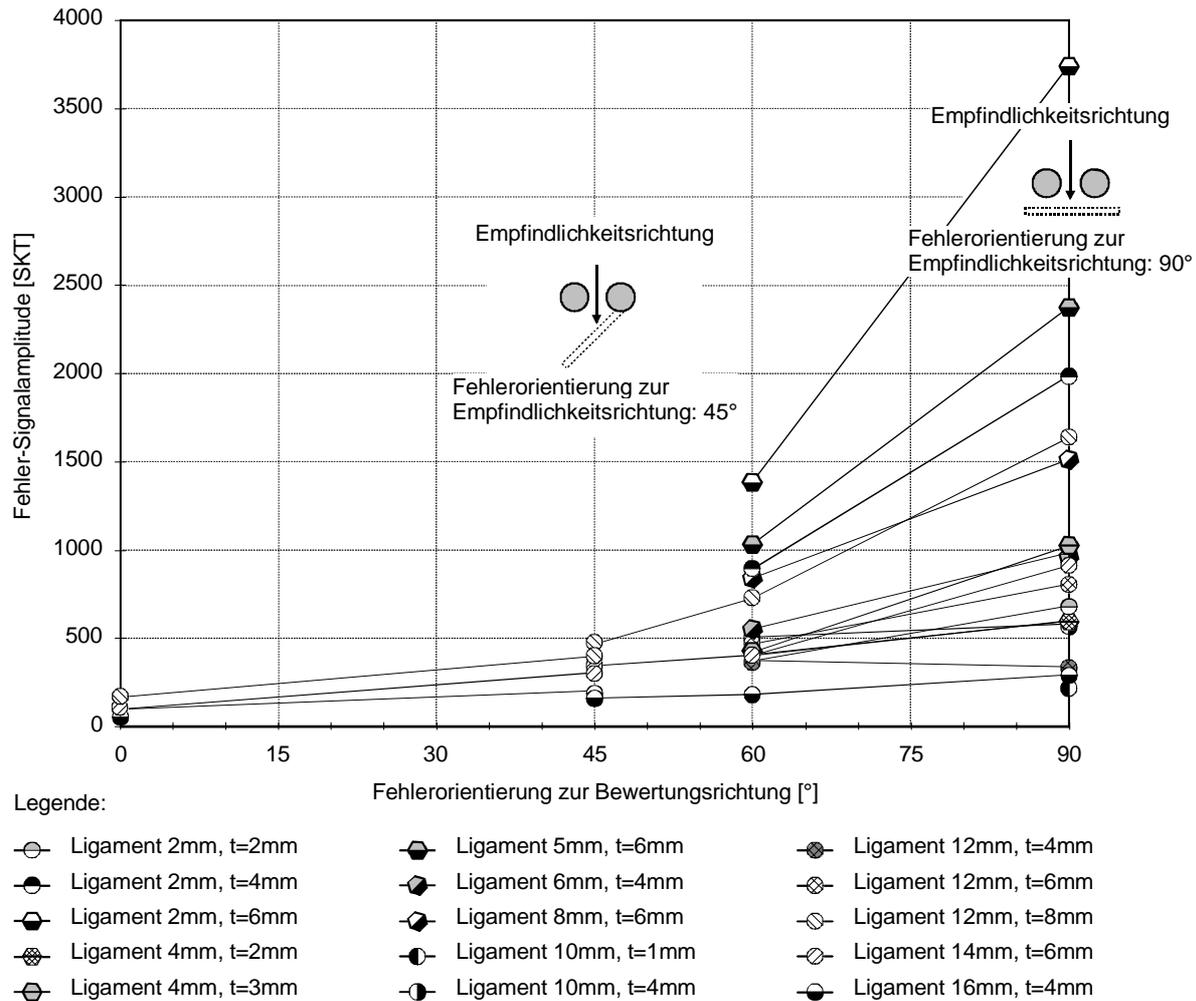


Bild 7.6: Anhebung der Fehlersignal-Amplitude in Empfindlichkeitsrichtung für beliebige Fehlerorientierung

Schritt 1: Bestimmung der Fehlersignal-Amplitude:

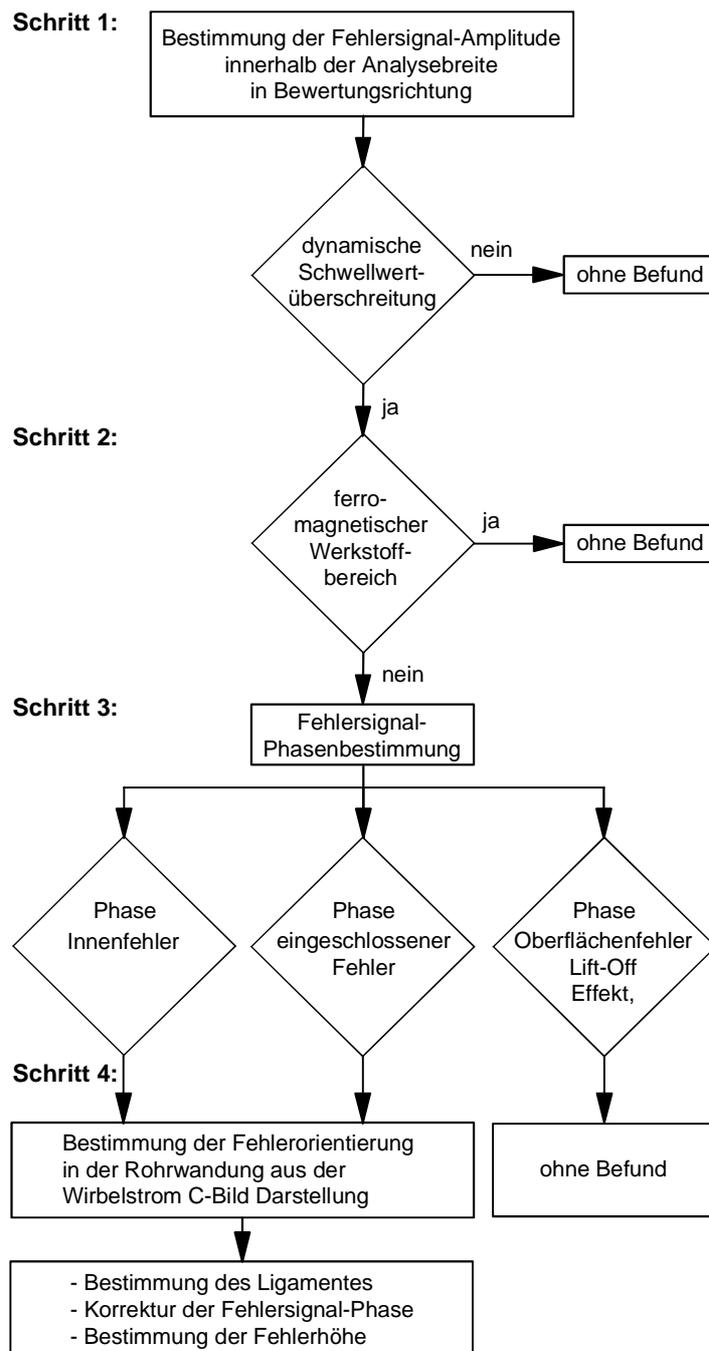
Entsprechend der Ausbildung der Fehlersignal-Amplitude für den Referenzfehler mit einer Tiefe von 20% der Rohrwandung, ist ein zu registrierender Schwellwert gesetzt. Dieser Schwellwert wird dynamisch mit der Ortsposition des Analysebereiches mitgeführt. Zur Durchführung der Signalbewertung muß dieser Schwellwert von der Fehlersignal-Amplitude innerhalb der Analysebreite überschritten werden. Die Position, an der eine detaillierte Signalbewertung durchgeführt werden soll, wird innerhalb der flächigen Wirbelstromsignal-darstellung der y-Komponente festgelegt.

Schritt 2: Überprüfung auf ferromagnetische Werkstoffbereiche:

Danach erfolgt eine Überprüfung hinsichtlich lokalen ferromagnetischen Werkstoffverhaltens. Hierfür wird die flächige Signaldarstellung der 3. Oberwelle des Wirbelstromsignals (Harmonische Analyse) herangezogen. Ist die Ursache der Arbeitspunktverlagerung im

Wirbelstromsignal durch eine ferromagnetische Werkstoffinhomogenität zu erklären, liegt keine zu bewertende Anzeige vor.

Sind keine ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften erkennbar, ist anhand der Fehlersignal-Phasenlage zu entscheiden, ob es sich um eine überlagerte Oberflächenstörung durch Lift-Off Effekte oder Geometrieänderungen auf der Rohrbogenoberfläche (Beulen) handelt. Liegen diese Verhältnisse vor, besteht keine zu bewertende Anzeige.



Schritt 3:

Klassifizierung der Anzeige, ausgehend von dem Kennwert der Fehlersignal-Phase

Ergibt die Fehlersignal-Phasenlage des Wirbelstromsignals Werte, die auf einen eingeschlossenen Fehler oder Innenfehler weisen, erfolgt eine weitergehende Klassifizierung der Signale. Zunächst wird aus den Werten der Fehlersignal-Phase mit Hilfe von Bild 7.4 das Werkstoff-Ligament abgeschätzt. Ausgehend von der Phasenlage, wird hierbei eine Unterteilung in Rohr-Innenfehler, eingeschlossene Fehler und Oberflächenfehler unternommen.

Die Fehlerhöhe innerhalb der Rohrwandung wird mit Hilfe der Fehler-Signalamplitude bestimmt. Mit der Fehler-Signalamplitude und dem nun bekannten Ligament wird in Bild 7.5 ein Schnittpunkt in einem Kurvenzug für das entsprechende Ligament und der Fehlersignal-Amplitude gesucht. Nun kann auf der Abszisse die zugehörige Fehlerhöhe abgeschätzt werden.

Bild 7.7: Konzept zur Wirbelstrom Signalklassifikation

Schritt 4: Korrektur der Fehlersignal-Amplitude für Diagonalfehler und Fehler mit beliebiger Orientierung zur Bewertungsrichtung

Weicht die Winkellage der Haupt-Fehlerorientierung in der flächigen Signaldarstellung deutlich von der Bewertungsrichtung ab, ist eine Korrektur der Fehlersignal-Amplitude durchzuführen. Wird die Hauptachse des Anzeigebereiches nicht rechtwinklig von der Empfindlichkeitsrichtung des Wirbelstromsensors überfahren, so wird die Fehlersignal-Amplitude für den betreffenden Anzeigebereich zu gering wiedergegeben. Somit ist die Signalamplitude entsprechend Bild 7.6 auf Werte anzuheben, die sich bei dem Überfahren mit maximaler Empfindlichkeit einstellen werden. Zur Anhebung der Fehlersignal-Amplitude ist aus der flächigen Darstellung der Wirbelstromsignale die Winkelabweichung in Bezug zu der Empfindlichkeitsrichtung zu bestimmen. Das Vorgehen ist zulässig, da die Fehlersignal-Phase eine nur geringe Abhängigkeit von der Fehlerorientierung zeigt in Bezug zu der Empfindlichkeitsrichtung bei Abweichungen von $\pm 45^\circ$. Bei nicht rechtwinkligem Überfahren des Anzeigebereiches ist jedoch der Analysebereich der Anzeigenbreite für die Kennwertbestimmung anzupassen. In dem angepaßten Analysebereich werden die Fehlersignal-Phase und die Fehlersignal-Amplitude an der betreffenden Position ermittelt.

Mit diesem Konzept können unbekannte Wirbelstromindikationen vollständig klassifiziert werden in Anlehnung an die Signalausbildungen der gewählten prüfrelevanten Testfehlergeometrien.

7.4 Rechnergestützte Signalidentifikation und Klassifikation

Das entwickelte Konzept Identifikation und Klassifikation der Wirbelstromsignale kann in einfacher Weise automatisiert werden. Hierdurch wird die Bewertung unabhängig von Einzelpersonen, welches die Voraussetzung ist bei der Durchführung von Wiederholungsprüfungen in großen zeitlichen Abständen.

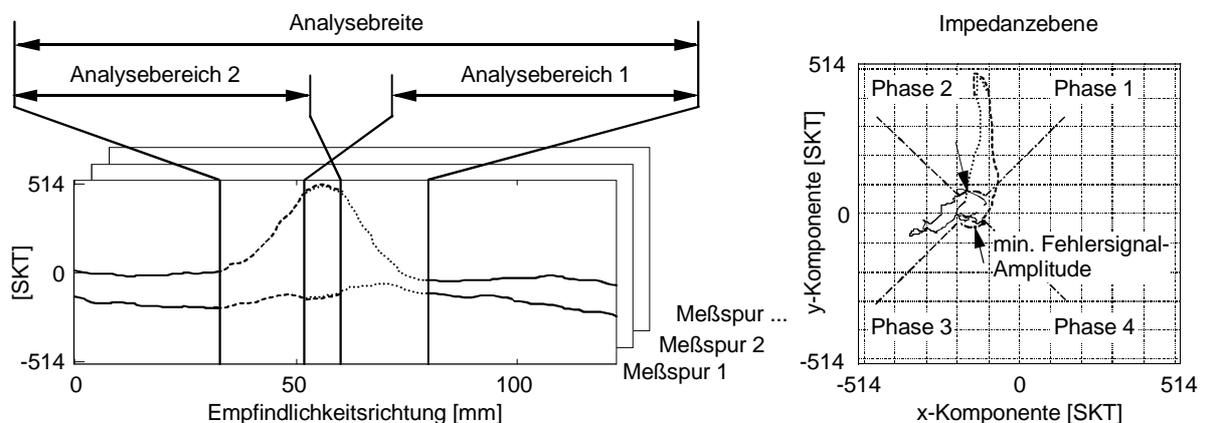


Bild 7.8: Übertragung der Einzelschritte der Signalklassifikation zur rechnergestützten Signalidentifikation

Die Automatisierung der Meßdatenanalyse erfolgt entsprechend dem manuellen Bewertungskonzept mit Hilfe der flächigen Signaldarstellung. Hierbei werden zunächst die x- und y-Komponenten der Wirbelstromsignale als zweidimensionale Datenfelder mit $n \cdot m$ Elementen entsprechend der Anzahl der Meßpunkte in Meß- und Vorschubrichtung gebildet. Weiterhin wird eine Matrix aufgebaut mit der gleichen Anzahl von Elementen, in der bei einer Identifikation ein Index für die aktuelle Position des Analysebereiches gesetzt wird. Die Signalidentifikation kann dann innerhalb der Datenfelder rechnergestützt durch eine Schleife, entsprechend dem im Bild 7.9 dargestellten Ablaufdiagramm, erfolgen. Aus den Datenfeldern werden in Zeilen- oder Spaltenrichtung, entsprechend der Empfindlichkeitsrichtung des Wirbelstromsensors, die Wirbelstromkomponenten innerhalb der Analysebreite ausgelesen, in der Impedanzebene abgebildet und die Signalkennwerte bestimmt.

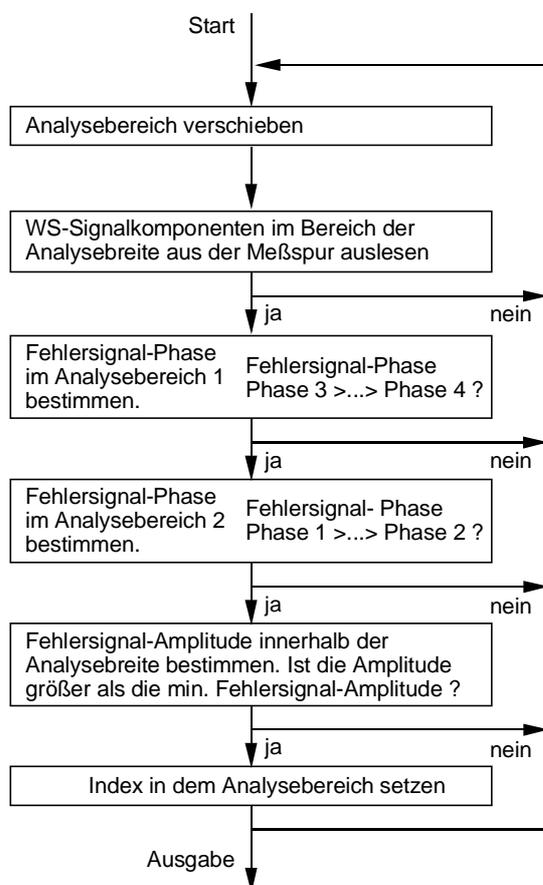


Bild 7.9: Algorithmus zur automatisierten Signalidentifikation

ergibt sich nur eine punktuelle Werteabbildung, an der keine eindeutige Phasenbestimmung erfolgen kann. Daher muß ein dynamischer Schwellwert für die Fehlersignal-Amplitude innerhalb der Analysebreite festgelegt werden, um nicht signifikante Arbeitspunktverlagerungen von der Phasenbewertung auszuschließen. In dem Beispiel ergibt sich dieser Schwellwert aus der Fehlersignal-Amplitude für die kleinste nachzuweisende Werkstofftrennung an der Rohr-Innenwandung. Sind die notwendigen Phasen- und Amplituden-

Entsprechend Bild 7.8 werden die Meßdaten in der Analysebreite in zwei überlappende Teilbereiche segmentiert und die Fehlersignal-Phase für die beiden Einzelbereiche bestimmt. Beispielhaft aufgezeigt ist die Signalidentifikation für einen Rohr-Innenfehler. Eine Identifikation in der Impedanzebene liegt nur dann vor, wenn sich für den 1. Analysebereich eine positive Phasenausbildung in der Impedanzebene ergibt, entsprechend dem Bildschirmsegment zwischen Phase 1 und Phase 2. Ist diese Bedingung erfüllt, muß für den zweiten Analysebereich eine negative Phasenausbildung entsprechend dem Bildschirmsegment zwischen Phase 3 und Phase 4 vorliegen. Diese bestätigt, daß die Arbeitspunktverlagerung innerhalb der Analysebreite von lokaler Erscheinung ist. Durch den logischen Vergleich der beiden Einzelergebnisse erfolgt die Signalidentifizierung.

Die Möglichkeit der mathematisch eindeutigen Bestimmung der Fehlersignal-Phase verringert sich mit Abnahme der Werte für die Arbeitspunktverlagerung in der Impedanzebene. Ohne eine ausreichende Arbeitspunktverlagerung

bedingungen innerhalb der Analysebreite bestimmt, wird in der Ergebnismatrix der Index gesetzt. Danach wird der Analysebereich verschoben und die Kennwertbildung erneut durchgeführt.

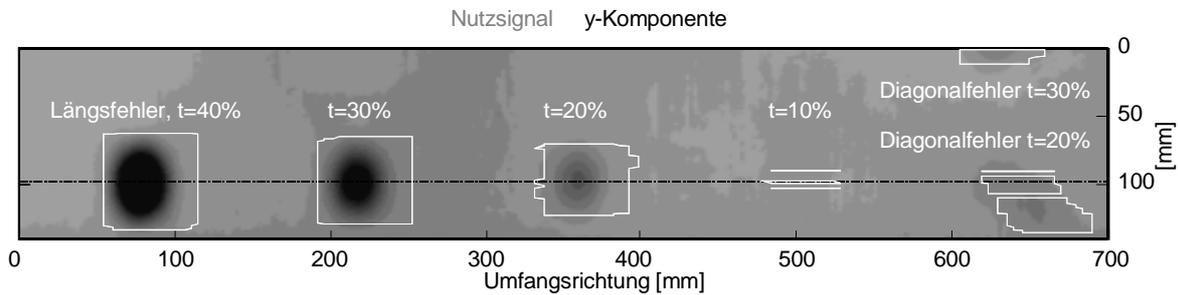


Bild 7.10: Ergebnis der Signalidentifikation für das Kriterium „Rohr-Innenfehler“

In Bild 7.10 sind die Konturlinien der Ergebnismatrix als Binärbild der Graustufenabbildung der y-Komponente der Wirbelstromsignale überlagert. Alle innerhalb des Meßgebietes vorhandenen Werkstofftrennungen sind automatisiert identifiziert worden. Auch die Werkstofftrennung mit einer Fehlertiefe von 10% führt zu Signaländerungen, die von dem Algorithmus erfaßt werden, obgleich die geringen Signaländerungen nicht in der Graustufenabbildung erkennbar sind.

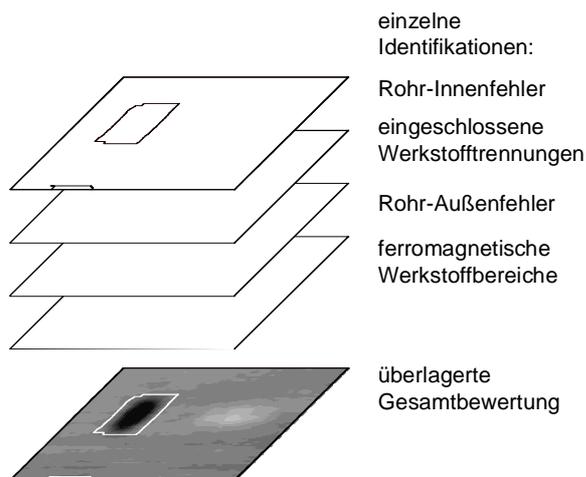


Bild 7.11: Schematische Darstellung einer automatisierten Wirbelstrom-Signalklassifikation

Der vorgestellte Algorithmus zur Signalidentifikation kann in einfacher Weise erweitert werden zur automatisierten Signalklassifikation für unterschiedliche Fehlergruppen, wie eingeschlossene Fehler oder Rohr-Außenfehler. Hierbei werden die Datenfelder der Wirbelstromsignale mehrmals mit jeweils unterschiedlichen Kriterien für einzelne Identifikationen rechnerisch analysiert. Die einzelnen Ergebnismatrixen können im Anschluß durch logische Verknüpfungen oder empirische Verfahren zu einem Gesamtergebnis überlagert werden. In Bild 7.11 sind schematisch die Ergebnismatrixen der Einzelbewertungen zu einer automatisierten Gesamtbewertung überlagert.

Mit diesem Vorgehen können ebenfalls die Wirbelstromsignale von unterschiedlichen Messungen oder Prüfparametern hinsichtlich einer Signalidentifikation analysiert und miteinander verknüpft werden. Weiterhin ist es prinzipiell möglich, die Ergebnismatrixen resultierend aus automatisierten Fehleridentifikationen unterschiedlicher ZfP-Verfahren, wie beispielsweise einer automatisierten Ultraschallprüfung oder einer digitalisierten Radiografie, zu verknüpfen. Mit diesem Vorgehen besteht die Aussicht, eine vollständig automatisierte Identifikation und Klassifikation der Meßsignale zu gewährleisten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt die Entwicklungsschritte für einen Wirbelstromsensor mit einem hohen Nachweisvermögen von verdeckten rißartigen Werkstofftrennungen in austenitischen Werkstoffen. Diese Werkstoffe werden verwendet für die Neben- und Kleinleitungssysteme von Leichtwasserreaktoren aufgrund ihrer hohen Werkstoffzähigkeit und Korrosionsbeständigkeit in Verbindung mit dem Primärkühlmittel. Ziel der Verfahrensentwicklung ist die Bereitstellung und der Einsatz des zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Untersuchung dieser austenitischen Rohre auf zu unterstellende Werkstoffschädigungen an der Rohr-Innenoberfläche mit einem auf der Rohr-Außenoberfläche geführten Wirbelstrom-Sensorsystem. Der Einsatz der Prüftechnik erfolgte im Rahmen von Integritätsuntersuchungen an Rohrbögen mit einer Wandstärke von 20.3mm innerhalb des Einspeise- und Nachkühlkreislaufs eines Druckwasserreaktors.

Zur Auswahl einer geeigneten Wirbelstromtechnik mit hohen Eindringtiefen ist der aktuelle Kenntnisstand zusammenfassend dargestellt. Werkstofftrennungen im Werkstoffvolumen zeigen eine relativ geringe Wechselwirkung mit den induzierten Wirbelstromausbildungen. Daher kommt den Verfahren der Wirbelstromsignalverarbeitung zur Unterscheidung von Signalausbildungen durch Werkstofftrennungen und Störsignalen eine besondere Bedeutung zu. Ein besonders hohes Nachweisvermögen zeigen niederfrequent arbeitende Verfahren, wie das Fernfeld-Wirbelstromverfahren für gerade Platten. Daher wurde diese Prüftechnik ausgewählt, um sie entsprechend an die Prüfaufgabe anzupassen.

Die Durchführung numerischer Feldberechnungen unterstützt die experimentellen Entwicklungsarbeiten. Zur Realisierung der an die Prüfaufgabe angepassten Sensorgestaltung ist eine Modellbildung zur numerischen Berechnung der Wirbelstromverteilungen im Werkstoff entwickelt worden. Durch umfangreiche, systematische Feldberechnungen wird der Wirkungszusammenhang in Abhängigkeit der Prüfbedingungen für die Meßanordnung bestimmt. Insbesondere durch die Bestimmung der Eindringtiefe in Abhängigkeit von den elektromagnetischen Werkstoffeigenschaften werden grundlegende Zusammenhänge zur Induktion von Feldausbildung mit hohen Eindringtiefen erarbeitet. Die Ergebnisse zeigen, daß eine hohe Prüfempfindlichkeit erreicht wird bei möglichst homogener Wirbelstromverteilung innerhalb des zu untersuchenden Werkstoffvolumens. Zur Induktion dieser geeigneten Wirbelstromausbildung sind die Feldverteilungen für unterschiedliche abgeschirmte Erregerspulen berechnet. Experimentelle Untersuchungen bestätigen qualitativ die Ergebnisse der numerischen Feldberechnungen.

Schwerpunkt der experimentellen Arbeiten an dem Wirbelstromsensorsystem ist eine hohe Nachweisempfindlichkeit für verdeckte Werkstofftrennungen in dem austenitischen Grundwerkstoff. Diese wurde erreicht durch eine an die Prüfaufgabe angepasste Sensorgestaltung, welche Störsignale durch Oberflächeneinflüsse unterdrückt.

Durch die sphärisch gekrümmte Oberfläche der Rohrbögen ändern sich die Orientierungen der Wirbelstromsensoren bei dem flächigen Abtasten einzelner Bogenbereiche. Dieses führt zu Signalausbildungen durch Lift-Off Effekte, die von Wirbelstromindikationen durch Werkstofftrennungen zu unterscheiden sind. Durch die Sensorgestaltung wurde eine Phasentrennung beider Signalausbildungen in der Impedanzebene erreicht.

Insbesondere bei der Prüfung von metastabilen austenitischen Rohrwerkstoffen treten Störsignale durch lokale ferromagnetische Werkstoffeigenschaften innerhalb des Werkstoffvolumens des paramagnetischen austenitischen Rohrwerkstoffes auf. Die ferromagnetischen Werkstoffbereiche werden identifiziert durch die Anwendung der Oberwellenanalyse während der Wirbelstromprüfung. Somit ist eine Unterscheidung von Signalen durch Werkstofftrennungen und inhomogene Werkstoffausbildung gegeben.

Die Wirbelstromsignalanalyse erfolgt mit Hilfe der flächigen Darstellung der Wirbelstromsignale. Zur Identifikation von Werkstofftrennungen wurden die Abbildungseigenschaften der Wirbelstromsensoren in Abhängigkeit von den Prüfbedingungen an prüfrelevanten Testfehlergeometrien bestimmt. Die rechnergestützte Verknüpfung der Wirbelstromsignalausbildung in der Wegdarstellung und der Impedanzebene bildet die Voraussetzung zur Ermittlung von Signalkennwerten zur Signalklassifikation.

Die ausreichende Empfindlichkeit des Wirbelstromsensors ist durch Messungen an Prüfkörpern mit prüfrelevanten Testfehlergeometrien nachgewiesen. Die Messungen umfassen Rohr-Innenfehler, in der Rohrwandung eingeschlossene Werkstofftrennungen und Rohr-Außenfehler. Auf der Grundlage der einzelnen Signalausbildungen ist ein umfassendes Bewertungskonzept entwickelt worden, welches die Identifikation und Klassifikation der Wirbelstromsignale an den eingebauten Rohrbögen in Bezug zu den gewählten Testfehlergeometrien ermöglicht.

Aufbauend auf dem Bewertungskonzept ist ein einfacher Algorithmus zur automatisierten Identifikation von Wirbelstromsignalen durch Werkstofftrennungen in der Rohr-Innenoberfläche entworfen. Es besteht die Aussicht, den Algorithmus für eine automatisierte Signalklassifikation für unterschiedliche Fehlergruppen weiter zu entwickeln und auf konventionelle Wirbelstromverfahren zu übertragen.

Zur Durchführung der Prüfung an den Primärkreislaufkomponenten ist ein Rohrbogenmanipulator an die Prüfaufgabe angepaßt worden. Mit der Verfahrensentwicklung konnte die Integrität der untersuchten austenitischen Rohrbögen nachgewiesen werden, die eingebaut sind in das Einspeise- und Nachkühlsystem eines Druckwasserreaktors. Somit ist ein Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit von kerntechnischen Rohrleitungskomponenten durch die Bereitstellung der vorgestellten Fernfeld-Wirbelstromtechnik erreicht worden.

9. Literaturverzeichnis

- /Abrassart 1973/ Abrassart, F.: *Stress-Induced $\gamma \rightarrow \alpha'$ Martensitic transformation in two carbon stainless steels. Application to trip steel*; In: Metallurgical Transactions, Band 4, 1972, Heft 9, S. 2205-2216
- /Atherton 1989/ Atherton, D. L.; Toal, C. J.; Schmidt, T. R.: *Investigation of the remote field eddy current technique in large diameter pipeline*; In: British Journal of Non-Destructive Testing, Band 31, 1989, Heft 9, S. 485-488
- /Atherton 1989a/ Atherton, D. L.; Czura, W.; Schmidt, T. R.: *Finite-element calculations for shields in remote-field eddy current tools*; In: Materials Evaluation, Band 47, 1989, Heft 9, S. 1084-1088
- /Atherton 1992/ Atherton, D. L.; Schmidt, T. R.; Svendsen, T.; von Rosen, E.: *Effects of remote-field exciter coil tilt and eccentricity in a steel pipe*; In: Materials Evaluation, Band 50, 1992, Heft 1, S. 44-50
- /Atherton 1992a/ Atherton, D. L.; Klink, O.; Schmidt, T. R.: *Remote-field eddy current responses to axial and circumferential slots in ferromagnetic pipe*; In: Materials Evaluation, Band 49, 1991, Heft 3, S. 356-360
- /Atherton 1994/ Atherton, D. L.; Czura, W.: *Finite element calculations for eddy current interactions with collinear slots*; In: Materials Evaluation, Band 52, 1994, Heft 1, S. 96-100
- /Atherton 1994a/ Atherton, D. L.; Frey, P.; Guo, X.: *Remote field slit defect responses*; In: British Journal of Non-Destructive Testing, Band 36, 1994, Heft 1, S. 4-7
- /Baerleken 1961/ Baerlecken, E.; Fischer, A.; Lorenz, K.: *Untersuchungen über das Umwandlungsverhalten, die Kerbschlagzähigkeit und die Neigung zur interkristallinen Korrosion von Eisen-Chrom-Legierungen mit Chromgehalten bis 30%*; In: Stahl und Eisen, Band 81, 1961, Heft 12, S. 768-778
- /Bartonicek 1992/ Bartonicek, J.; Zaiss, W.; Blind, D.; Herter, K.-H.; Schöckle, F.: *Grundsatzbetrachtungen zur Integrität von Kleinleitungen in kerntechnischen Anlagen*; In: 18. MPA-Seminar. Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 8.-9. 10. 1992 Stuttgart, Band 2, S. 14.1-14.24
- /Bartonicek 1998/ Bartonicek, J.; Zaiss, W.; Bath, H. R.: *Betriebsüberwachung und wiederkehrende Prüfungen in den Regelwerken*; In: 24. MPA-Seminar Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 8.-9. 10. 1998 Stuttgart, Band 1, S.11.1-11.27
- /Bayerlein 1989/ Bayerlein, M.; Christ, H. J.; Mughrabi, H.: *Plasticity-Induced martensitic transformation during cyclic deformation of AISI 304L stainless steel*; In: Materials Science and Engineering, Band A114, 1989, Heft1/2, S. 11-16
- /Becker 1980/ Becker, R.: *Über die Prüfung auf Fehler in metallischen Werkstoffen und Bauteilen mittels eines zerstörungsfreien Mehrfrequenz-Wirbelstromverfahren*; Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1980
-

- /Becker 1989/ Becker, H., Edelstahl-Vereinigung e.V. [Hrsg]: *Nichtrostende Stähle, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung, Normen* Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1989
- /Becker 1990/ Becker, R.; Otte, H.-J.; Wessels, J.: *A mechanized eddy current inspection system for austenitic weldments in large components*; In: *Automatisation et Robotisation des Controles Non Destructifs, 1 er Congres COFREND sur les Essais Non Destructifs, Nizza, 6.11-9.11.1990, S.505-512*
- /Becker 1996/ Becker, R. ; Disque, M.: *Beitrag der Mehrfrequenz-Wirbelstromprüfung zum Nachweis der Integrität der austenitischen Druckbehälterplattierung von Kernkraftwerken*; In: *Werkstoffprüfung 1996, Bad Nauheim, 5.-6. 12. 1996, Deutscher Verband für Materialforschung und Prüfungen e.V., S. 91-101*
- /Becker 1997/ Becker, R.; Bessert, S.; Disque, M.; Weiß, R.: *Auslegung und Optimierung des Niederfrequenz-Wirbelstrom-Verfahrens für die volumetrische Prüfung von austenitischen Neben- und Kleinrohrleitungen mit Wandstärken bis 12 mm*; In: *23. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 1.-2. 10. 1997, Stuttgart, Band 2, S. 45.1-45.20*
- /Becker 1998/ Becker, R.; Kröning, M.: *WS-Prüfungen mit großer Eindringtiefe* In: *24. MPA-Seminar; Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 8.-9. 10. 1998, Stuttgart, Band 1, S.25.1-25.18*
- /Becker 2000/ Becker, F. L.; Latiolais, C.: *Experience with inspection qualifications for austenitic piping*; In: *Nuclear Engineering and Design, Band 195, 2000, S. 227-232*
- /Bendick 1993/ Bendick, W.; Haarmann, K.; Richter, H.: *Die Anwendung austenitischer Rohrwerkstoffe im Kraftwerksbau*; In: *Internationale VGB-Konferenz „Fossilbefeuerte Dampfkraftwerke mit fortgeschrittenen Auslegungsparametern“, Essen 16.-18. 6. 1993, Band TB140, S. 1-17*
- /Bendick 1994/ Bendick, W.; Wachter, O.; Wunsch, E.; Diem, H.K.: *Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Kaltverformung an austenitischen Rohrleitungskomponenten bei Verdacht auf fortschreitende Deformation*; In: *VGB-Konferenz „Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk“, Essen 15.-16. 3.1994, S. 14.1-14.30*
- /Betzold 1978/ Betzold, K.: *Mathematische Modelle zur Auslegung der Spulen und Wahl der Frequenzen bei der Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Methode*; In: *1. Europäische Tagung für zerstörungsfreie Materialprüfung, Mainz, 24.-26.04.1978, Band 1, S. 189-198.*
- /Beissner 1985/ Beissner, R. E.; Fisher, J. L.: *Pulsed eddy-current crack-characterization experiments*; In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 5, 1985, Heft A, S. 199-206*
-

-
- /Blind 1983/ Blind, D.; Jansky, J.; Kußmaul, K.: *Rissbildung in Speisewasserleitungen von Leichtwasserreaktoren, Ursachen und Abhilfemaßnahmen*;
In: VGB-Konferenz, „Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1993“, Düsseldorf, 13.-14. 1. 1983, S. 67-109
- /Blume 1983/ Blume, H.; Speth, W. E.; Bredenbruch, K.; Kalwa, G.: *Nach dem Induktivbiegeverfahren gebogene Rohre für Kraftwerke*;
In: 3 R international, Band 22, 1983, Heft 9, S. 432-437
- /Blume 1983a/ Blume, H.; Speth, W. E.; Bredenbruch, K.; Kalwa, G.: *The production of pipe bends for power stations by the induction bending process*;
In: Energy Developments, Band 7, 1983, Heft 12, S. 9-15
- /Blume 1986/ Blume, H.; Speth, W. E.; Stender, E.; Ziemann, M.: *Induktivbogen aus dem austenitischen Werkstoff ASTM A 376 TP 316 NG für Kernkraftwerke*;
In: 3 R international, Band 25, 1986, Heft 9, S. 442-447
- /Boesch 1991/ Boesch, H.; Zehnder, S.: *Rißdetektion in der 2. Schicht mittels Wirbelstrom-Reflexionsspulen*;
In: DACH-Jahrestagung 1991; Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Luzern, 6.-8.5.1991, Band 1, S. 161-167
- /Braginski 2000/ Braginski, A.I.; Krause, H. J.: *Nondestructive evaluation using high-temperature SQUIDS*;
In: Physika C, Superconductivity, Band 335, 2000, Heft 1-4, S. 179-183
- /Brast 1997/ Brast, G.; Britz, A.; Maier, H. J.; Seidenkranz, T.: *Auswahl der Verfahren für wiederkehrende Prüfungen*;
In: 23. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 1.-2.10.1997 Stuttgart, Band 2, S. 49.1-49.14
- /Brown 1989/ Brown, D. J.; Le, Q., V.: *Application of the remote-field eddy current technique to the in-service inspection of ferromagnetic heat-exchanger tubing*;
In: Materials Evaluation, Band 47, 1989, Heft 1, S. 47-55
- /Brühl 1985/ Brühl, F.; Kalwa, G.; Weber, H.: *Bruchverhalten von Bauteilen unter Zeitbeanspruchung*;
In: VGB Kraftwerktechnik, Band 65, 1985, S. 1059-1068
- /Brühl 1986/ Brühl, F.; Zschau, M.: *Fabrication of components manufactured in the material TP 316 (NG) for nuclear power plants*;
In: 3R International, Band 25, 1986, Heft 9, S. 447-453
- /Casperson 1994/ Casperson, R.; Thomas, H. M.: *Einsatz der Impuls-Wirbelstromprüftechnik an austenitischen Schweißverbindungen und -nähten*;
In: DGZfP-Jahrestagung 1994, Fortschrittliche ZfP. Ein Instrument für Ökonomie und Ökologie, 9.-11. 5. 1994, Timmendorfer Strand, Band 43, Teil 1, S. 263-270
- /Caussin 1979/ Caussin, P.: *Ultrasonic testing applied to austenitic steel*;
In: Proceedings of the 1. International Seminar on Non-Destructive Examination in Relation to Structural Integrity, Berlin, 22. 8. 1979, S. 85-105
-

- /Chen 1992/ Chen, M. J.; Sun, Y.; Lord, W.; Nath, S.; Shin, Y. K.: *Pulsed RFEC probe response*; In: IEEE Transactions on Magnetics, Band 28, 1992, Heft 2, S. 1430-1433
- /Crostack 1983/ Crostack, H.-A.; Nehring, J.: *Untersuchungen zur Anwendung eines CS-Impulswirbelstromverfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung*; In: Materialprüfung, Band 25, 1983, Heft 9, S. 306-310
- /Dangel 1969/ Dangel, K.; Baumann, K.; Ruttman, W.; Gayer, P.: *Erfahrungen mit austenitischen Armaturen und Formstücken*; In: VGB-Werkstofftagung, Duisburg 18. 4.1969, S.97-118
- /Debray 1974/ Debray, W.: *Werkstoffe des Primärkreises*; In: Oldekop, W. [Hrsg.] Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke, Thiemig – Taschenbücher, Band 51, 1974, Verlag Karl Thiemig, München, S. 147-185
- /Dietrich 1964/ Dietrich, H.: *Eigenschaften der nichtmagnetisierbaren Stähle und ihre metallkundliche Deutung*; In: DEW-Technische Berichte, Band 4, 1964, S. 111-113, S. 163-181
- /Dietrich 1976/ Dietrich, H.; Heimann, W.; Strom, H.: *Einfluß der Kaltverformung auf die mechanischen und magnetischen Eigenschaften von nichtrostenden Stählen*; In: Thyssen Edelstahl Technische Berichte TEW, Band 2, 1976, Heft 1, S. 61-69
- /Diem 1992/ Diem, H.; Blind, D.; Roos, E.; Wachter, O.; Tolksdorf, E.: *Bruchverhalten von dickwandigen Rohrbogen bei zyklischer Biegebeanspruchung und statischem Innendruck*; In: 18. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik; Stuttgart 8.-9. 10. 1992, S 1.1-1.34
- /Diem 1992a/ Diem, H.; Blind, D.; Wachter, O.; Tolksdorf, E.: *Einfluß von begrenzter monotoner oder zyklischer Verformung auf das Restumformungsverhalten von Austenit (1.4550)*; In: 18. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik; Stuttgart 8.-9. 10. 1992, S. 24.1-1.31
- /DIN 54142/ Wirbelstromprüfung mit Tastspulen, Teil 3: *Kontrollverfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von Tastspulen für die Fehlerprüfung* Beuth Verlag 1991
- /Dodd 1969/ Dodd, C.V.; Deeds, W. E.; Luquire, W.: *Integral solutions to some eddy current problems*; In: International Journal of Nondestructive Testing, Band 1, S. 29-90
- /Dodd 1974/ Dodd, C. V.; Cheng, C. C.; Deeds, W. E.: *Induction coils coaxial with an arbitrary number of cylindrical Conductors*; In: Journal of Applied Physics, Band 45, 1974, Heft 2, S. 638-647
- /Engelmann 1994/ Engelmann, H.-J.; Mummert, K.: *Mechanismus der Rißausbreitung bei der Spannungsrißkorrosion des Stahles X 6 CrNiTi 18 10 mit Hilfe elektronenmikroskopischer Untersuchungen*; In: Praktische Metallurgie, Band 32, 1994, Heft 9, S. 448-457
- /Erhard 1996/ Erhard, A.; Thomas, H. M.: *Prüfung der Plattierung mit Impuls-Wirbelstrom- und Ultraschallverfahren*; In: Materialprüfung, Band 38, 1996, Heft 11/12, S. 474-478
-

-
- /Feiste 1995/ Feiste, K.L.; Reimche, W.; Stegemann, D.: *Zerstörungsfreie Bestimmung mechanisch-technologischer Feinblecheigenschaften mittels Harmonischen-Analyse*; In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Materialprüfung, Jahrestagung 1995, Aachen, 22.-24. 5. 1995, Band 47, Heft 2, S. 607-616
- /Förster 1954/ Förster, F.; Stambke, K.: *Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren*; In: Metallkunde, Band 45, 1954, Heft 4, S.166- 178
- /Erve 1995/ Erve, M.; Kleen, U.; Weber, J.; Maußner, G.; Roth, A.; Schmidt, G.: *Schadensfalluntersuchungen an Rißbildungen in Rohrleitungen eines SWR-Speisewassersystems und daraus abgeleitete Vorsorge- und Abhilfemaßnahmen*; In: 21. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, Stuttgart 5.-6. 10. 1995, S. 40.1-40.25
- /Funke 1969/ Funke, P.; Bungardt, K.; Küppers, W.: *Beitrag zum Einfluß der Austenitstabilität auf das Verhalten nichtrostender Chrom-Nickel-Stähle bei der Kaltumformung*; In: DEW-Technische Berichte, Band 9, 1969, Heft 3, S. 370-397
- /Gräfen 1978/ Gräfen, H.; Horn, E.-M.; Gramberg, U.: In: *Ullmans Encyklopädie der technischen Chemie*; Band 15, Korrosion, Weinheim 1978, S. 14-24
- /Gramberg 1994/ Gramberg, U.; Schwellenbach, P.; Steffens, W.; Schwaderlapp, T.: *Ungewöhnliche Zeitstandsschäden an Rohrbögen aus einem austenitischen Stahl - Ursachen und Vermeidung*; In: VGB Konferenz, „Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1994“, Essen, 15.-16. 4. 1994, S. 22.1-22.20
- /Grüner 1960/ Grüner, P.: *Über Rohrbiegeverfahren*; In: Der Maschinenmarkt, Band 13a, 1960, Heft 30/31, S. 120-129
- /Hänninen 1985/ Hänninen, H.; Aho-Mantila, I.: *Umgebungsinduzierte Rißbildung bei Werkstoffen in druckführenden Bauteilen von Leichtwasserreaktoren*; In: Der Maschinenschaden, Band 59, 1986, Heft 4, S. 154-165
- /Hänninen 1993/ Hänninen, H.: *Phenomena of material degradation with time relevant to reactor pressure vessels*; In: International Journal of Pressure Vessels and Piping, Band 54, 1993, Heft 1/2, S. 9-30
- /Hagamaier 1982/ Hagamaier, D. J.; Steinberg, A. P.: *Low-frequency eddy current inspection of aircraft structure*; In: Materials Evaluation, Band 40, 1982, Heft 2, S. 206-210
- /Hagamaier 1988/ Hagamaier, D. J.; Bates, B.; Steinberg, A.: *On-aircraft eddy current subsurface crack inspection*; In: Materials Evaluation, Band 46, 1988, Heft 4, S. 518-522
- /Hagamaier 1990/ Hagamaier, D. J.: *Fundamentals of eddy current testing*; American Society for Nondestructive Testiung ASNT, Columbus 1990
- /Hanysz 1958/ Hanysz, E.A.: *Swept frequency eddy current device to measure overlay thickness*; In: Review of Scientific Instruments, Band 29, 1958, Heft 5, S. 411-415
-

- /Hakala 1988/ Hakala, J.; Hänninen, H.; Aaltonen, P.: *Stress corrosion and thermal fatigue, experiences and countermeasures in austenitic SS pipings of finnish BWR-plants*; In: 14. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, Stuttgart, 6.-7. 10. 1988, S. 18.1-18.19
- /Hauser 1996/ Hauser, T.; Schenk, G.; Bertus, N.; Erhard, A.: *Universelles Prüfsystem mit Ultraschall und Impulswirbelstrom*; Materialprüfung, Band 38, 1996, Heft 7/8, S. 302-305
- /Hecker 1982/ Hecker, S.S.; Stout, M. G.; Staudhammer, K.P.; Smith, J. L.: *Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel: Part 1 Magnetic measurements and mechanical behavior; Part 2: Microstructural study*; In: Metallurgical Transactions, Band 13A, 1982, Heft 4, S. 612-629
- /Heidt 1994/ Heidt, H.: *Korrosion – (K)ein Thema für die Radiografie?*; In: Querschnittseminar Korrosionsüberwachung mit ZfP, Ausschluß für Ultraschallprüfung, Berlin, 28.-29. 11. 1994, Berichtsband 46, S. 53-57
- /Heller 1981/ Heller, H. J.; Herbsleb, G.; Kleinfeld, F.; Pfeiffer, B.: *Der Einfluß von Martensit auf das Korrosionsverhalten von 18 Cr-10 Ni-Stahl*; In: Werkstoffe und Korrosion, Band 32, 1981, Heft 4, S. 157-167
- /Heptner 1965/ Heptner, H.; Stroppe, H.: *Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung*; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1965
- /Höller 1984/ Höller, P.; Becker, R.; Sharpe, R.S.: *The application of eddy currents in weld testing*; In: Welding in the World, Band 22, 1984, Heft 6/7, S. 164-176
- /Hofstötter 1992/ Hofstötter, P.; Nagel, G.: *Untersuchung eines Rohrbogens in einer Volumenausgleichsleitung auf Ratcheting-Effekte*; In: 18. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, Stuttgart, 8.-9. 10. 1992, S. 10.1-10.15
- /Hofstötter 1994/ Hofstötter, P.: *Zum Verhalten von Rohrbögen unter Zeitstandsbeanspruchung*; In: Ertüchtigung und Lebensdauererlängerung energietechnischer Anlagen, Tagung der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Vietshöchheim, 25.-26. 10. 1994, VDI-Berichte, Band 1160, S. 77-92
- /Hohmann 2000/ Hohmann, R.; Lomparski, D.; Krause, H.-J.; Kreutzbruck, M.V.: *Aircraft wheel testing with remote eddy current technique using a HTS SQUID magnetometer*; In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Band 11, 2001, Heft 1; S 1279-1282
- /Hornbogen 2000/ Hornbogen, E.: *Martensit und Metallographie*; In: Praktische Metallographie, Band 37, 2000, Heft 7, S. 380-391
- /Ida 1989/ Ida, N.: *The remote field effect and its interpretation*; In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 8, 1989, Heft A, S. 275-281
-

-
- /Jahn 1975/ Jahn, E.: *Erfahrungen bei der Herstellung von Rohrbögen auf der Induktivbiegemaschine*;
In: VGB Kraftwerkstechnik, Band 55, 1975, Heft 6, S. 387-399
- /Jung 1983/ Jung, V.: *Texturvererbung und Transformation aus der austenitischen in die martensitische Phase bei streckbelasteten 18/8 CrNi-Rundstählen*
In: Archiv für das Eisenhüttenwesen, Band 54, 1983, Heft 11, S. 453-460
- /KTA 3201.4/ Kerntechnischer Ausschuß (KTA): *Sicherheitstechnische Regel des KTA, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Fassung 6/99*; In: Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung
Carl Hermanns Verlag KG, Köln
- /Kalwa 1982/ Kalwa, G.; Haarmann, K.: *Das Rohr im modernen Kraftwerksbau*;
In: Stahl und Eisen, Band 102, 1982, Heft 17; 53-56
- /Kalwa 1986/ Kalwa, G.; Bredenbruch, K.; Blume, H.; Speth, W. E.: *Induktiv gebogene Rohre für den Kraftwerksbau*;
In: VGB Kraftwerkstechnik, Band 66, 1986, Heft 1, S. 58-62
- /Kilgore 1989/ Kilgore, R.J.; Ramchandran, S.: *Remote-field eddy current testing of small-diameter carbon steel tubes*; In: Materials Evaluation, Band 47, 1989, Heft 1, S. 32-36
- /Klapp 1989/ Edelstahl-Vereinigung e.V. [Hrsg]: *Nichtrostende Stähle, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung, Normen*, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1989
- /König 1998/ König, G.; Wachter, O.; Blind, D.; Erve, M.: *Betriebsbedingte Schädigungsmechanismen in wichtigen Rohrleitungen von LWR-Anlagen*
In: 24. MPA Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 8.-9. 10. 1998, Stuttgart; Heft 2, S. 57.1-57.24
- /Krause 1997/ Krause, H.-J.; Hohmann, R.; Soltner, H.; Lomparski, M.; Grünekle, M.: *Mobile HTS SQUID system for eddy current testing of aircraft*;
In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Proceedings of the Twenty-Third Symposium, Brunswick, USA, 28. 7. - 02. 08 1996, Band 16, Heft A, S. 1053-1060
- /Krausz 1979/ Krausz, J.A.: *Kernverfahrenstechnische Anlagen*; In: Oldekop, W.[Hrsg.] Druckwasserreaktoren für Kernkraftwerke, Thiemig – Taschenbücher Band 51; 1974, Verlag Karl Thiemig, München, S. 186-211
- /Kußmaul 1969/ Kußmaul, K.: *Werkstoff- und Herstellungsfehler in nahtlosen Rohren, Rohrbogen und Schmiedestücken*; In: VGB-Werkstofftagung, Duisburg, 18.4.1969, S.89-96
- /Kußmaul 1984/ Kußmaul, K.; Blind, D.; Jansky, J.: *Rißbildung in Speisewasserleitungen von Leichtwasserreaktoren, Ursachen und Abhilfemaßnahmen*
In: VGB-Kraftwerkstechnik, Band 64, 1984, Heft 12, S. 1115-1129
- /Kußmaul 1986/ Kussmaul, K.; Diem, H.; Blind, D.: *Deformation and failure behaviour of elbows: Experimental results and analytical predictions*; In: Seismic Engineering for Piping Systems, Tanks, and Power Plant Equipment, Band PVP-108, 1986, S. 91-104
-

- /Kußmaul 1993/ Kussmaul, K.; Föhl, J.: *Review of the state of the art in the assessment for material degradation with time*; In: International Journal of Pressure Vessels and Piping, Band 54, 1993, Heft 1-2, S. 137-156
- /Libby 1971/ Libby, H. L.: *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*; Batelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratories Richland/Wiley-Interscience, 1971, New York
- /Lord 1986/ Lord, W.: *Finite element model for the remote field eddy current effect* In: PR 179-520, 9-30-86, American Gas Association
- /Lord 1988/ Lord, W.; Sun, Y. S.; Udpa, S. S.; Nath, S. *Physics of the remote field eddy current effect*; In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 7, 1988, Heft A, S. 165-172
- /Lowe 1994/ Lowe, A. L.: *Aging phenomena related to nuclear pressure boundary materials*; In: 21. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, Stuttgart, 5.-6. 10. 1994, Band 2, S. 42.1-42.12
- /Meier 1976/ Meier, W.: *Grundlagenuntersuchungen für die Wirbelstromprüfung austenitischer Schweißverbindungen und Auftragsplattierungen* In: Materialprüfung, Band 18, 1976, Heft 18, S. 376-379
- /Meier 1978/ Meier, W.: *Wirbelstromprüfung von austenitischen Schweißnähten, Plattierungen und Gußwerkstoffen*; In: Materialprüfung, Band 20, 1978, Heft 2, S. 57-62
- /McGaughey 1985/ McGaughey, W. C.; Cerri, M.; Tribuno, C.: *Detection and sizing of intergranular stress corrosion cracking using laboratory ultrasonic examination techniques converted to field procedures*; In: Proceedings of the International Conference, Residual Life: Assessment and Extension, Brüssel, 19.-21. 3. 1995, S. SII-5, 1-10
- /Mook 2000/ Mook, G.; Bauke, H.; Uchanin, V.: *Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen. Theorie und Praxis*; In: Jahrestagung der Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, ZfP im Übergang zum 3. Jahrtausend, Innsbruck, 29.-31. 5. 2000, Heft 1, S. 145-154
- /Müller 1984/ Müller, K. U.; Diem, H.; Hunger, H.: *Investigations on stressing and failure of pipe bends under complex loading*; In: Nuclear Engineering and Design, Band 87, 1984, Heft 2, S. 169-279
- /Nath 1997/ Nath, S.; Sun, Y. S.; Mina, M.: *Design considerations for the remote field eddy current probe for inspecting ferromagnetic flat structures* In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Band 16, 1997, Heft B, S. 1061-1066
- /Naumann 1982/ Naumann, K. F.: *Spannungsrissskorrosion in Rohrbogen aus nichtrostendem Stahl*; In: Praktische Metallographie, Band 19, 1982, Heft 12, S. 713-717
- /Nehring 1987/ Nehring, J.: *Untersuchungen zum Einsatz problemangepaßter Prüfimpulse (CS-Technik) bei der Wirbelstromprüfung* In: Dissertation, Universität Dortmund, Fortschritt-Berichte, Reihe 5, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
-

-
- /Nestleroth 1990/ Nestleroth, J. B.: *Remote field eddy current detection of stress-corrosion cracks*; In: Final Report PR 3-823, Battelle, 1990, Columbus, Ohio
- /Neuman 1995/ Neumann, E.: *Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten, Theorie-Praxis-Regelwerke*; Expert Verlag, 1995, Renningen-Malmsheim
- /Nickel 1999/ Nickel, H.: *Die Bedeutung der Wasserchemie und Werkstoffwahl für Leichtwasser-Reaktoranlagen*; In: Atomwirtschaft – Atomtechnik, Band 44, 1999, Heft 10, S. 501-507
- /Oppenheim 1974/ Oppenheim, R.: *Nichtrostende Stähle: Kennzeichnung, Eigenschaften und Verwendung*; In: DEW-Technische Berichte, Band 14, 1974, S. 5-13
- /Ostermeyer 1997/ Ostermeyer, H.: *Methodische Entwicklung von Fernfeld-Wirbelstromsonden zur Prüfung ferromagnetischer Stahlrohre*; In: Dissertation, Universität Hannover, 1997
- /Ostermeyer 1998/ Ostermeyer, H.; Stegemann, D.: *New aspects for remote field eddy current probe development*; In: Proceedings of the 7th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), 26.-29. 5. 1998, Kopenhagen, Heft 3, S. 2569-2576
- /Palanisamy 1980/ Palanisamy, R.; Lord, W.: *Finite element analysis of eddy current phenomena*; In: Materials Evaluation, Band 38, 1980, Heft 10, S. 39-43
- /Palanisamy 1987/ Palanisamy, R.: *Remote-field eddy current testing. A review*; In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 7, 1987, Heft A, S. 157-164
- /Palanisamy 1987a/ Palanisamy, R.: *Finite element modeling of remote-field eddy current problems or the nondestructive testing of metal tube*; In: Proceedings of the 6. International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Houston, 1.3.1987, S. 503-511
- /Pichler 1991/ Pilcher, K.: *Der Computer führt Regie, Rohrbogenfertigung aus hochwertigen Stählen*; In: Schweizer Maschinenmarkt, Band 91, 1991, Heft 38, S. 36-37, 39
- /Rao 1999/ Rao, K. B. S.; Mannan, S.L.; Podriguez, P.: *Grain size effects on strain controlled low cycle fatigue deformation behaviour of type 304 stainless steel*; In: Proceedings of the 20th Riso International Symposium on Material Science: Deformation-induced microstructures: Analysis and relation to properties, Roskilde, Dänemark, 6.-10. 9. 1999, S. 459-465
- /Reiser 1982/ Reiser, R.: *Kernkraftwerk Isar 1 – Betriebserfahrungen, Vorbereitung und Durchführung der Umrüstung*; In: VGB Kraftwerkstechnik, Band 62, 1982, Heft 11, S.914-926
- /Renken 1964/ Renken, C. J.: *A pulsed electromagnetic test system applied to the inspection of thin walled tubing*; In: ANL-6728, Argonne National Laboratory, 1964
- /Reiners 1996/ Reiners, U.; Weber, J.; Kempkes, B.: *Lebensdauerüberwachung von Rohrleitungen und zeitstandbeanspruchten Komponenten*; In: VGB-Kraftwerkstechnik, Band 76, 1996, Heft 8, S. 613-618
-

- /Rösler 1985/ Rösler, R.; Debray, W.: *Meilensteine in der Werkstofftechnik auf dem Weg der kerntechnischen Entwicklung*; In: VGB-Ehrenkolloquium Werkstofftechnik und Betriebserfahrung, Mannheim 19. 6. 1985, S. 24-38
- /Rocha 1962/ Rocha, H.-J.: *Die Sensibilisierung stabilisierter und nicht stabilisierter austenitischer Stähle durch Chromkarbid*; In: DEW-Technische Berichte, Band 2, Heft 1, S. 16-24
- /RSK 1979/ RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Kapitel 4.2, 2. Ausgabe, 24 Januar 1979, Rahmenspezifikation; Basissicherheit
- /Runge 1991/ Runge, V: *Hochlegierte Stähle*; In: Handbuch der Schweißtechnik, Band 1 Werkstoffe, Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin 1991, S. 165-192
- /Schindler 1994/ Schindler, H.: *Einfluß der Unrundheit auf das Tragfähigkeitsverhalten von Rohren und Rohrbogen unter Innendruck*; In: 3 R international, Band 33, 1994, Heft 12, S. 670-675
- /Schmidt 1961/ Schmidt, T. R.: *The casing inspection tool - An instrument for the in-situ detection of external corrosion in oil wells*, In: Corrosion, Band 17, 1961, Heft 7, S. 81-85
- /Schmidt 1989/ Schmidt, T. R.: *History of the remote-field eddy current inspection technique*; In: Materials Evaluation, Band 47, 1989, Heft 1, S. 14-22
- /Schmidt 1989a/ Schmidt, T. R.; Atherton, D. L.; Sullivan, S.: *Use of one-dimensional skin-effect equations for predicting remote-field characteristics including wall-thickness versus frequency requirements*
In: Materials Evaluation, Band 47, 1989, Heft 1, S. 76-79
- /Schmidt 1989b/ Schmidt, T. R.; Atherton, D. L.; Sullivan, S.: *Remote-field transition zone*; In: Materials Evaluation, Band 47, 1989, Heft 9, S.969-979
- /Schmidt 1998/ Schmidt, T.R.; Atherton, D.L.: *Understanding remote field logs (Part 1 und Part 2)*; In: Materials Evaluation, Band 56, 1998, Heft 11 und Heft 12, S. 1276-1356 und S. 1356-1362
- /Scholz 1991/ Scholz, A.: *Durch wirksame Störunterdrückung zur effizienten Wirbelstromprüfung*; In: DACH-Jahrestagung 1991, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Luzern, 6.-8. 5. 1991, Band 1, S. 168-179
- /Schreiber 1997/ Schreiber, J.; Dobmann, G.; Lang, M.; Bassler, H. J.; Eifler, D.: *Charakterisierung von Werkstoffermüdung in austenitischen Werkstoffen unter Anwendung von HTSL-SQUIDS*; Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken 1997, Report-Nr. 970328-TW
- /Schwarz 1992/ Schwarz, Th; Herter, K.-H.; Julisch, P.; Kluttig, B.; Stoppler, W.: *Experimentelle Untersuchungen zum Traglastverhalten von fehlerhaften Abzweigungen und Rohrbogen*; In: 18. MPA-Seminar, Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik; Stuttgart 8.-9. 10.1992, S. 2.1-2.21
-

-
- /Schuler 1996/ Schuler GmbH, Göppingen: *Handbuch der Umformtechnik*
Springer Verlag Berlin Heidelberg 1996
- /Stumm 1981/ Stumm, W.: *Rohre kontrollieren nach dem Wirbelstromverfahren*
In: Bänder, Bleche, Rohre, Band 22, 1981, Heft Nr.2, S. 27-30
- /Sullivan 1989/ Sullivan, S.; Atherton, D. L.: *The effect of an external tube on the remote field eddy current effect*; In: British Journal of Non-Destructive Testing, Band 31, 1989, S. 547-550
- /Sun 1990/ Sun, Y. S.; Lin, H.; Shin, Y. K.; You, Z.; Nath, S.; Lord, W.:
3-D finite element modeling of the remote field eddy current effect;
In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation
Band 9, 1990, Heft A, S. 319-326
- /Sun 1992/ Sun, Y. S.; Qu, M. X.; Si, J. T.; Lu, C. T.; Zhou, X. Y.; Atherton, D. L.:
Improvements in remote-field eddy current probe structure;
In: Materials Evaluation, Band 50, 1992, Heft 5, S. 600-611
- /Sun 1994/ Sun, Y. S.; Lord, W.; Katragadda, G.; Shin, Y. K.: *Motion induced remote field eddy current effect in a magnetostatic non-destructive testing tool: A finite element prediction*; In: IEEE Transactions on Magnetics, Band 30, 1994, Heft 5, S. 3304-3307
- /Sun 1996/ Sun, Y. S.; Udpa, S.; Lord, W.; Cooley, D.: *A Remote field eddy current NDT probe for the inspection of metallic plates*
In: Materials Evaluation, Band 54, 1996, Heft 4, S. 510-512
- /Sun 1996a/ Sun, Y. S.; Lord, W.; Udpa, L.; Udpa, S.; Lua, S. K.; Ng, K. H.
Thick-walled aluminium plate inspection using remote field eddy current technique; In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 16, 1996, Heft A, S. 1005-1012
- /Sun 2000/ Sun, Y. S.; Ouang, T.; Udpa, S.: *Remote field eddy current testing. One of the potential solutions for detecting deeply embedded discontinuities in thick and multilayer metallic structures*; In: Materials Evaluation, Band 59, 2000, Heft 5, S. 632-637
- /Trenckhoff 1986/ Trenckhoff, E.; Rösler, U.: *Werkstoffe für Leichtwasserreaktoren*
In: Atomwirtschaft, Band 31, 1986, Heft 3, S. 118-126
- /Thomas 1981/ Thomas, H. M.; Maser, D.; Wittig, G.: *Erzeugung sowie analoge und digitale Aufbereitung von Signalen zum Nachweis von Materialfehlern mit dem Impuls-Wirbelstromverfahren*; In: Material und Technik, Band 9, 1981, Heft 3, S. 153-159
- /Thomas 1986/ Thomas, H. M.: *Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung*; In: Forschungsbericht 124, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, 1986
- /Waas 1984/ Waas, A.: *Wirbelstromprüfung längsnahtgeschweißter austenitischer Rohre*; In: Materialprüfung, Band 26, 1984, Heft 12, S. 434-437
- /Wachter 1996/ Wachter, O.: *Erfahrungen mit den austenitischen Werkstoffen 1.4541 und 1.4550 in deutschen Siedewasserreaktoren*; In: VGB Kraftwerkstechnik, Band 76, 1996, Heft 10, S. 847-855
-

- /Waidelich 1970/ Waidelich, D. L.: *Pulsed eddy currents*; In: Sharpe [Hrsg.], *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Academic Press 1970, S. 383-411
- /Weber 2000/ Weber, W.; Reimche, W.; Stegemann, D.; Feiste, K.L.; Reichert, Ch.; *Nachweis von Ermüdung und Materialfehlern in dickwandigen Rohrleitungskomponenten mit elektromagnetischen Prüftechniken*; In: 26. MPA-Seminar Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik, 5.-6. 10. 2000, Stuttgart, Band 1, S.11.1-11.31
- /Wegst 2001/ Wegst, C. W. [Hrsg.]: *Stahlschlüssel*, 19. Auflage, Marbach Verlag
- /Weiß 1990/ Weiß, E.; Erve, M.: *Stabilized austenitic stainless steels for light water reactors*; In: *Kerntechnik*, Band 55, 1990, Heft 6, S. 335-339
- /Wittig 1977/ Wittig, G.: *Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Prüfung*; In: *Materialprüfung*, Band 19, 1977, Heft 9; S. 365-370
- /Wittig 1980/ Wittig, G.; Thomas, H. M.; Grigulewitsch, W.; Maser, D.: *Untersuchungen zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens für die zerstörungsfreie Prüfung von kerntechnischen Komponenten*; In: Report-Nr. RS-299, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1980
- /Wittig 1986/ Wittig, G.; Thomas, H. M.; Maser, D.; Henning, P.: *Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung von korrosionsgeschädigten austenitischen Rohren*; In: Forschungsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1986
- /Yu 1995/ Yu, Pei Ma; Wikswo, J. P.: *Techniques for depth-selective, low-frequency eddy current analysis for SQUID-based nondestructive testing* In: *Journal of Nondestructive Evaluation*, Band 14, Heft 3, S. 149-167
- /Zaiss 1991/ Zaiss, W.; Bartonicek, J.; Schöckle, F.; Blind, D.; Kockelmann, H.; Hienstorfer, W.: *Auslegung von Kraftwerkskomponenten gegen Ermüdung und betriebsbegleitende Überwachung*; In: 17. MPA-Seminar Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik, 10.-11. 10. 1991, Stuttgart, Band 1, S. 17.1-17.26
- /Zaiss 1994/ Zaiss, W.; König, G.; Bartonicek, J.: *Schadensmechanismen bei Rohrleitungen von DWR-Anlagen*; In: 20. MPA-Seminar; Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik 6.-7. 10. 1994; Stuttgart; Band 1, S. 33.1-33.19
-

Lebenslauf

Name: Wolfram Weber

Geburtsdatum und Ort: 15. August 1965 in Arolsen

Schulbesuch:

8/1971 - 6/1975 Grundschule Sandershausen in Niestetal
8/1975 - 6/1982 Wilhelm-Leuschner-Schule in Niestetal
8/1982 - 6/1985 Max-Eyth-Schule, Berufliches Gymnasium in Kassel

Hochschulausbildung:

10/1986 Studium des Maschinenwesens an der Universität Hannover
der Fachrichtung Werkstofftechnik und Fertigungstechnik
3/1990 Diplomvorprüfung
11/1992 - 6/1993 Visiting Scholar am Massachusetts Institute of Technology
(MIT), Cambridge, USA,
Department of Mechanical Engineering
8/1995 Studienabschluß: Diplom-Ingenieur

Praktika:

8/1994 - 11/1994 Fachpraktikum bei BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover
in der Abteilung "Corrosion Engineering"

Berufliche Tätigkeiten:

8/1988 - 11/1991 Wissenschaftliche Hilfskraft am Laser Zentrum Hannover
12/1994 - 10/1995 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Kerntechnik und
Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IKPH), Universität Hannover
11/95 - 9/2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kerntechnik und
Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IKPH), Universität Hannover
10/2000 - 11/2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde
(IW), Universität Hannover
seit 12/2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der
ThyssenKrupp Stahl AG, Forschung, Zentrales Qualitäts- und
Prüfwesen, Duisburg

