

Abschlussbericht

zum Projekt

Magneto-akustische Defektanalyse für Spannbeton

Förderung: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, AIF
„Otto von Guericke“ e. V.

FKZ: 17 108 01

Berichtszeitraum: 01.10.2001 – 31.05.2003

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Zipser

Bearbeiter: Dipl.-Phys. Gert Hohndorf
Prof. Dr. Wilfried Heimke

Inhalt

- 0. Einleitung**
- 1. Problemstellung und Lösungsansatz**
- 2. Versuchsanordnung**
- 3. Analyse des Wirkungsmechanismus**
 - 3.1 Wechselwirkung zwischen Magnetfeldimpuls und Metall**
 - 3.2 Messaufbau zur Analyse des Wirkungsmechanismus**
 - 3.3 Experimentelle Untersuchungen zum magneto-mechanischen Effekt**
 - 3.4 Phänomenologische Deutung des magneto-akustischen Effekts**
- 4. Entwicklung eines magneto-akustischen Verfahrens zur Defektanalyse**
 - 4.1 Aufsuchen von Defektmerkmalen**
 - 4.2 Auswertung der Defektmerkmale bei einer hypothetischen Messreihe**
 - 4.3 Signalanalyseverfahren**
 - 4.4 Algorithmus für eine quantitative Defektaussage - Defektkriterium**
 - 4.5 Anwendungsgrenzen des magneto-akustischen Verfahrens zur Defektanalyse**
 - 4.6 Abschätzung des optimalen Abstands Spule/Sensor**
- 5. Messergebnisse an ausgewählten Probekörpern**
 - 5.1 Lange Balken**
 - 5.2 Kurze Balken**
 - 5.3 Verbundprobe**
 - 5.4 Hüllrohrprobe**
 - 5.5 Messungen mit abweichender Versuchsanordnung**
 - 5.6 Defekte im Beton**
 - 5.7 Bewertung der Ergebnisse**
- 6. Zusammenfassung und Ausblick**
- 7. Inbetriebnahme**
 - 7.1 Systemvoraussetzungen Hardware – Software**
 - 7.2 Softwaretechnische Realisierung**
 - 7.3 Software-Installation**
 - 7.4 Bedienungsanleitung**

0. Einleitung

Spannbeton ist ein Inbegriff für Festigkeit. Trotzdem bleibt seine Nutzungsdauer begrenzt. Das gilt besonders dann, wenn neben dem Klima auch mechanische und chemische Einflüsse auf Spannbetonbauwerke einwirken. Einer außerordentlich starken klimatischen, mechanischen und chemischen Beanspruchung unterliegen die Spannbetontragwerke von Brücken. Gleichzeitig sind dort die Anforderungen an die Festigkeit und die Funktionssicherheit von Spannbeton sehr hoch.

Die zerstörungsfreie Überprüfung des Bauzustandes und der Festigkeit von Spannbetonbrücken und anderen Spannbetonbauwerken ist daher eine außerordentlich wichtige, aber bisher nur unbefriedigend gelöste Aufgabe.

Obwohl weltweit an der Entwicklung von zuverlässigen und praktikablen zerstörungsfreien Prüfverfahren für Spannbeton gearbeitet wird, ist bis heute kein Verfahren bekannt geworden, das allein hinreichend zuverlässige Aussagen zum Zustand von Spannbeton, insbesondere zu Defekten der Spannelemente liefert.

Üblicherweise werden zur Überprüfung des Bauzustandes von Spannbetonbauwerken mehrere Prüfverfahren nebeneinander angewandt, um deren nicht immer eindeutige Aussagen gegenseitig zu überprüfen, zu ergänzen und damit ihre Aussagekraft und Zuverlässigkeit zu erhöhen. Zu solchen Verfahren gehören u.a. Georadar, Magnetfeldverfahren, Ultraschallverfahren, Impakt-Echo-Verfahren, Thermographieverfahren und Potentialfeldmessungen.

Risse oder Brüche in Spannelementen können mit den genannten Verfahren nicht oder nur mit hohem Aufwand und verbleibenden Unsicherheiten in den Messresultaten nachgewiesen werden.

Bei dem entwickelten neuen magneto-akustischen Prüfverfahren werden Spannstähle durch den umhüllenden Beton hindurch magnetisch so angeregt, dass sie akustische Signale abgeben. Die Auswertung dieser Signale liefert Aussagen über Risse und Brüche in den Spannstählen.

Das neue Verfahren kann zunächst zur Überprüfung von Spannstählen und eventuell auch von kompletten Spannkänen, die aus gebündelten, in Hüllrohren eingebetteten Spannstählen oder Spannseilen bestehen, genutzt werden und schließlich mit vertretbarem gerätetechnischen Aufwand effizient zur zerstörungsfreien Prüfung von Spannbetonbrücken oder anderen Spannbetonbauwerken eingesetzt werden. Der Bedarf für ein solches Verfahren ist historisch bedingt in den Neuen Bundesländern besonders hoch. In der ehemaligen DDR wurden als Bewehrung in Spannbeton vorwiegend Spannstähle eingesetzt.

1. Problemstellung und Lösungsansatz

Die zerstörungsfreie Überprüfung des Bauzustandes und der Festigkeit von Spannbetonbrücken und anderen Spannbetonbauwerken ist eine außerordentlich wichtige, aber bisher nur unbefriedigend gelöste Aufgabe.

Üblicherweise werden zur Überprüfung des Bauzustandes von Spannbetonbauwerken mehrere Prüfverfahren nebeneinander angewandt, um deren nicht immer eindeutige Aussagen gegenseitig zu überprüfen, zu ergänzen und damit ihre Aussagekraft und Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Zu solchen Verfahren gehören u. a. Georadar, Magnetfeldverfahren, Ultraschallverfahren, Impakt-Echo-Verfahren, Thermographieverfahren und Potentialfeldmessungen. Bis heute ist jedoch kein Verfahren bekannt geworden, das allein hinreichend zuverlässige Aussagen zum Zustand von Spannbeton, insbesondere zu Defekten der Spannelemente liefert.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues Verfahren beschrieben, welches zur zerstörungsfreien Prüfung von in Beton eingebetteten Spannstählen und eventuell auch kompletten Spanngliedern geeignet ist. Bei diesem Verfahren werden die Spannstähle magnetisch so angeregt, dass sie akustische Signale abgeben. Eine Auswertung dieser akustischen Signale liefert Aussagen über Risse und Brüche im Spannstahl.

In ersten Vorversuchen war festgestellt worden, dass sich lange Eisenstangen aus größerer Entfernung durch starke magnetische Impulse mechanisch so anregen lassen, dass sie eindeutig messbare akustische Signale abgeben.

Zunächst wird daher die Phänomenologie des Wirkungsmechanismus der magnetisch-mechanischen Energiewandlung näher untersucht.

Anschließend wird durch Analyse des Einflusses von Rissen oder Brüchen in den Spannstählen auf die abgegebenen akustischen Signale ein geeignetes Defektmerkmal gefunden.

Weiter wird nach Auswahl geeigneter Signalverarbeitungsverfahren aus den Defektmerkmalen der einzelnen Signale ein geeignetes Defektkriterium abgeleitet, um Informationen über mögliche Defekte zu gewinnen.

Schließlich werden für mehrere praxisnahe Probekörper Messergebnisse vorgestellt und diskutiert, mit deren Hilfe vorhandene Defekte erfolgreich detektiert werden konnten.

Als letztes wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messdatenverarbeitungssystem „DEFA – Defektanalyse bei Stahlbeton“, mit dessen Hilfe die Messergebnisse gewonnen und ausgewertet wurden, erläutert.

2. Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung besteht aus Impulsgenerator, Luftspule, Messobjekt, Beschleunigungssensoren, Digitaloszilloskop, Signalverstärker und Messrechner (Bild 2.1).

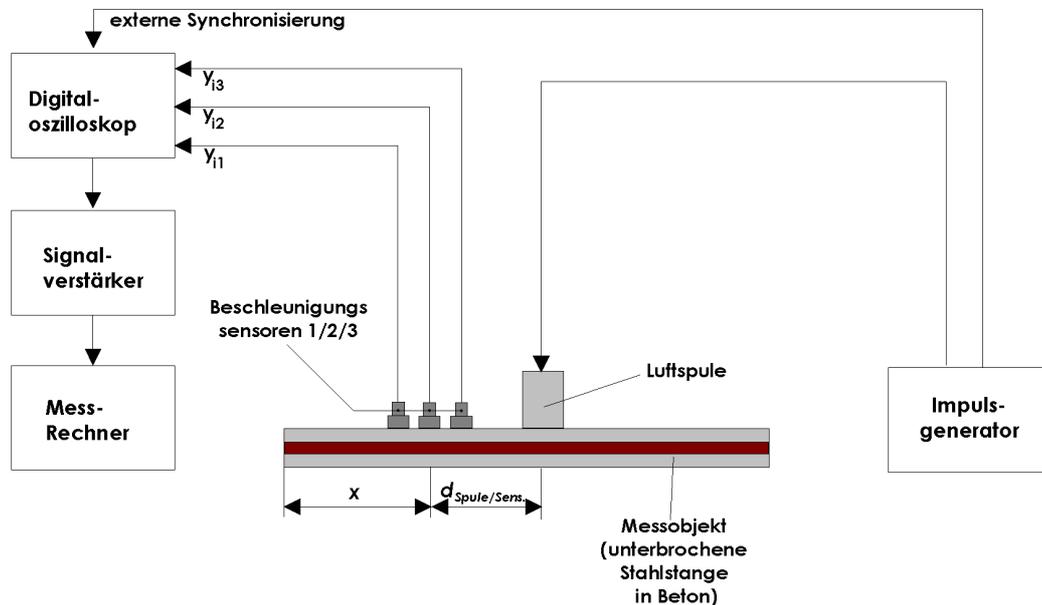


Bild 2.1: Strukturbild der Versuchsanordnung

Das Messobjekt ist eine unterbrochene Stahlstange, die von Beton umgeben ist. Eine Luftspule erzeugt starke magnetische Impulse. Dadurch wird die Stahlstange durch den umgebenden Beton hindurch magnetisch angeregt. Durch Umwandlung von magnetischer in mechanische Energie werden mechanische Impulse ausgelöst, die sich als Körperschallwellen im Stahl und Beton fortpflanzen. Die Wellenausbreitung wird vom Beton stark beeinflusst. Mindestens 1, aber günstiger 3 Sensoren nehmen Beschleunigungswerte an der Betonoberfläche auf.

Mit x wird der mittlere Abstand der Sensoren vom linken Ende der Stahlstange bezeichnet. Für x werden nacheinander verschiedene Werte x_i eingestellt, wobei der Abstand d des mittleren Sensors von der Luftspule stets konstant gehalten wird, ebenso die Abstände der Sensoren untereinander. Somit liegt ein scannendes Verfahren vor, bei dem die Beschleunigungssignale y_{ij} in Abhängigkeit von den x_i erfasst und über Digitaloszilloskop und Signalverstärker zum Messrechner übertragen werden. Im Messrechner werden die Paare x_i, y_{ij} einander zugeordnet gespeichert und ausgewertet.

Anmerkung: Bei jedem neu eingestellten Abstand x_i ist der Magnetisiervorgang mindestens zweimal durchzuführen, da stets eine Ummagnetisierung des ferromagnetischen Materials stattfindet (das Messdatenverarbeitungssystem DEFA steuert die Einhaltung dieser Vorschrift automatisch, siehe Abschnitt 7.4.3, Bild 7.11 und Bild 7.12).

Impulsgenerator

Als Impulsgenerator wird ein Impulsmagnetisator vom Typ 142/30.1-1 der Fa. Klaus Plötner & Peter Hoffmann GbR verwendet (Bild 2.2). Der Impulsgenerator ist zur Erzeugung kurzer

magnetischer Impulse $B(t)$ geeignet [1]. Die Ladespannung U_{soll} ist einstellbar von 50V bis 1600V. Bei $U_{soll} = 1600V$ beträgt der Kurzschluss-Impulsstrom 28kA. Der Impulsstromverlauf $I(t)$ kann mit einem Speicheroszilloskop durch Anschluss an die BNC-Buchse „ U_{Mess} “ dargestellt werden. Ein Signal zur externen Synchronisierung des Oszilloskops liegt an der BNC-Buchse „ $U_{Synchron}$ “ an.

Der Impulsgenerator hat 2 Betriebsarten. In der Betriebsart „Exponentialimpuls“ steigt der Strom $I(t)$ sinusförmig an und fällt nach Erreichen des Maximums exponentiell ab. In der Betriebsart „Halbsinusimpuls“ hat der Impuls angenähert die Form eines Halbsinus.



Bild 2.2: Impulsmagnetisator der Fa. Plötner & Hoffmann GbR

Zur Erzeugung eines kurzen starken mechanischen Impulses im Messobjekt wird ein schnell veränderliches Magnetfeld $B(t)$ in Form eines möglichst steil ansteigenden Impulses benötigt. Die Einstellung „Halbsinusimpuls“ erfüllt diese Forderung auch an der Rückflanke des Impulses besser. Außerdem erwärmt sich die Spule in der Betriebsart „Halbsinusimpuls“ in geringerem Maße. Aus diesen Gründen wird generell mit der Einstellung „Halbsinusimpuls“ gearbeitet.

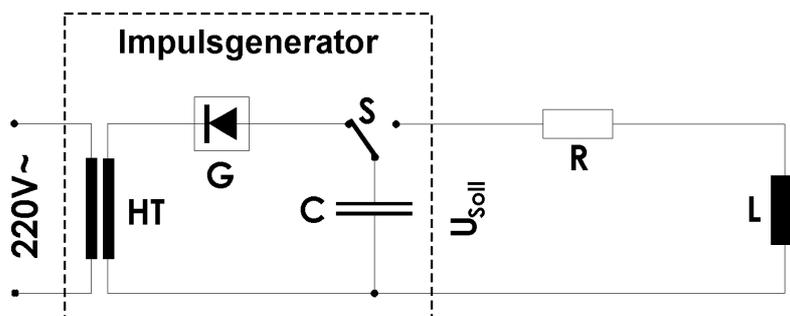


Bild 2.3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild Impulsgenerator/Zuleitung/Luftspule

Das Arbeitsprinzip des Impulsgenerators zeigt Bild 2.3. Eine Kondensatoren-Batterie C wird über einen Zweiweggleichrichter G aus einem Hochspannungstransformator HT aufgeladen. Beim Erreichen der vorher eingestellten Ladespannung U_{soll} wird der Ladevorgang beendet und ein Stromimpuls kann ausgelöst werden. Als Schalter S werden zwei parallel geschaltete schnelle Hochstromthyristoren verwendet. Beim Nulldurchgang schalten die Hochstromthyristoren ab. Vom Zeitpunkt der Auslösung des Stromimpulses bis zum Nulldurchgang ist das System Impulsgenerator – Zuleitung – Luftspule vereinfacht als RLC-Reihenschaltung modellierbar. Der auf die Spannung U_{soll} aufgeladene Kondensator C entlädt sich über die Induktivität L und den Widerstand R. Dabei entsteht als Impuls $I(t)$ die erste Halbwelle einer gedämpften Schwingung. Die Induktivität L ergibt sich aus der Serienschaltung der Induktivität der Spule und der Innen-Induktivität des Impulsgenerators. Der Widerstand R ist die Summe des Innenwiderstands des Impulsgenerators, des Ohmschen Widerstands der Spule sowie des Widerstands der Zuleitung.

Für den Strom $I(t)$ der RLC-Reihenschaltung gilt die Differentialgleichung

$$\frac{d^2 I(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{LC} I(t) = 0$$

Mit $\gamma \equiv \frac{R}{L}$ und $\omega \equiv \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{\gamma^2}{4}}$ lautet die Lösung

$$I(t) = \frac{U_{soll}}{\omega L} e^{-\frac{\gamma}{2}t} \sin(\omega t) \equiv I_{max} e^{-\frac{\gamma}{2}t} \sin(\omega t) \approx I_{max} \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Gl. (2.1) beschreibt eine gedämpfte Schwingung. Jedoch endet die Schwingung bereits nach dem ersten Nulldurchgang, weil Hochstromthyristoren den Vorgang beenden. Es entsteht näherungsweise ein Halbsinus-Impuls.

Die vom Strom $I(t)$ durchflossene Spule erzeugt ein zeitlich veränderliches Magnetfeld $B(t) \sim H(t) \sim I(t)$.

Für den magnetischen Fluss $\Phi(t)$ gilt analog $\Phi(t) \sim B(t) \sim I(t)$.

Nach dem Induktionsgesetz $U_{ind}(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$ wird durch eine Flussänderung $\frac{d\Phi(t)}{dt}$ eine Spannung $U_{ind}(t)$ induziert, die für die Entstehung der Wirbelströme verantwortlich ist. Für die induzierte Spannung $U_{ind}(t)$ gilt somit

$$U_{ind}(t) \sim \frac{dI(t)}{dt}$$

Aus diesem Grunde ist $\frac{dI(t)}{dt}$ ebenso von Interesse wie $I(t)$ selbst.

Es gilt

$$U_{ind} \sim \frac{dI(t)}{dt} = \frac{U_{soll}}{L} e^{-\frac{\gamma}{2}t} \left(\cos \omega t - \frac{\gamma}{2\omega} \sin \omega t \right)$$

Die Form des Stromimpulses $I(t)$ bzw. dessen Zeitableitung $\frac{dI(t)}{dt}$ wird durch den Widerstand der Zuleitung beeinflusst.

Um diesen Einfluss zu ermitteln, wurde $I(t)$ bzw. $\frac{dI(t)}{dt}$ für die Leitungslängen 0m, 3m und 7m berechnet (Bild 2.4, a)). Zum Vergleich sind in Bild 2.4 b) die gemessenen Werte für die Leitungslänge von 7m dargestellt. Der Stromimpuls wurde von der BNC-Buchse „ U_{Mess} “ des Impulsmagnetisators direkt dem Speicheroszilloskop zugeführt. Die induzierte Spannung $U_{ind}(t) \sim \frac{dI(t)}{dt}$ wurde mit Hilfe einer kleinen Luftspule, die sich zur Vermeidung von Gegenkopplung in ausreichender Entfernung zur felderzeugenden Luftspule befand, ebenfalls direkt dem Speicheroszilloskop zugeführt.

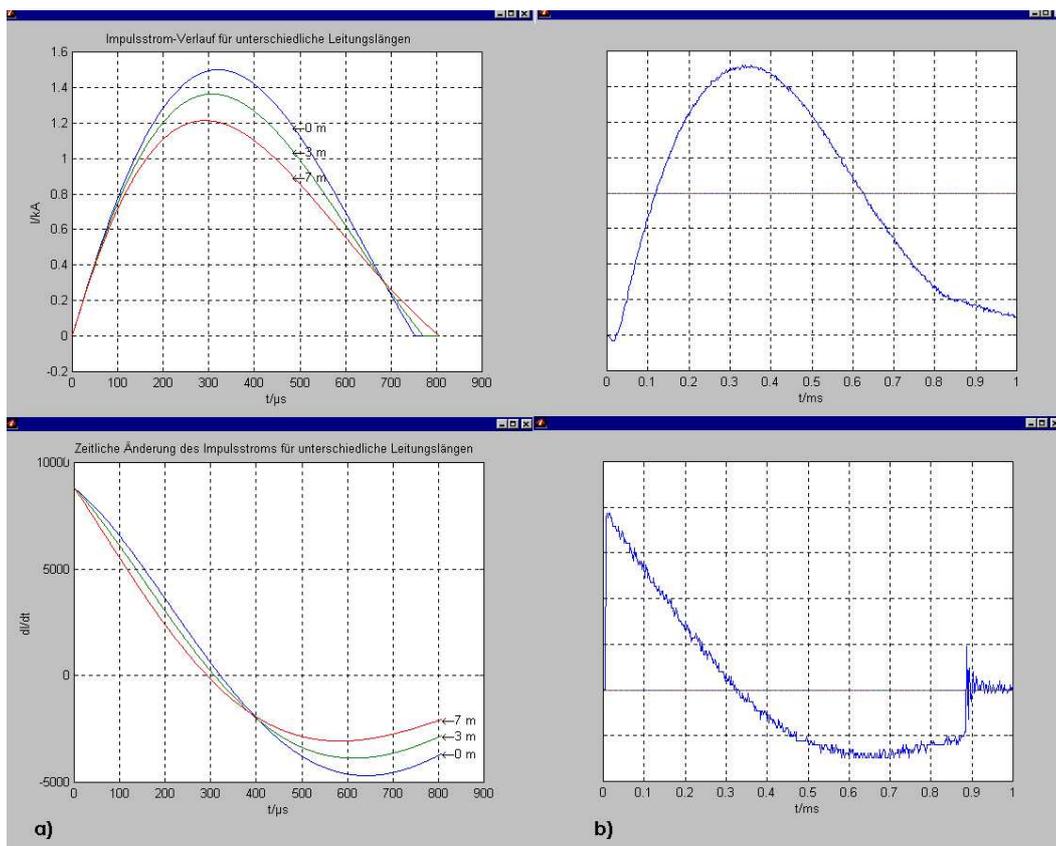


Bild 2.4: Stromimpuls und induzierte Spannung, a) berechnet und b) gemessen

Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Ergebnisse. Bemerkenswert ist die geringe Abhängigkeit der Impulsbreite und die etwas stärkere Abhängigkeit der Impulshöhe von der Leitungslänge. Durch Erhöhung des Leitungsquerschnitts (z. Bt. 4 mm^2) könnte die Abhängigkeit von der Leitungslänge weiter verringert werden.

Bei der gemessenen induzierten Spannung (Bild 2.4 rechts unten) erstreckt sich der steile Flankenanstieg bei 0 ms über einen Zeitraum von nur $0,75 \mu\text{s}$ (direkte Messung am Oszilloskop). Zu Beginn des Impulses herrscht eine geringe magnetische Feldstärke, dafür wird aber eine sehr hohe Spannung $U_{ind}(t) \sim \frac{dI(t)}{dt}$ induziert. Das lässt vermuten, dass zu Anfang des Impulses ausschließlich Wirbelströme zur Wirkung kommen.

ausschließlich Wirbelströme zur Wirkung kommen.

Bei ca. $0,3 \text{ ms}$ findet ein Vorzeichenwechsel der induzierten Spannung $U_{ind}(t)$ statt.

Bei ca. $0,9 \text{ ms}$ schalten die Thyristoren ab, wobei ein Überschwingen aufgrund des Abschaltvorganges zu beobachten ist.

Luftspule

Für die ersten Messungen an den Labormustern wurde als Impulsspule eine Zylinder-(Luft-) Spule mit den Abmessungen aus Bild 2.5 verwendet.

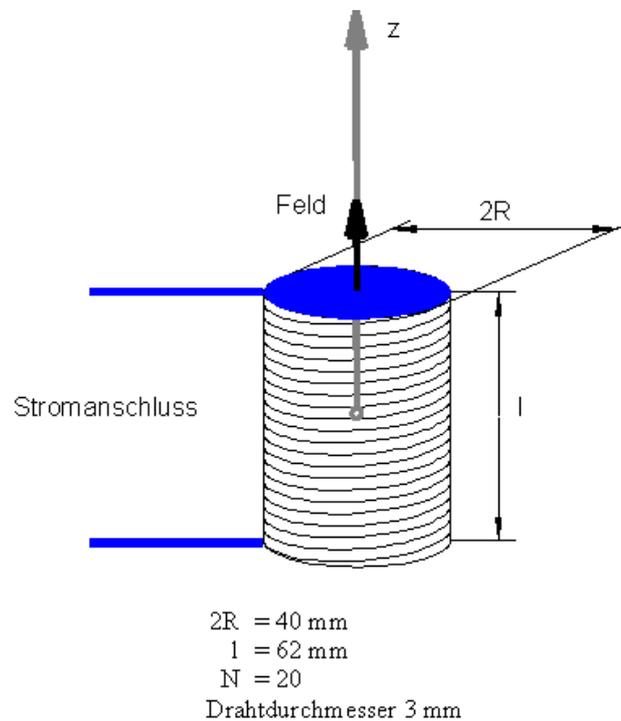


Bild 2.5: Zylinderspule

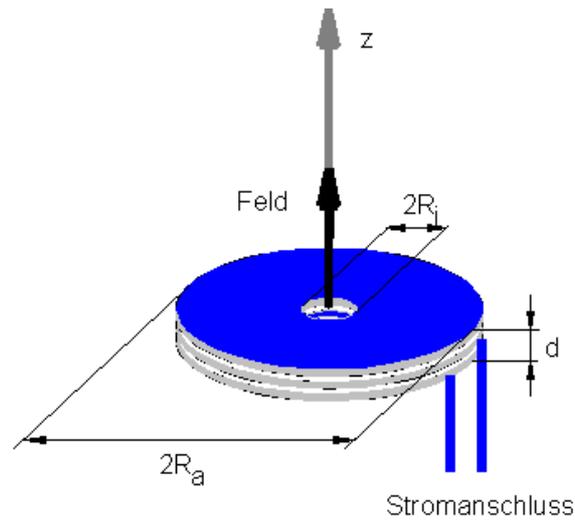
Die Stirnfläche der Spule wird dabei parallel zur Oberfläche des Betonbalkens angeordnet. Die Hauptkomponente des Magnetfeldes (B_z) wirkt so senkrecht auf den zu detektierenden Spannstahl (x-Richtung), erregt vorwiegend transversale Schwingungen und zeigt die ebenfalls in Bild 2.5 dargestellte Abnahme in z-Richtung. Da mit

$$B_z = \mu_0 \frac{nI}{2l} \left[\frac{z + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(z + \frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(z - \frac{l}{2}\right)^2}} \right]$$

das Feld der vorliegenden Zylinderspule von der Spulenmitte ($z = 0$) bis zum Spulenende ($z = l/2 = 3,1$ cm) bereits um 43% abnimmt, war eine Spulenoptimierung hinsichtlich geringerer Feldabnahme im Außenraum erforderlich.

Setzt man die Nutzfeldstärke an der Spulen-Stirnfläche ($z = 3,1$ cm) gleich 100%, so fällt sie im Abstand 3 cm auf 15% und im Abstand 5cm auf 6% ab.

Die Suche nach einer verbesserten Spulengeometrie erfolgte mit Hilfe von numerischen Feldberechnungen nach [2], wobei sich zunächst eine spiralförmige Anordnung der felderzeugenden Drähte anbot (Bild 2.6). Eine Verbesserung der Nutzfeldabnahme wurde durch eine Aussparung der Ebenenmitte (Durchmesser $2R_i$) und die Anordnung von 2 Ebenen übereinander (Abstand d) erreicht.

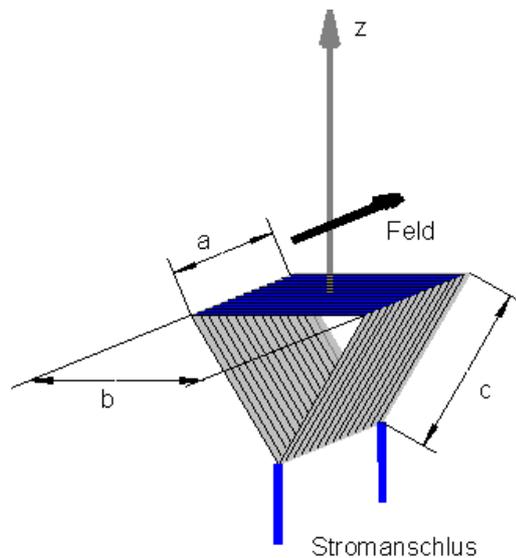


$2R_a = 100 \text{ mm}$
 $2R_i = 46 \text{ mm}$
 $N = 2 \times 10$
 $d = 8 \text{ mm}$
 Drahtdurchmesser 3 mm

Bild 2.6: Doppelspirale

Diese Doppelspirale wurde nach rechnerischer Optimierung mit den Abmessungen Bild 2.6 hergestellt. Die Abnahme der Nutzfeldstärke beträgt in z-Richtung analog zu den Angaben der Zylinderspule 100%; 35%, 18%.

Eine weitere Verbesserung der Abstandsabhängigkeit lässt sich mit einer parallelen Anordnung der felderzeugenden Drähte in einer Ebene erzielen (Bild 2.7).



$a=b=c=100 \text{ mm}$
 $N=33$
 Drahtdurchmesser 3 mm

Bild 2.7: Dreikantspule

Hierzu wurde eine Dreikantspule gemäß Bild 2.7 optimiert; deren Nutzfeldstärke liegt dann parallel zur Spulenachse bzw. senkrecht zur Spulenfläche (B_x - Komponente). Die prozentuale Feldabnahme in z-Richtung beträgt 100%; 55%; 33%. Die Hauptkomponente des Feldimpulses wirkt also in x-Richtung und kann longitudinale Schwingungen anregen.

Bild 2.8 zeigt einige Ergebnisse der Feldberechnungen in einer Zusammenstellung.

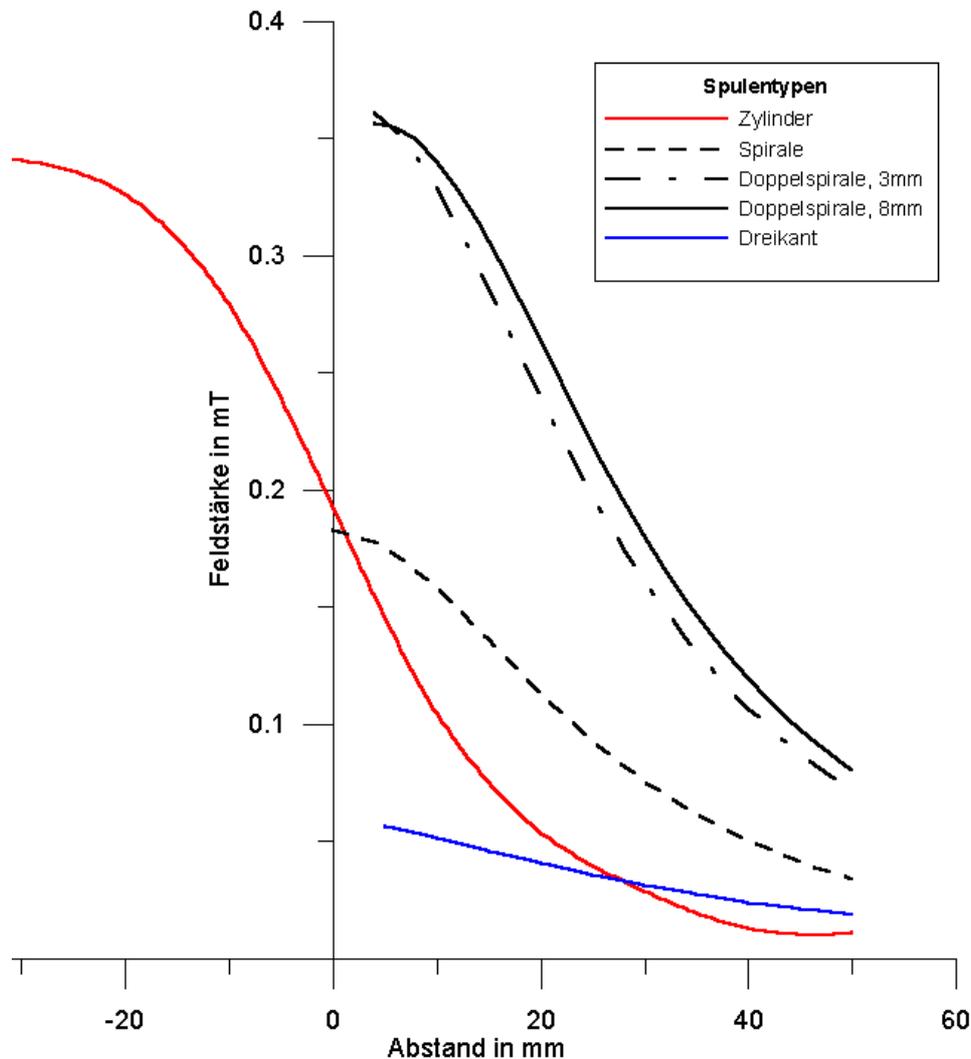


Bild 2.8: Feldberechnung

Die relativ niedrigen Absolutwerte der B_z - Komponente für die Dreikantspule lassen sich durch eine Erhöhung der Spulenstromstärke zu hinreichend großen Feldimpulsen steigern.

Die beiden neu hergestellten Feldspulen (Doppelspirale und Dreikantspule) wurden außerdem im Magnetfeldmeßplatz des Bereichs Physik der HTW ausgemessen, wobei die Ergebnisse der Berechnungen bestätigt wurden.

Bild 2.9 und Bild 2.10 zeigen die Nutzfeldstärken im Außenraum der Spulen.

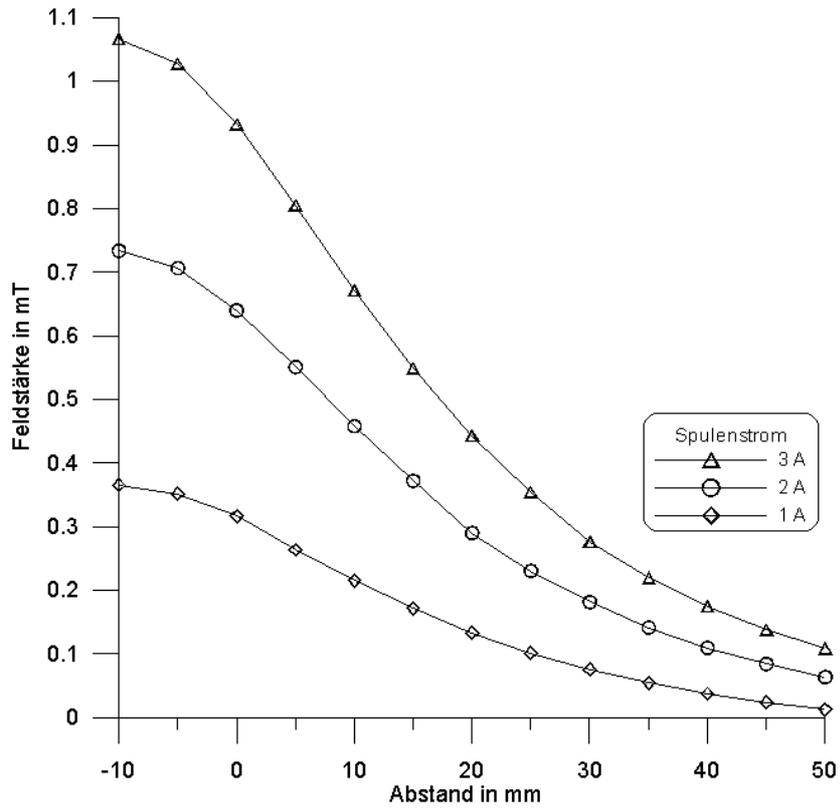


Bild 2.9: Messergebnisse Doppelspirale

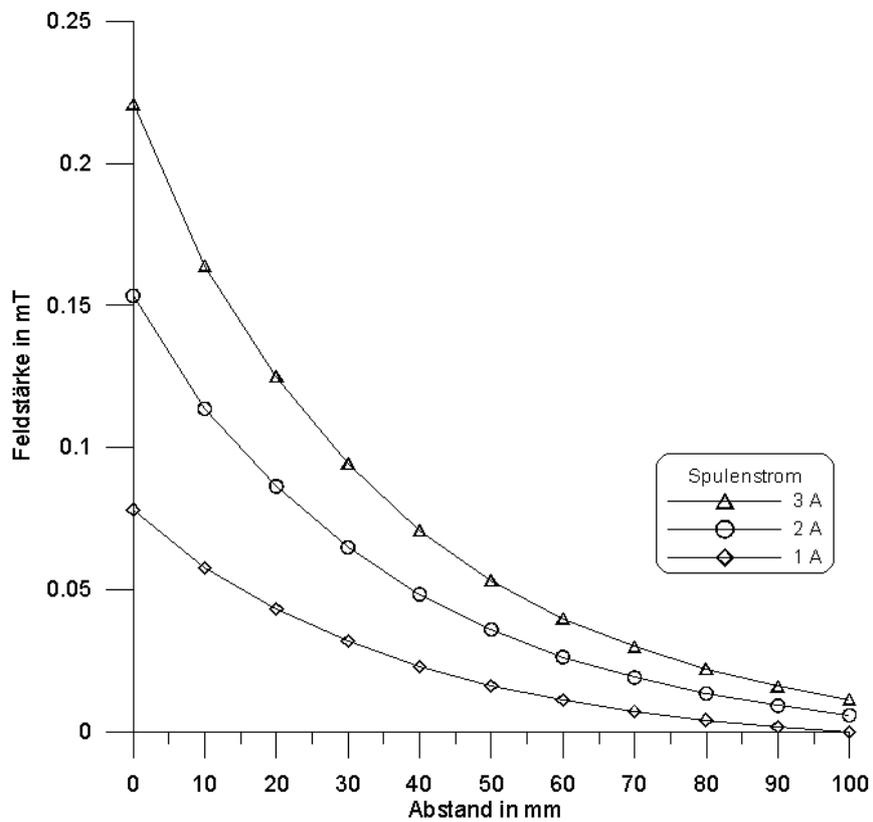


Bild 2.10: Messergebnisse Dreikantspule

Für die weiteren Untersuchungen wird die Doppelspirale (Bild 2.6) verwendet, die hinsichtlich des Magnetfeldverlaufes in z-Richtung optimiert wurde. Für die Beurteilung der Reichweite des Magnetfeldes ist nicht nur die magnetische Feldstärke auf der z-Achse der Spule maßgebend, sondern Feldstärke und -richtung im gesamten näheren Raumgebiet sind von Interesse. Dazu ist es notwendig, das Feld der Spule durch Überlagerung der Feldstärkeanteile der einzelnen Stromringe zu berechnen.

Zur Berechnung des Magnetfeldes eines kreisförmigen Stromringes (Radius R_S) wird das Bio-Savart'sche Gesetz [3] herangezogen:

$$\vec{H} = \frac{J}{4\pi} \oint \frac{d\vec{s} \times (\vec{r} - \vec{s})}{|\vec{r} - \vec{s}|^3}$$

Der Stromring liege in einer Ebene parallel zur x-y-Ebene, der Kreismittelpunkt in der z-Achse (Bild 2.11).

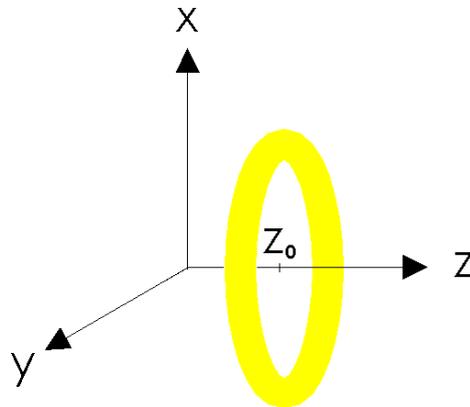


Bild 2.11: Koordinatensystem für den Stromring

Dann gilt

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} R_S \cos \varphi \\ R_S \sin \varphi \\ z_0 \end{pmatrix} \quad \vec{r} - \vec{s} = \begin{pmatrix} x - R_S \cos \varphi \\ y - R_S \sin \varphi \\ z - z_0 \end{pmatrix} \quad d\vec{s} = \begin{pmatrix} -R_S \sin \varphi d\varphi \\ R_S \cos \varphi d\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$d\vec{s} \times (\vec{r} - \vec{s}) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ -R_S \sin \varphi d\varphi & R_S \cos \varphi d\varphi & 0 \\ x - R_S \cos \varphi & y - R_S \sin \varphi & z - z_0 \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} R_S(z - z_0) \cos \varphi d\varphi \\ R_S(z - z_0) \sin \varphi d\varphi \\ R_S(R_S - (x \cos \varphi + y \sin \varphi)) d\varphi \end{pmatrix}$$

Wegen der Rotationssymmetrie der Anordnung um die z-Achse kann man o. B. d. A. den Aufpunkt \vec{r} in die x-z-Ebene legen, es folgt mit $y = 0$ und $k \equiv \frac{2R_S x}{R_S^2 + x^2 + (z - z_0)^2}$

$$H_x = \frac{JR_S(z - z_0)}{4\pi \sqrt{R_S^2 + x^2 + (z - z_0)^2}^3} \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - k \cos \varphi}^3}$$

$$H_y = \frac{JR_S(z - z_0)}{4\pi\sqrt{R_S^2 + x^2 + (z - z_0)^2}^3} \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - k \cos \varphi}^3} \equiv 0 \text{ in der x-z-Ebene}$$

$$H_z = \frac{JR_S}{4\pi\sqrt{R_S^2 + x^2 + (z - z_0)^2}^3} \left(R_S \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{1}{\sqrt{1 - k \cos \varphi}^3} - x \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - k \cos \varphi}^3} \right)$$

Für diese (elliptischen) Integrale existiert keine geschlossene Lösung, sie müssen numerisch gelöst werden. Bild 2.12 zeigt den Verlauf der magnetischen Feldstärke in 3D-Ansicht, seitlich, von oben und schließlich das Feldlinienbild. Typisch ist die starke Abnahme des Betrages der Feldstärke mit wachsendem Abstand. Außerdem ändert sich mit wachsendem Abstand die Richtung der Feldstärke von achsial in radial. Die Ansicht von oben verdeutlicht, dass die Reichweite des Feldes ungefähr dem größten Drahtingradius entspricht.

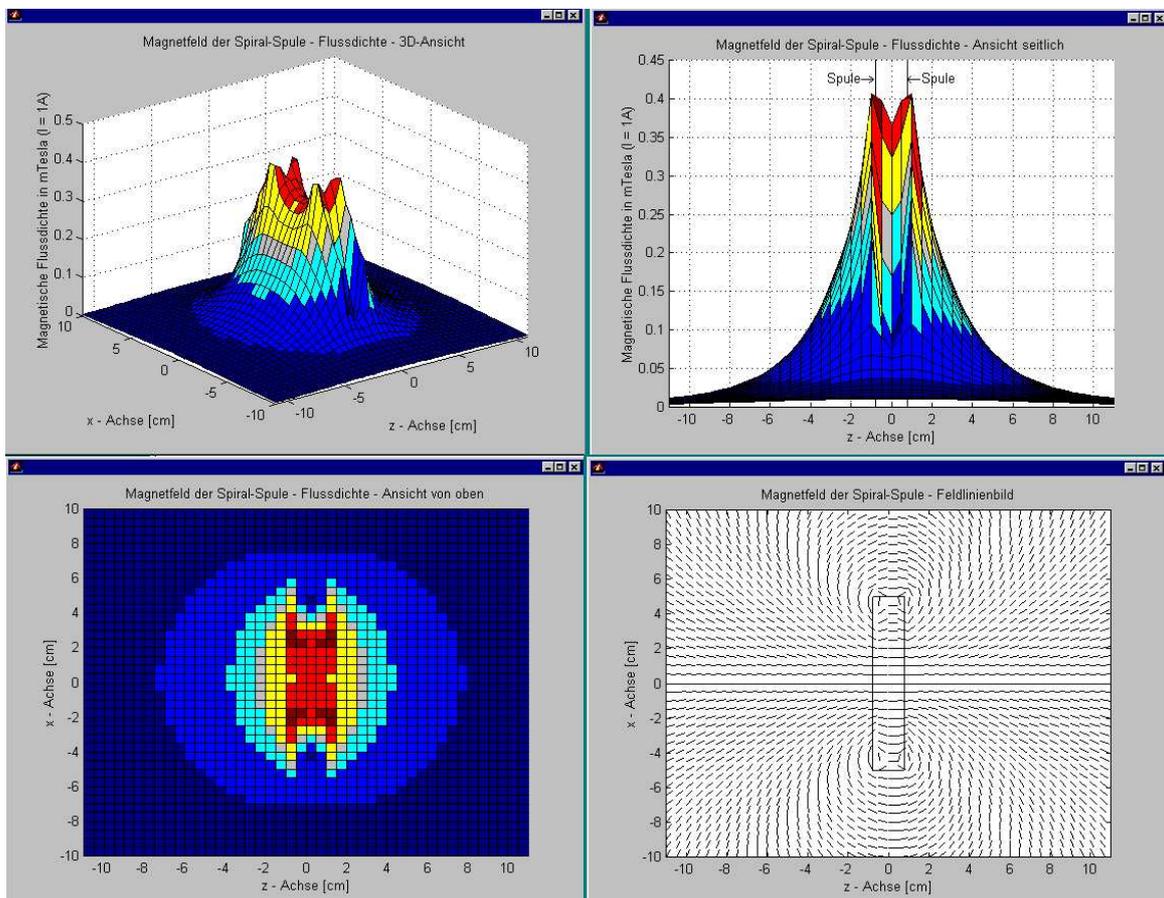


Bild 2.12: Magnetfeld der Doppelspiralspule

Der dargestellte Feldstärkeverlauf gilt für nichtferromagnetische Materialien. Der im Beton befindliche Stahl „verbiegt“ die Feldlinien zusätzlich.

Messobjekte

Als Messobjekte wurden verwendet

- | | | |
|--------------------|--|-----------------------|
| (1) | Betonbalken 200 cm, Stahlstange intakt, | Beton 3cm |
| (2) | Betonbalken 200 cm, Stahlstange mittig unterbrochen, | Beton 3cm |
| (3) | Betonbalken 70 cm, Stahlstange intakt, | Beton 3cm/4cm/9cm |
| (4) | Betonbalken 70 cm, Stahlstange mittig unterbrochen, | Beton 3cm/4cm/9cm |
| (5) | Betonbalken 70 cm, Stahlstange mittig unterbrochen, | Beton 5cm/6cm/7cm |
| (6) | Betonbalken 70 cm, Stahlstange mittig unterbrochen, | Beton 3cm/4cm/8cm/9cm |
| (7) Verbundprobe: | | |
| | Betonbalken 70 cm, Stahlstange mittig unterbrochen,
Stahlstange intakt im Abstand 20cm
neben der unterbrochenen Stange | Beton 3cm |
| (8) Hüllrohrprobe: | | |
| | Betonbalken 70 cm, Stahlstange mittig unterbrochen,
Stahlstange von Hüllrohr
umgeben und verpresst | Beton 3cm |

In Bild 2.13 befindet sich im Vordergrund das Messobjekt (4), dahinter das Messobjekt (2).

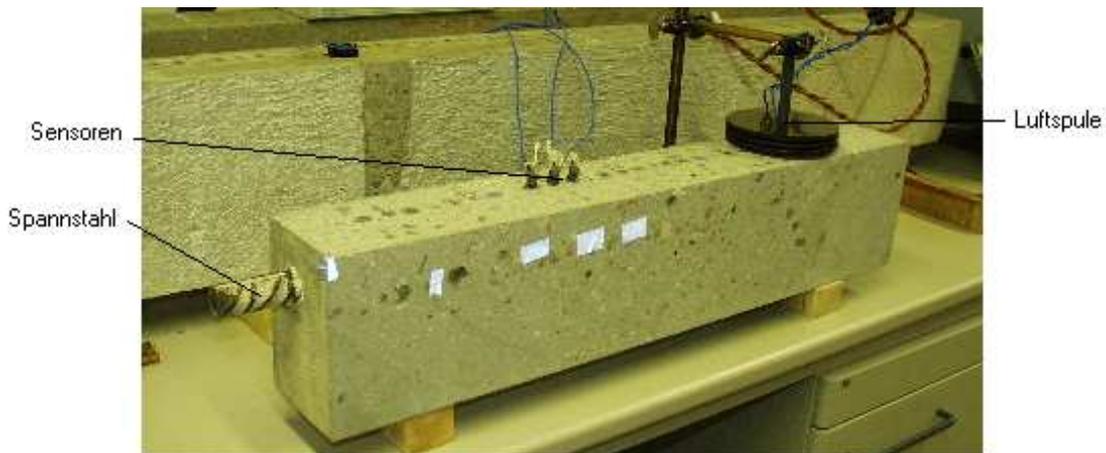


Bild 2.13: Betonbalken

Sensorik

Als Sensoren für die Signalaufnahme werden Beschleunigungsaufnehmer PCB M353B15 mit einer Empfindlichkeit von 10 mV/g verwendet, die mit einem Spezialwachs auf den Beton geklebt werden (Bild 2.14).

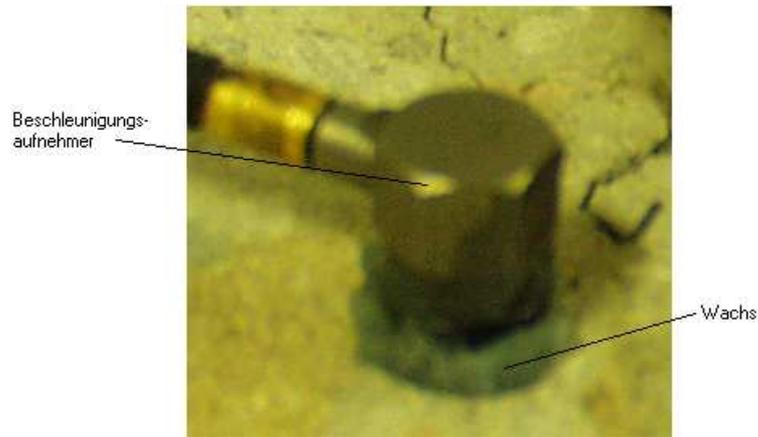


Bild 2.14: Beschleunigungsaufnehmer

Signalerfassung und –verarbeitung

Bild 2.15 zeigt die Geräte für die Signalerfassung und –verarbeitung. Zur Signalanpassung und –verstärkung wird ein Signalverstärker PCB 442B104 mit der Einstellung 1:100 verwendet. Zur Signaldarstellung und –speicherung wird ein Speicheroszilloskop LeCroy LC534A verwendet.

Als Messrechner wird ein PC Intel Pentium III mit dem Betriebssystem Windows98 verwendet, der über ein 9-poliges RS232C-Nullmodemkabel mit dem Speicheroszilloskop Le Croy LC534A verbunden ist .

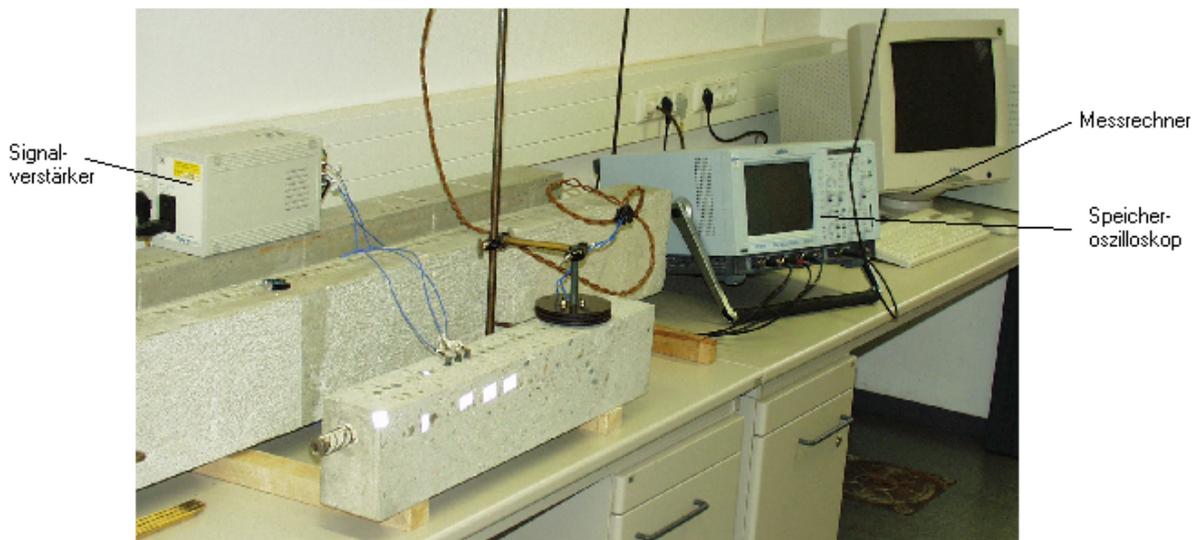


Bild 2.15: Geräte zur Signalerfassung und –verarbeitung

3. Analyse des Wirkungsmechanismus

3.1 Wechselwirkung zwischen Magnetfeldimpuls und Metall

Bei einer starken impulsartigen Magnetisierung ferromagnetischer Materialien zeigte sich, dass die Materialien während der Magnetisierung akustische Signale im Hörbereich abgaben. Offensichtlich findet bei dem beobachteten Phänomen eine schnelle Umwandlung von magnetischer in mechanische Energie statt, wobei Schallwellen (Körper- und Luftschall) frei werden.

Im vorliegenden Projekt sollte geprüft werden, ob sich diese Erscheinung zur zerstörungsfreien Prüfung von Spannstählen in Beton nutzen lässt.

Zunächst wurde versucht, den Wirkungsmechanismus der magnetisch-mechanischen Energiewandlung zu klären. Die genauere Kenntnis der bei der Energieumwandlung beteiligten physikalischen Effekte und ihrer Wechselwirkungen ist Voraussetzung für die Entwicklung und Optimierung des zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Spannbeton.

Ziel der ersten Untersuchungen war es, durch geeignete Experimente die einzelnen physikalischen Effekte möglichst isoliert darzustellen und ihre Anteile an der Generierung von Schallwellen abzuschätzen.

Wirkt ein zeitlich schnell veränderliches Magnetfeld $\vec{B}(t)$ auf ein elektrisch leitfähiges Material ein, sind folgende Wirkungen zu erwarten (Bild 3.1):

- 1) Kraftwirkungen aufgrund induzierter Wirbelströme
- 2) thermische Ausdehnung aufgrund induzierter Wirbelströme

Bei ferromagnetischen Materialien kommen folgende Wirkungen hinzu:

- 3) magnetische Anziehungskräfte im inhomogenen Feld $\vec{B}(t, \vec{r})$
- 4) Ausdehnung oder Kontraktion durch Magnetostriktion

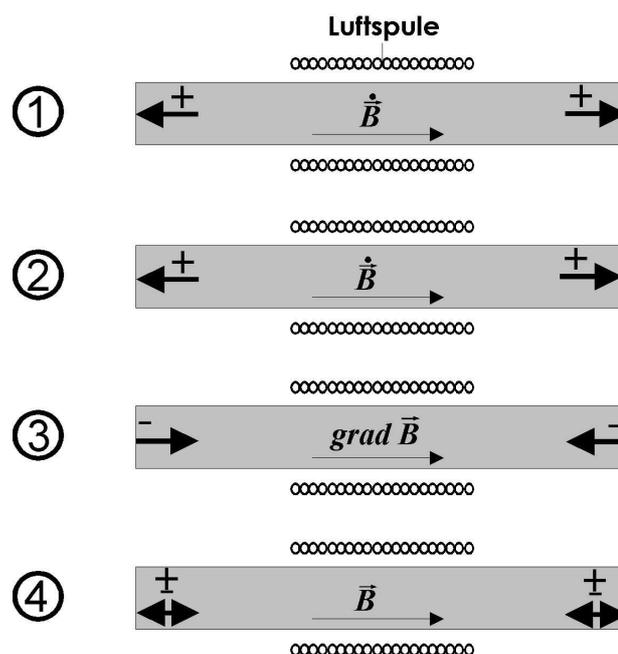


Bild 3.1: Richtungen der Kräfte nach 1) bis 4)

Die Lorentz-Kräfte, die durch induzierte Wirbelströme hervorgerufen werden, sind wegen der Lenzschen Regel nach außen gerichtet (Abstoßung), sie werden mit positivem Vorzeichen versehen.

Kräfte, die infolge thermischer Dehnung aufgrund induzierter Wirbelströme entstehen, sind ebenfalls nach außen gerichtet.

Die magnetischen Anziehungskräfte sind nach innen gerichtet (entgegen dem Feldgradienten) und werden mit negativem Vorzeichen versehen.

Kräfte, die durch Magnetostriktion entstehen, können in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke beide Richtungen und Vorzeichen annehmen.

Die genannten Effekte können eine Längen- und/oder Volumenänderung des Materials bewirken. Erfolgt die zeitliche Änderung des Magnetfeldes $\vec{B}(t)$ ausreichend schnell, wird die Längen- und/oder Volumenänderung in Schallimpulse (Körperschall und Luftschall) umgesetzt. Es findet eine Umwandlung von magnetischer Energie in akustische Energie statt.

Die Messung der Körperschallimpulse erfolgt mit Beschleunigungsaufnehmern, wobei die Messergebnisse als Oszillogramme erscheinen. Im Rahmen dieser Methode wird nur der akustische Gesamteffekt summarisch erfasst. Allerdings lässt sich zur detaillierteren Untersuchung folgende Besonderheit nutzen:

Bei Nichteisenmetallen kommen nur Wirbelströme und daraus resultierende Kräfte, nicht aber magnetische Kräfte oder Magnetostriktion zur Wirkung. Wird die Wirkung der Wirbelströme bei mehreren Nichteisenmetallen gemessen, kann auch die Wirkung der Wirbelströme in Eisen bestimmt werden. Dieser Weg wird besprochen. Auf der Basis eines einfachen mathematischen Modells wird der Anteil der Wirbelströme bei Eisen abgeschätzt.

Schwieriger ist die Ermittlung des Anteils der Magnetostriktion. Hier wird ein Berechnungsverfahren genutzt, das den bekannten Verlauf der Magnetostriktion $\lambda = \lambda(H)$ heranzieht. Daraus ist dann die zu erwartende Beschleunigung $b(t)$ zu berechnen.

3.2 Messaufbau zur Analyse des Wirkungsmechanismus

Für den Messaufbau wurden der Impuls-generator, die Beschleunigungsaufnehmer, der Signalverstärker und das Digitaloszilloskop aus 2. verwendet; Messobjekte waren verschiedene Metallstäbe, über die sich eine zylindrische Luftspule berührungslos schieben ließ (Bild 3.2).

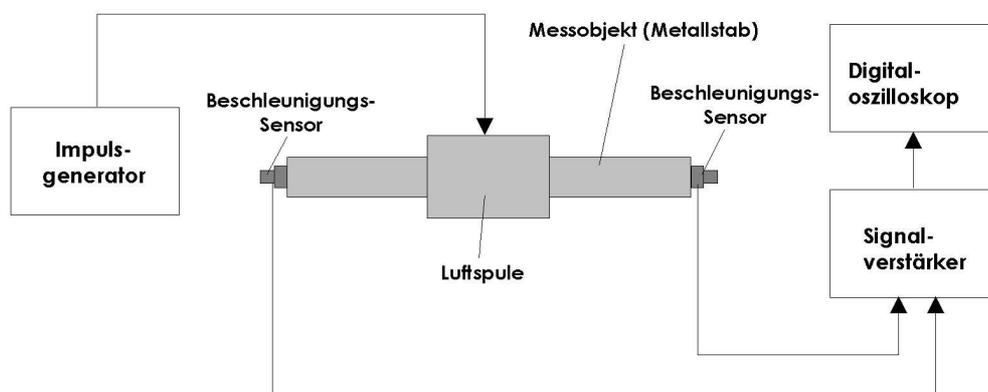


Bild 3.2: Blockbild Messaufbau

Für diese ersten orientierenden Untersuchungen wurde eine Luftspule auf einem isolierenden Träger verwendet. Wegen der starken magnetischen Kräfte sind Spule und Träger fest verklebt. (Bild 3.3). Die Windungszahl ist $N = 20$ und die Drahtstärke $d = 1,8$ mm.

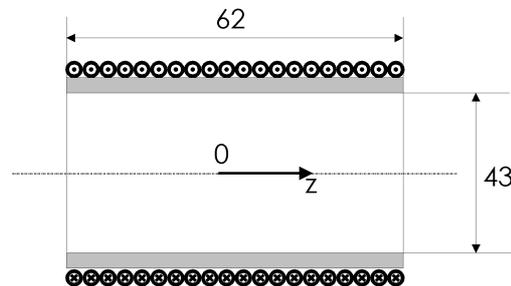


Bild 3.3: Luftspule, Längsschnitt

Für die magnetische Flussdichte $B(z,t)$ einer Luftspule auf der z -Achse gilt nach [4]

$$B(z,t) = \frac{\mu_0 N I(t)}{2l} \left(\frac{z + \frac{l}{2}}{\sqrt{R_s^2 + \left(z + \frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{l}{2}}{\sqrt{R_s^2 + \left(z - \frac{l}{2}\right)^2}} \right)$$

In der Spulenmitte ($z = 0$) ist $B(0,t)$ maximal

$$B(0,t) = \frac{\mu_0 N I(t)}{2l} \left(\frac{\frac{l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{-\frac{l}{2}}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \right) = \frac{\mu_0 N I(t)}{l} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{l}\right)^2}} \quad (3.1)$$

wobei Gl. (2.1) für $I(t)$ einzusetzen ist.

Die Induktivität einer sehr langen Luftspule wird nach der Formel

$$L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l} = \mu_0 N^2 \frac{\pi r^2}{l} \quad (3.2)$$

berechnet. Dabei wird der Einfluss der Streufelder an den Enden der Spule vernachlässigt. Bei der vorliegenden kurzen Luftspule dürfen jedoch die Streufelder nicht vernachlässigt werden. Sie werden dadurch berücksichtigt, dass Gl. (3.2) mit einem von $\frac{l}{r}$ abhängigen Faktor $f\left(\frac{l}{r}\right)$

multipliziert wird, der nach [5] für $\frac{l}{r} = 0,2; 2; 20$ die Werte $f = 0,2; 0,6; \approx 1$

annimmt (Diese Wertetabelle wird durch die Funktion $f\left(\frac{l}{r}\right) = 1 - e^{-0,6\sqrt{\frac{l}{r}}}$ gut

angenähert). Mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ erhält man für die Induktivität der Luftspule $L = 7,52 \mu\text{H}$.

Diese Luftspule wurde hinsichtlich der magnetischen Feldstärke und der Reichweite des Magnetfeldes optimiert (vgl. 2.).

Als Messobjekte wurden Metallstäbe aus Aluminium-Vollmaterial, zwei unterschiedlichen Aluminium-Laminaten, Messing-Vollmaterial und Stahl-Vollmaterial verwendet. Die Messobjekte haben gleiche Abmessungen (200 x 20 x 20) mm³. Die Abmessungen ergaben sich aus Vorversuchen mit Messobjekten, die bei Anregung durch magnetische Impulse deutlich wahrnehmbare akustische Signale lieferten.

Zur Signalaufnahme werden Beschleunigungsaufnehmer PCB M353B15 (Empfindlichkeit 10 mV/g), zur Signalanpassung und -verstärkung wird ein Signalverstärker PCB 442B104 mit der Einstellung 1:1 (d. h. keine Verstärkung, nur Anpassung des Signals) und zur Signaldarstellung und -speicherung wird ein Speicheroszilloskop LeCroy LC534A verwendet.

Es wurden 2 Messanordnungen gewählt, eine symmetrische und eine asymmetrische. In beiden Fällen ist der Metallstab in waagerechter Richtung frei beweglich aufgehängt.

Die Wahl der Messanordnungen ist folgendermaßen zu begründen:

Die symmetrische Messanordnung weist den denkbar höchsten Symmetriegrad auf und ist dadurch charakterisiert, dass Spulenachse und Stabachse sowie Spulenmittelpunkt und Stabmittelpunkt zusammenfallen. Bei der asymmetrischen Messanordnung fallen Spulen- und Stabmittelpunkt nicht zusammen. Es können somit resultierende Kraftwirkungen untersucht werden, die auf den Stab als starren Körper wirken.

Bei der symmetrischen Messanordnung (Bild 3.4) wirken während des Magnetimpulses im Messobjekt symmetrisch gegeneinander gerichtete Kräfte. Diese kompensieren sich, so dass keine Auslenkung des Objektes zu beobachten ist. An den Objektenden werden über die Sensoren Beschleunigungen aufgenommen, die dadurch entstehen, dass der Metallstab aufgrund der Kräfte elastisch verformt wird.

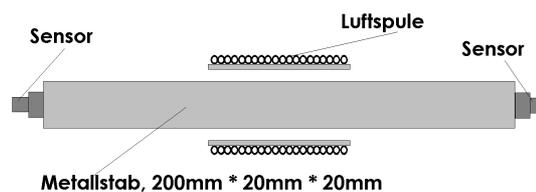


Bild 3.4: Symmetrische Messanordnung

Bei asymmetrischer Messanordnung (Bild 3.5) kompensieren sich die Kräfte nicht und das Objekt erfährt eine resultierende Kraft, was durch eine makroskopische Bewegung sichtbar wird: ein Nichteisenstab wird von der Spule abgestoßen, ein Stahlstab in die Spule hineingezogen.

Bei der asymmetrischen Messanordnung wurde eine optimale Eintauchtiefe von 20 mm gewählt, weil sich dann maximale Beschleunigungen und Auslenkungen am Sensorende ergaben.

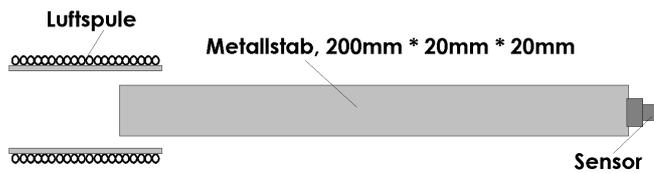


Bild 3.5: Asymmetrische Messanordnung

3.3 Experimentelle Untersuchungen zum magneto-mechanischen Effekt

Bei Nichteisenmetallen wirken ausschließlich Wirbelströme. Dagegen treten bei ferromagnetischen Materialien zusätzlich magnetische Anziehungskräfte und Magnetostriktion auf. Es besteht somit die Möglichkeit, die Wirbelstromeffekte gesondert zu untersuchen und die Ergebnisse auf ferromagnetische Materialien zu übertragen.

3.3.1 Kraftwirkung von Wirbelströmen

Nach dem Induktionsgesetz $\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ erzeugt ein zeitlich veränderliches Magnetfeld $\vec{B}(t)$ ein elektrisches Feld $\vec{E}(t)$, das senkrecht auf $\vec{B}(t)$ steht und aufgrund der rotationssymmetrischen Anordnung stets tangential gerichtet ist, so dass sich Wirbelstromringe $I_W(t)$ ausbilden. In Bild 3.6 ist als Beispiel ein einzelner Wirbelstromring eingezeichnet.

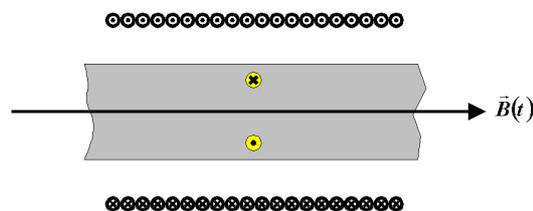


Bild 3.6: Einzelner Wirbelstromring im Messobjekt

Tatsächlich bilden sich viele Wirbelstromringe zu einer Wirbelstromwalze aus (Bild 3.7 bzw. Bild 3.8). (Die Dicke der Wirbelstromringe soll die Stromstärke repräsentieren.) Da in Spulennitte $\left| \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right|$ am größten ist, sind dort auch die Wirbelströme $I_W(t)$ am stärksten. Die Wirbelstromstärke ist dem spezifischen Widerstand ρ des Metalls umgekehrt proportional. Plausibel ist, dass das Messobjekt in der symmetrischen Messanordnung von einer deutlich größeren Wirbelstromwalze durchsetzt wird als bei der asymmetrischen Messanordnung.

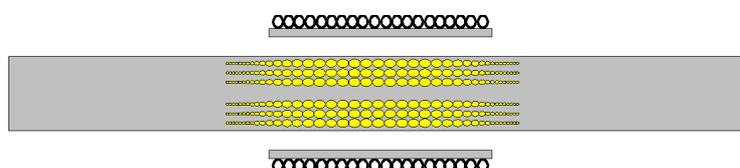


Bild 3.7: Wirbelstromwalze bei symmetrischer Messanordnung



Bild 3.8: Wirbelstromwalze bei asymmetrischer Messanordnung

Auf die induzierten Wirbelstromringe übt das Magnetfeld $\vec{B}(t)$ wiederum Kräfte \vec{F} aus, deren Richtungen diskutiert werden sollen. In Bild 3.9 sind 3 ausgewählte Wirbelstromringe und die magnetischen Feldlinien dargestellt.

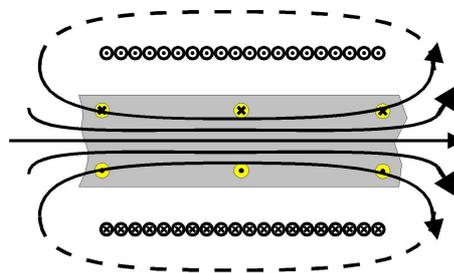


Bild 3.9: Wirbelstromringe im Magnetfeld

Das Magnetfeld \vec{B} übt auf ein Stromelement $I d\vec{r}$ die Lorentz-Kraft $\vec{F} = \int I d\vec{r} \times \vec{B}$ aus. Die dargestellten Richtungen der Kräfte (Bild 3.10) zeigen, dass Kraftkomponenten in Längsrichtung des Stabes nur an den Enden der Spule vorkommen, weil dort das Magnetfeld von der Achsenrichtung abweicht. Diese Kraftkomponenten weisen jeweils nach außen und können den Metallstab dehnen. Im homogenen Feldbereich wirken die Kräfte nur in radialer Richtung. Die axialen Kraftkomponenten im Mittelbereich der Spule, wo die Wirbelströme am größten sind, verschwinden.

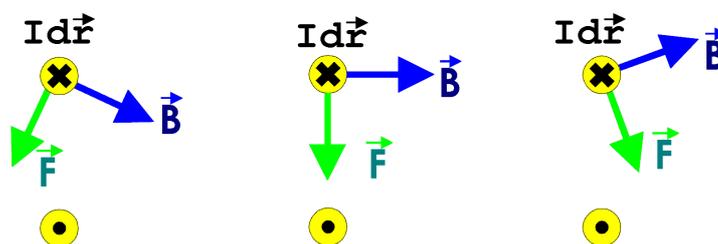


Bild 3.10: Richtungen der Kräfte im Messobjekt

3.3.2 Thermische Wirkung von Wirbelströmen

Wirbelströme erzeugen Wärme. Es ist zu überlegen, ob die bei der impulsartigen Anregung erzeugte Wärme akustisch wirksam werden kann. Dazu müsste kurzzeitig eine starke Temperaturerhöhung erfolgen. Es lässt sich abschätzen, zu welcher Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta(t)$ im Metallstab (Beispiel Aluminium) ein einzelner Magnetisierimpuls führt, wenn sich das

dem Magnetfeld ausgesetzte Volumen bei restloser Umsetzung der magnetischen Feldenergie in Wärme gleichmäßig erwärmt:

Die magnetische Energiedichte w_{magn} eines Magnetfeldes $H(t)$ bzw. $B(t)$ ist gegeben durch

$$w_{magn}(t) = \frac{1}{2} H(t) B(t)$$

Für die magnetische Energie $E_{magn}(t)$ eines Volumens V folgt daraus

$$E_{magn}(t) = \frac{1}{2} H(t) B(t) V = \frac{1}{2} \mu_0 H(t)^2 V$$

Erwärmt sich das Volumen V im Zeitabschnitt $0 \leq t$ um $\Delta\vartheta(t)$, so ist die dafür notwendige Wärmemenge $Q(t)$

$$Q(t) = \rho_{Alu} V c_{Alu} \Delta\vartheta(t)$$

Die Gleichsetzung $E_{magn}(t) = Q(t)$ ergibt mit Gl. (3.1)

$$\Delta\vartheta(t) = \frac{\mu_0 H(t)^2}{2\rho_{Alu} c_{Alu}} = \frac{\mu_0 N^2 I(t)^2}{2\rho_{Alu} c_{Alu} (l^2 + D^2)}$$

Die maximale Temperaturerhöhung

$$\Delta\vartheta_{\max} = \frac{\mu_0 N^2 I_{\max}^2}{2\rho_{Alu} c_{Alu} (l^2 + D^2)}$$

beträgt mit

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$	Induktionskonstante
$\rho_{Alu} = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte (Aluminium)
$c_{Alu} = 0,897 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	spezifische Wärme (Aluminium)
$N = 20$	Windungszahl der Spule
$l = 62 \text{ mm}$	Länge der Spule
$D = 40 \text{ mm}$	Durchmesser der Spule
$I_{\max} = 2 \text{ kA}$	Stromstärke (am Impulsmagnetisator abgelesen, Ladespannung $U_{soll} = 300\text{V}$)

bei einer Zuleitungslänge von 7 m $\Delta\vartheta(t_{\max, 7m}) = 0,07\text{K}$

Die Wärmedehnung und die daraus resultierende Beschleunigung aufgrund der Temperaturerhöhung können abgeschätzt werden. Dabei wird angenommen, dass sich nur der Teil des Stabes ausdehnt, der dem Magnetfeld ausgesetzt ist und dessen Länge mit der Spulenlänge übereinstimmt. Der Stab dehnt sich aus um die Länge

$$\Delta l(t) = l \alpha_{Alu} \Delta \vartheta(t) = l \frac{\mu_0 \alpha_{Alu} N^2 I(t)^2}{2 \rho_{Alu} c_{Alu} (l^2 + D^2)} \approx l \frac{\mu_0 \alpha_{Alu} N^2 I_{\max}^2}{2 \rho_{Alu} c_{Alu} (l^2 + D^2)} \sin^2(\omega t)$$

mit $I(t)$ aus Gl. (2.1). Für die Beschleunigung $b(t)$ ergibt sich

$$b(t) = \frac{d^2 \Delta l(t)}{dt^2} \approx 2 \omega^2 l \frac{\mu_0 \alpha_{Alu} N^2 I_{\max}^2}{2 \rho_{Alu} c_{Alu} (l^2 + D^2)} (1 - 2 \sin^2(\omega t))$$

Für $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ist als Periodendauer T die doppelte Impulsbreite ΔT_7 (Zuleitungslänge 7 m)

$$\text{einzusetzen, d. h. } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\Delta T_7} = \frac{\pi}{\Delta T_7}.$$

Mit $\alpha_{Alu} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\Delta T_7 = 483 \mu\text{s}$ ergibt sich für die Beschleunigung

$$b(0) = +8,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx +g \quad \text{und} \quad b(\Delta T_7) = -8,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx -g$$

Da der Beschleunigungsaufnehmer eine Empfindlichkeit von 10 mV/g aufweist, entspricht die Beschleunigung von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ einer Spannung von 1 mV und die berechnete Beschleunigung von $\pm 8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ einer Spannung von $\pm 8 \text{mV}$. Die bei den Messungen aufgenommenen Spannungswerte liegen bei ca. 500 mV. Die thermische Wirkung der Wirbelströme ist also vernachlässigbar, außerdem wurde eine für Erwärmungsvorgänge viel zu niedrige Zeitdauer angenommen.

3.3.3 Zusammenhang von Magnetisierung – Stromimpuls und Beschleunigung der akustischen Welle

Es wird nun versucht, eine näherungsweise gültige quantitative Beziehung herzustellen zwischen dem Impulsstrom I und der akustischen Wirkung (Messwert y_{Mess} , abgelesen am Oszilloskop, entspricht der Beschleunigung b am Stabende), der auf Wirbelströme zurückzuführen ist. Diese Beziehung soll für verschiedene Nichteisenmetalle gelten und dann auch auf Stahl übertragen werden. Es wird folgendes Prinzip angewendet: Bei identischer Geometrie (gleich lange und dicke Stangen, gleiche Messanordnung) sollte nach expliziter Formulierung der Proportionalitäten zu den zur Wirkung kommenden Materialkonstanten ein für verschiedene Materialien einheitlicher Geometriefaktor K_w existieren, der den quantitativen Zusammenhang einigermaßen genau beschreibt. Die wesentlichste Materialeigenschaft bei der Betrachtung der Wirbelströme ist der spezifische Widerstand ρ . Für die Messwerte y_{Mess} ist zu erwarten:

$$y_{\text{Mess}} \sim I^2 \quad (\text{Magnetfeld})$$

$$y_{\text{Mess}} \sim \frac{1}{\rho} \quad (\text{Wirbelstrom})$$

Berücksichtigt man keine weitere Materialabhängigkeiten, folgt

$$y_{Mess} = K_w \frac{I^2}{\rho} \quad \text{oder} \quad K_w = \frac{y_{Mess}}{I^2} \rho \quad (3.3)$$

Wenn sich herausstellt, dass für die beiden Messanordnungen (symmetrisch/asymmetrisch) zwar unterschiedliche $K_{w,symm}$ und $K_{w,asym}$ ermittelt werden, die aber für verschiedene Nichteisenmetalle näherungsweise übereinstimmen, kann man das Modell auch auf Stahl übertragen. (Dabei bleibt allerdings unberücksichtigt, dass im Stahl die Magnetfeldlinien deformiert werden).

3.3.3.1 Nichteisenmetalle

Während des Magnetimpulses wirkt bei der symmetrischen Messanordnung auf das Messobjekt (NE-Metallstab) in der Summe keine Kraft. Über die Sensoren werden jedoch an den Enden des Messobjektes Beschleunigungen aufgenommen.

Bild 3.11 zeigt am Beispiel Aluminium deutlich das rechts-links-symmetrische Verhalten. Die Schwingung beginnt mit einem Ausschlag nach oben, d. h. einer Bewegung nach „außen“, das entspricht einer Ausdehnung des Messobjektes. Die Schwingungsfrequenz entspricht der Eigenfrequenz für Längsschwingungen eines Stabes der verwendeten Länge und des verwendeten Materials (Aluminium).

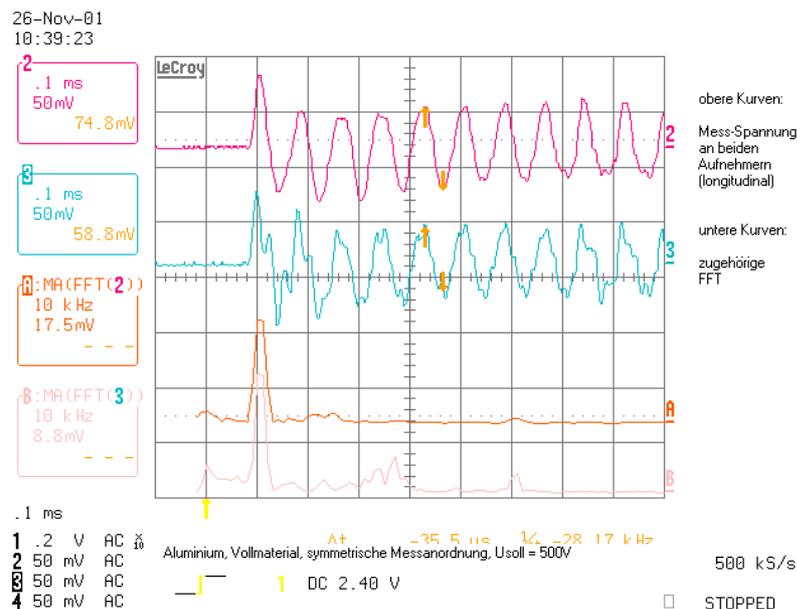


Bild 3.11: Signalverlauf bei Aluminium bei symmetrischer Messanordnung

Bei der asymmetrischen Messanordnung erfährt der Metallstab als starrer Körper eine resultierende Kraft. Auf Bild 3.12 ist ersichtlich, dass die Schwingung auch hier mit einem Ausschlag nach oben beginnt. Die überlagerte Schwingung beginnt ebenfalls nach oben und hat dieselbe Frequenz wie bei der symmetrischen Messanordnung. Zur Auswertung herangezogen wurde bei der asymmetrischen Messanordnung die geglättete Messkurve (Enhanced Resolution 3 Bit).

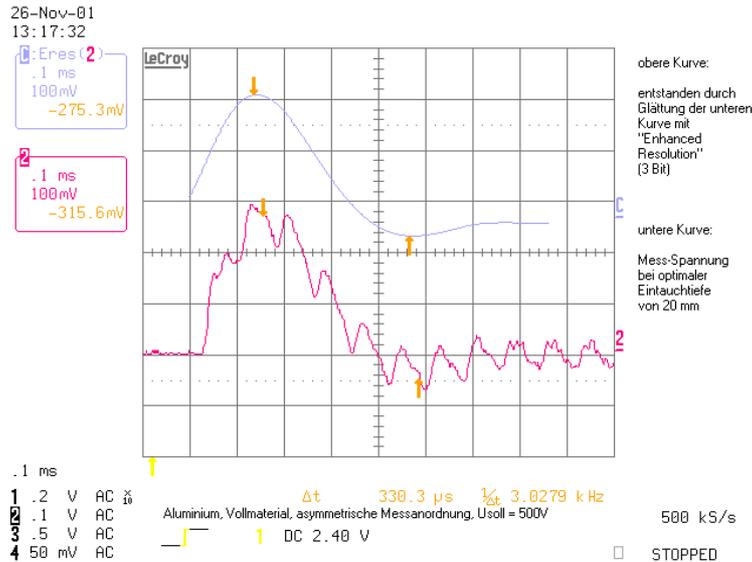


Bild 3.12: Signalverlauf bei Aluminium, asymmetrische Messanordnung

Das am Beispiel Aluminium erläuterte Messverfahren wurde auf verschiedene Nichteisenmetalle angewendet, um Gl. (3.3) zu verifizieren:

Bild 3.13 und Bild 3.14 zeigen die Wirkung der Wirbelströme für mehrere Nichteisenmetalle, die z. T. laminiert wurden, für die symmetrische bzw. die asymmetrische Messanordnung. Durch die Laminierung werden Wirbelströme erwartungsgemäß stark reduziert. Das ist in den Kurven deutlich zu sehen.

Bei der asymmetrischen Messanordnung fällt auf, dass die Kurvenwerte für Aluminium und Messing recht genau die indirekte Proportionalität zu den zugehörigen spezifischen

Widerständen bestätigen. Die Annahme $y_{\text{Mess}} = K_W \frac{I^2}{\rho}$ trifft also im asymmetrischen Fall

recht gut zu. Die Messwerte geben einen makroskopischen Bewegungsablauf wieder, der von der Elastizität des Materials kaum abhängt.

Bei der symmetrischen Messanordnung repräsentieren die Messwerte keinen makroskopischen Bewegungsablauf, sondern nur eine longitudinale Schwingung.

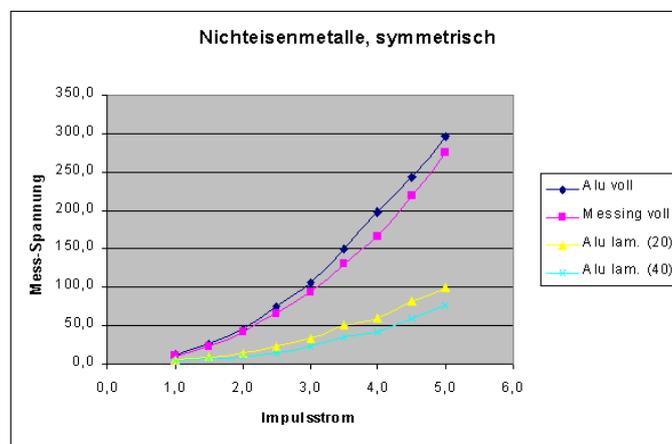


Bild 3.13: Impulsstromabhängige Beschleunigung bei Nichteisenmetallen, symmetrische Messanordnung

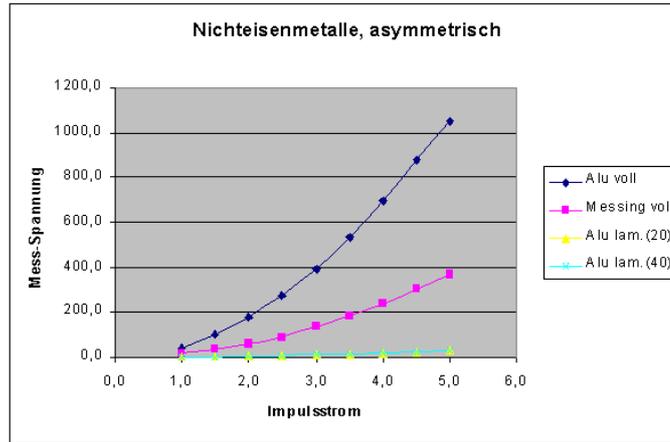


Bild 3.14: Impulsstromabhängige Beschleunigung bei Nichteisenmetallen, asymm. Messanordnung

Der nahezu konstante Verlauf sämtlicher Geometriefaktoren K_W in Abhängigkeit vom Impulsstrom (Bild 3.15) bestätigt die Proportionalität $y_{Mess} \sim I^2$ sehr gut. Dass die Kurven $K_{W,sym,Alu}$ und $K_{W,sym,Messing}$ einerseits und $K_{W,asym,Alu}$ und $K_{W,asym,Messing}$ andererseits nicht besser zusammenfallen, zeigt, dass das Modell $y_{Mess} = K_W \frac{I^2}{\rho}$ weitere Materialabhängigkeiten unberücksichtigt lässt. Dennoch ist das Modell ausreichend, um Schlussfolgerungen auf den Anteil der Wirbelströme in Stahl zu ziehen.

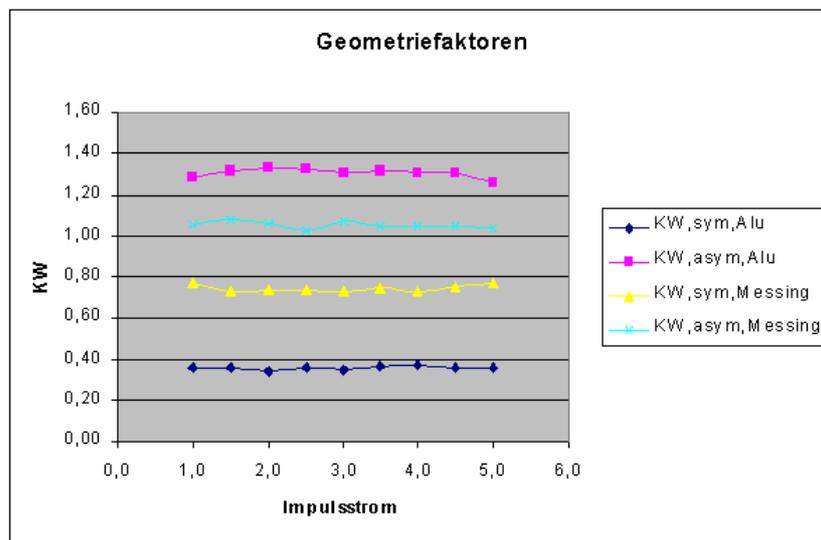


Bild 3.15: Geometriefaktoren in Abhängigkeit vom Impulsstrom bei Nichteisenmetallen

3.3.3.2 Eisen

Die Schwingung in Bild 3.16 beginnt mit einem Ausschlag nach unten, d. h. einer negativen Beschleunigung der Sensoren. Das entspricht bei der symmetrischen Messanordnung einer Kompression des Messobjektes (Stahl).

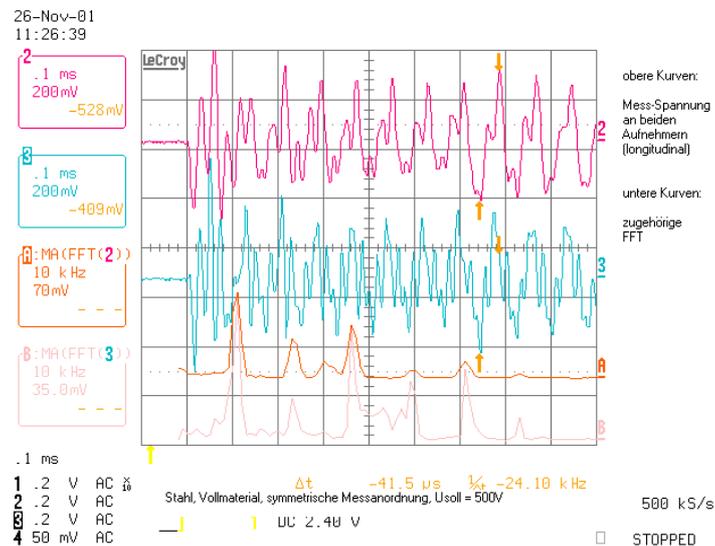


Bild 3.16: Signalverlauf bei Stahl für symmetrische Messanordnung

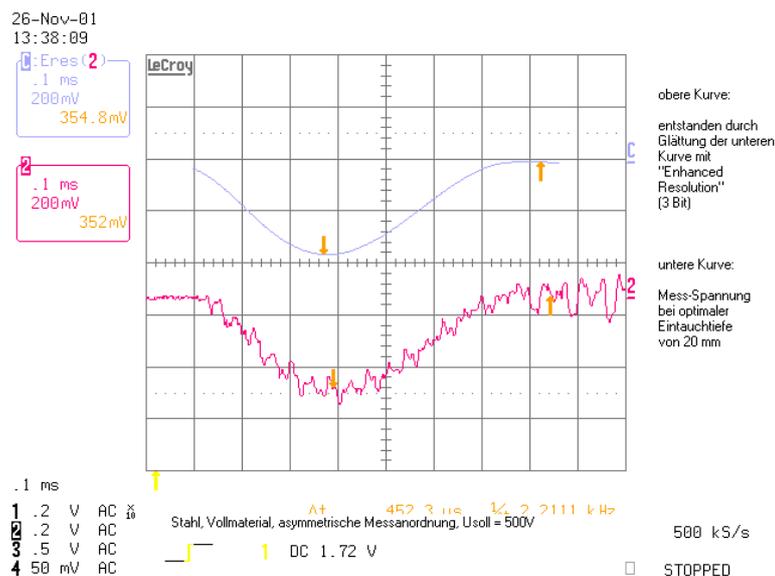


Bild 3.17: Signalverlauf bei Stahl für asymmetrische Messanordnung

Wird bei Stahl in asymmetrischer Anordnung gemessen, so beginnt nach der Anregung eine niederfrequente Schwingung (Bild 3.17) mit negativem Ausschlag. Diese wird durch das kurzzeitige Hereinziehen des Messobjektes in die Spule durch die magnetische Anziehung (siehe Abschnitt 3.1) verursacht. Die überlagerte hochfrequente Schwingung beginnt ebenfalls negativ. Zur Auswertung herangezogen wurde bei der asymmetrischen Messanordnung die geglättete Messkurve (vgl. Bild 3.12 für Aluminium).

Um den Anteil der Wirbelströme bei Stahl abzuschätzen, wird folgendermaßen vorgegangen: Der Geometriefaktor, der bei den Nichteisenmetallen ermittelt wurde, wird aus Bild 3.15 übernommen. Der spezifische Widerstand für Stahl wird analog Gl. (3.3) in die Formel

$$y_{\text{Wirbel}} = K_W \frac{I^2}{\rho_{\text{Stahl}}} \text{ eingesetzt. Die so errechneten Werte sind in Bild 3.18 und Bild 3.19 den}$$

Messwerten gegenübergestellt. Die durch Wirbelströme bedingten Kräfte sind den magnetischen Kräften entgegengerichtet, d. h. wenn die Wirbelströme nicht wirken würden, müssten größere magnetische Kräfte auftreten. Aus Bild 3.18 und Bild 3.19 ist zu entnehmen, dass der Anteil der Wirbelströme an der Kraftwirkung bei Stahl 10 ... 20 % beträgt.

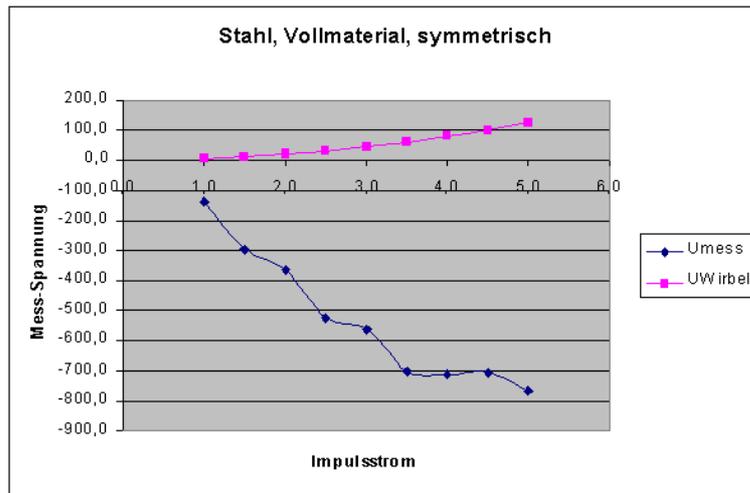


Bild 3.18: Impulsstromabhängige Beschleunigung bei Stahl (symmetrische Anordnung)

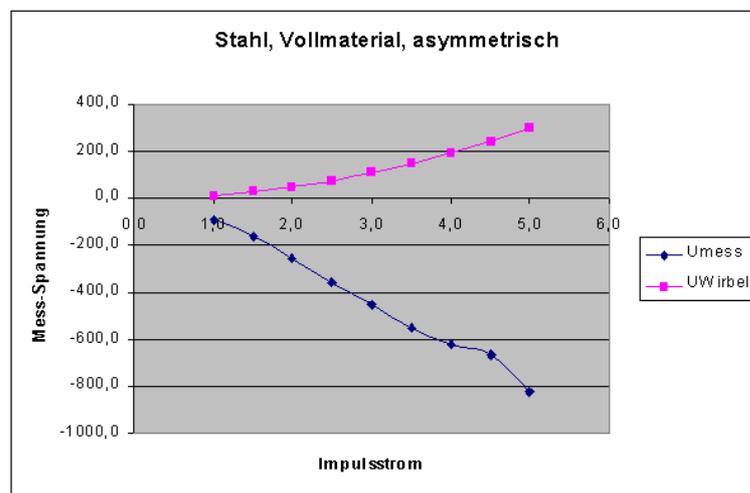


Bild 3.19: Impulsstromabhängige Beschleunigung bei Stahl (asymmetrische Anordnung)

Zur Abschätzung des Anteils der Magnetostriktion wird die Beschleunigung, die im Fall der symmetrischen Messanordnung an den Enden des Stahlstabes auftritt, berechnet. Es wird nur die Längs-Magnetostriktion berücksichtigt, da die Volum-Magnetostriktion sehr viel kleiner ist [6].

In [7] ist für Eisen die Abhängigkeit der Längs-Magnetostriktion λ von der magnetischen Feldstärke H grafisch dargestellt.

Aus der Grafik wurden folgende Werte abgelesen:

H [kA/m]	$10^6\lambda$
0	0
10	10
20	5
25	0
40	-10
50	-15
100	-20
200	-20

Der Zusammenhang $\lambda = \lambda(H)$ lässt sich durch die Funktion

$$\lambda = \lambda(H) = \lambda_{\max} \left[e^{-\frac{H}{H_1}} - 1 + e^{-\left(\frac{H-H_2}{H_3}\right)^2} \right] \quad (3.4)$$

mit $\lambda_{\max} = 20 \cdot 10^{-6}$ und

$$H_1 = 33 \text{ kA/m}$$

$$H_2 = 15 \text{ kA/m}$$

$$H_3 = 11 \text{ kA/m}$$

approximieren (Bild 3.20). Während eines Impulses wird der gesamte magnetische Feldstärkebereich von Null bis zum Maximum H_0 und zurück durchfahren und entsprechend auch der dazugehörige Magnetostruktionsbereich. Dabei wird bei hohen Feldstärken $H(t)$ das Vorzeichen geändert. Unter Beachtung des Feldstärkeverlaufes $H(t)$ (Bild 3.21, vgl. auch 2.) gilt fast während der gesamten Impulszeit $H(t) > 50 \text{ kA/m}$ und damit der betragsmäßige Maximalwert von $\lambda_{\max} = -20 \cdot 10^{-6}$, so dass dieser für die Abschätzung verwendet wird. Die Magnetostruktion wirkt als Kontraktion.

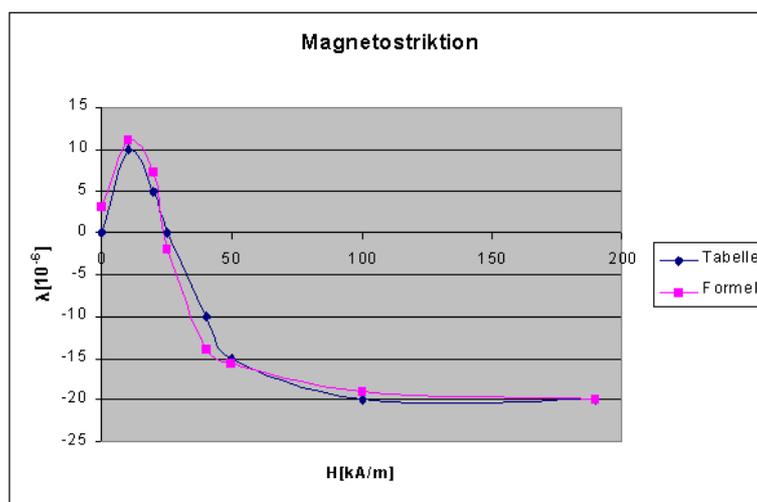


Bild 3.20: Magnetostruktion $\lambda = \lambda(H)$, nach (4) und Tabellenwerte nach [7].

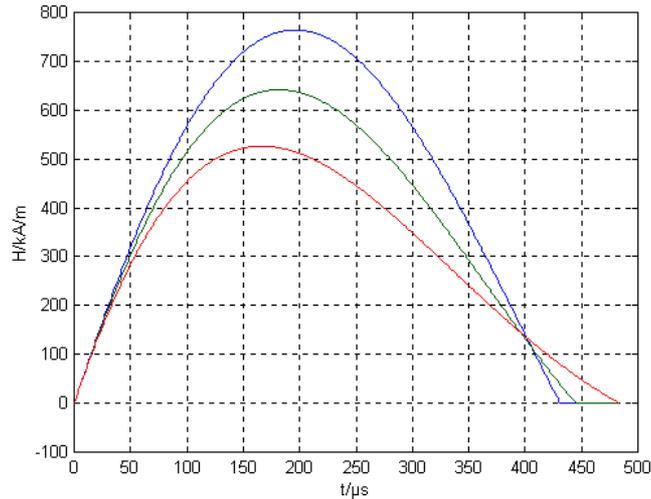


Bild 3.21: Verlauf der magnetischen Feldstärke $H(t)$

Es soll nun abgeschätzt werden, welche Beschleunigung an den Enden des Stahlstabes auftritt. Zunächst wird Gl. (3.4) durch Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der magnetischen Feldstärke präzisiert:

$$\lambda = \lambda(t) = \lambda(H(t)) = \lambda_{\max} \left[e^{\frac{H(t)}{H_1}} - 1 + e^{\left(\frac{H(t)-H_2}{H_3}\right)^2} \right] \quad (3.5)$$

Der Stahlstab hat die Länge $l = l_0$, wenn kein Magnetimpuls stattfindet. Während des Magnetimpulses ändert sich die Länge um $\Delta l(t)$, d. h. $l = l_0 + \Delta l(t)$.

Wegen $\frac{\Delta l(t)}{l_0} = \lambda(H(t))$ folgt $l = l_0(1 + \lambda(H(t)))$

Für die magnetische Feldstärke gilt

$$H(t) = \begin{cases} H_0 \sin \omega t = H_0 \sin \frac{2\pi}{T} t & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Zur Berechnung der Beschleunigung $b(t) = \frac{d^2 x}{dt^2}$ wird zunächst die Koordinate $x(t)$ definiert: x zählt von der Mitte des Stahlstabes (= Mitte der Luftspule) aus. Bei $x = 0$ führt der Stahlstab aus Symmetriegründen keinerlei Bewegung aus. Es interessiert der Bewegungsablauf bei $x = \frac{l_0}{2}$, der näherungsweise auch am Stabende auftreten müsste. Es gilt damit

$$x(t) = \frac{l_0}{2}(1 + \lambda(H(t)))$$

Durch zweifache Differentiation von $x(t)$ ergibt sich die Beschleunigung

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{l_0}{2} \lambda_{\max} \omega^2 [f_1(H(t)) + 2f_2(H(t)) + f_3(H(t)) - 2f_4(H(t)) + 4f_5(H(t))]$$

mit den Funktionen

$$f_1(H) = \frac{H_0}{H_1} e^{-\frac{H}{H_1}} \sin \omega t,$$

$$f_2(H) = \frac{H_0}{H_3} \frac{(H - H_2)}{H_3} e^{-\left(\frac{H - H_2}{H_3}\right)^2} \sin \omega t$$

$$f_3(H) = \left(\frac{H_0}{H_1}\right)^2 e^{-\frac{H}{H_1}} \cos^2 \omega t,$$

$$f_4(H) = \left(\frac{H_0}{H_3}\right)^2 e^{-\left(\frac{H - H_2}{H_3}\right)^2} \cos^2 \omega t$$

$$f_5(H) = \left(\frac{H_0}{H_3}\right)^2 \left(\frac{H - H_2}{H_3}\right)^2 e^{-\left(\frac{H - H_2}{H_3}\right)^2} \cos^2 \omega t$$

Bild 3.22 zeigt die Beschleunigung $b(t)$ für verschiedene H_0 . Es ist ersichtlich, dass mit diesem Ansatz für die Magnetostriktion Beschleunigungen berechnet werden, die bereits bei kleinen H_0 -Werten alle bei sehr viel größeren H_0 -Werten gemessenen Beschleunigungen um z. T. eine Größenordnung überschreiten. Der mathematische Ansatz für den Magnetostriktionsverlauf ist also zu einfach, er enthält neben λ keine weiteren Materialeigenschaften. Außerdem ist der Verlauf der Magnetostriktion $\lambda = \lambda(H)$ statisch aufgenommen worden, und es ist wahrscheinlich nicht gerechtfertigt, diesen Verlauf zur Berechnung der Beschleunigung innerhalb eines Zeitintervalls in der Größenordnung einer Millisekunde heranzuziehen.

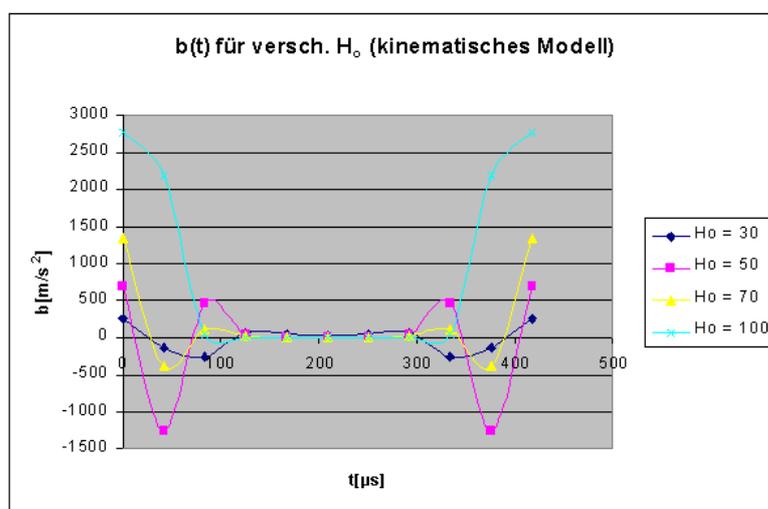


Bild 3.22: Beschleunigung $b(t)$ für verschiedene H_0

Den tatsächlichen Sachverhalt würde ein verteiltes Feder-Masse-Modell für einen Metallstab entsprechend Bild 3.23 besser beschreiben. Hier wären weiterführende Untersuchungen erforderlich, die im Rahmen der anwendungsorientierten Untersuchung des Effekts unterbleiben müssen.

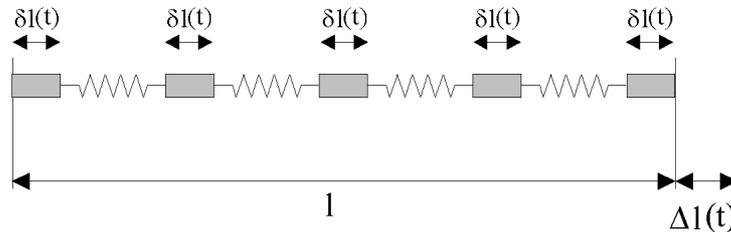


Bild 3.23: Verteiltes Feder-Masse-Modell für den Metallstab

3.4 Phänomenologische Deutung des magneto-akustischen Effekts

Die Untersuchung des Wirkungsmechanismus magnetischer Impulse auf Metalle ergab, dass als Ursache für die magneto-mechanischen Phänomene bei Nichteisenmetallen ausschließlich Wirbelströme, bei Stahl zusätzlich zu den Wirbelströmen magnetische Anziehungskräfte und Magnetostriktion in Betracht zu ziehen sind. Dabei liegt der durch Wirbelströme hervorgerufene akustische Effekt bei Nichteisenmetallen in der Größenordnung des akustischen Gesamteffektes bei Stahl. Das bedeutet, dass Prüfverfahren, die den magneto-mechanischen Effekt nutzen, nicht nur auf Stahl beschränkt sein müssen.

Mit Hilfe von Messungen an Nichteisenmetallen konnte auf der Basis einer vereinfachten Berechnung der Anteil der Wirbelströme bei Stahl zu ca. 10 – 20 % abgeschätzt werden.

Die Abschätzung des Magnetostriktionsanteils für Stahl mit einem vereinfachten Ansatz lieferte zu hohe Werte (höher als die gemessenen Gesamteffekte). Auf die Abtrennung dieses Anteils an der Gesamtwirkung wurde deshalb im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verzichtet.

Für den Zweck des Nachweises von Rissen oder Brüchen an Spannstählen genügt das phänomenologische Verständnis der Umwandlung der magnetischen in mechanische Energie, um über ein sicheres Mittel zur Erzeugung mechanischer Wellen in diesen Materialien zu verfügen.

4. Entwicklung eines magneto-akustischen Verfahrens zur Defektanalyse

Voraussetzung für die Entwicklung eines Verfahrens zur Defektanalyse ist die Definition eines Defektkriteriums, das aus Defektmerkmalen der empfangenen Beschleunigungssignale abgeleitet werden kann. Ein Defektmerkmal ist einem einzelnen Signal zuzuordnen, das Defektkriterium hingegen bezieht sich auf eine komplette Messreihe.

4.1 Aufsuchen von Defektmerkmalen

Bei der Suche nach Defektmerkmalen sind zunächst Form und Spektren der Signale zu analysieren. Um ein möglichst komplettes Spektrum zu erhalten, wird die relativ hohe Zeitbasis $t_{Basis} = 5 \text{ ms}$ gewählt. Bild 4.1 zeigt den typischen Signal- und Spektralverlauf für 2 Sensoren (Betonbalken mit unterbrochener Stahlstange bei einem zunächst frei gewählten Abstand x , Versuchsanordnung siehe Bild 2.1), ungefiltert und gefiltert.

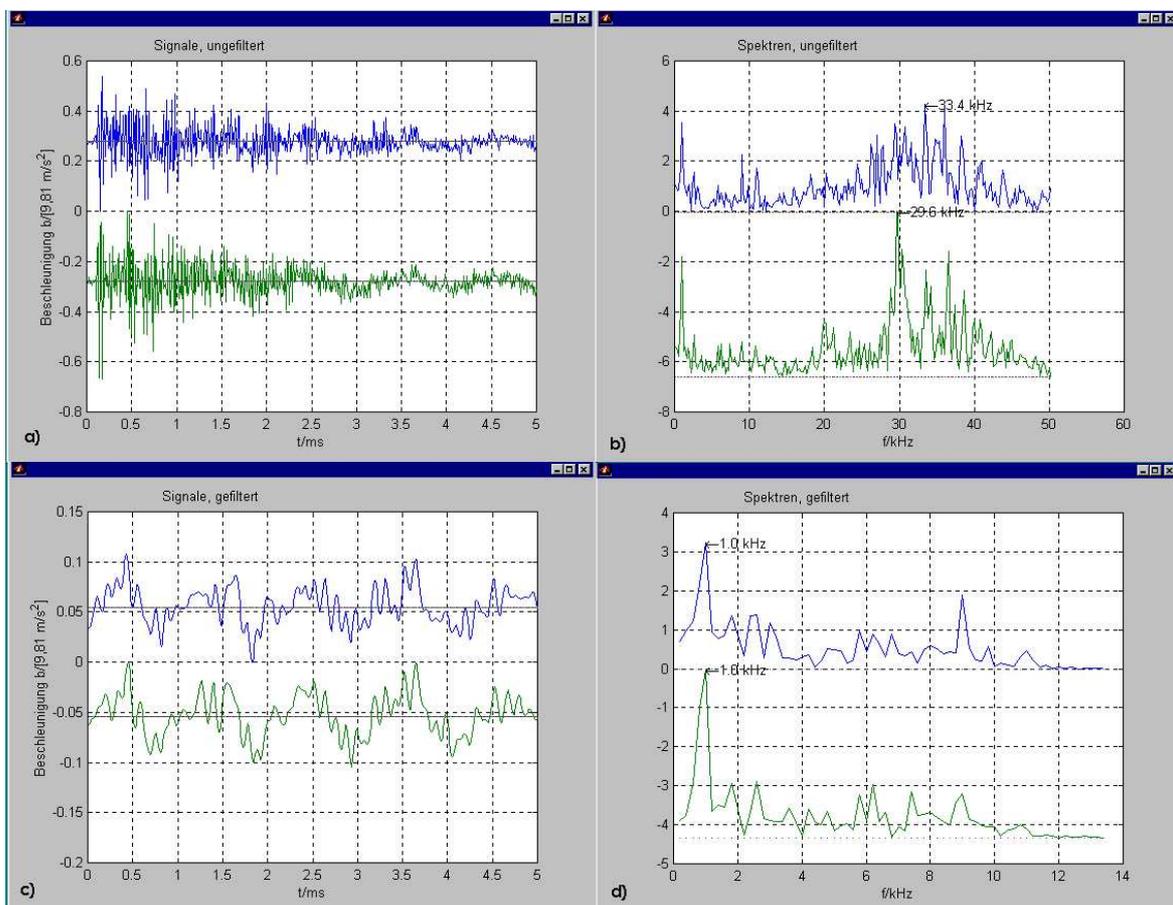


Bild 4.1: Typische Signal-/Spektralverläufe

Das Spektrum (ungefiltert, Bild 4.1b) zeigt, dass wesentliche Frequenzanteile über 50kHz nicht auftreten. Die höchste Intensität (ohne Filterung) weisen Frequenzen $f_{ungefiltert} \approx 30 \text{ kHz}$ auf.

Mit der Schallgeschwindigkeit in Beton $c_{Beton} = 4000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ergibt sich daraus die Wellenlänge

$\lambda_{ungefiltert} = \frac{c_{Beton}}{f_{ungefiltert}} \approx 13 \text{ cm}$. Die Wellenlänge $\lambda_{ungefiltert}$ stimmt etwa mit der Querausdehnung des Betonquaders überein und ist durch Reflexionen an der Grenzfläche Stahl/Beton

zu erklären, die aufgrund der unterschiedlichen akustischen Wellenwiderstände Z_{Stahl} , Z_{Beton} von Stahl und Beton entstehen.

$$\text{Mit } Z_{Stahl} = 39 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad \text{und} \quad Z_{Beton} = 8,4 \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

$$\text{erhält man einen Reflexionsfaktor} \quad r = \frac{Z_{Stahl} - Z_{Beton}}{Z_{Stahl} + Z_{Beton}} \approx 0,66,$$

der das Auftreten der Reflexionen und damit die hohen Frequenzen erklärt. Die Länge des angeregten Bereiches im Messobjekt entspricht in diesem Fall etwa der Querausdehnung des Betonbalkens.

Bild 4.1c zeigt die Signale und Bild 4.1d die Spektren nach der Filterung durch einen Bandpass (unteren Grenzfrequenz 0,5 kHz, obere Grenzfrequenz 10 kHz). Die Frequenz mit der höchsten Intensität (nach Filterung) beträgt $f_{gefiltert} \approx 1\text{kHz}$. Daraus ergibt sich die Wellenlänge

$$\lambda_{gefiltert} = \frac{c_{Beton}}{f_{gefiltert}} \approx 4\text{m}. \text{ Die Wellenlänge } \lambda_{gefiltert} \text{ stimmt etwa mit der Längsausdehnung}$$

des Betonquaders überein. Die Länge des angeregten Bereiches im Messobjekt entspricht in diesem Fall der Länge des Betonbalkens.

Die Analyse weiterer Signale mit variablen Abständen x (nahe oder entfernt von der Bruchstelle) unter Beibehaltung der Zeitbasis $t_{Basis} = 5\text{ms}$ bestätigt die bisherigen Erkenntnisse, allerdings sind weder in den Signalen noch in den Spektren Defektmerkmale erkennbar.

Die Frequenz $f_{ungefiltert} \approx 30\text{kHz}$ (entspricht Schwingungsdauer $T_{ungefiltert} = \frac{1}{f_{ungefiltert}} \approx 33\mu\text{s}$) legt

die Wahl einer kleineren Zeitbasis nahe. Im oberen Bereich des Bildes 4.2 sind bei einer Zeitbasis $t_{Basis} = 0,5\text{ms}$ die Signale für zwei unterschiedliche Abstände x übereinandergelegt dargestellt.

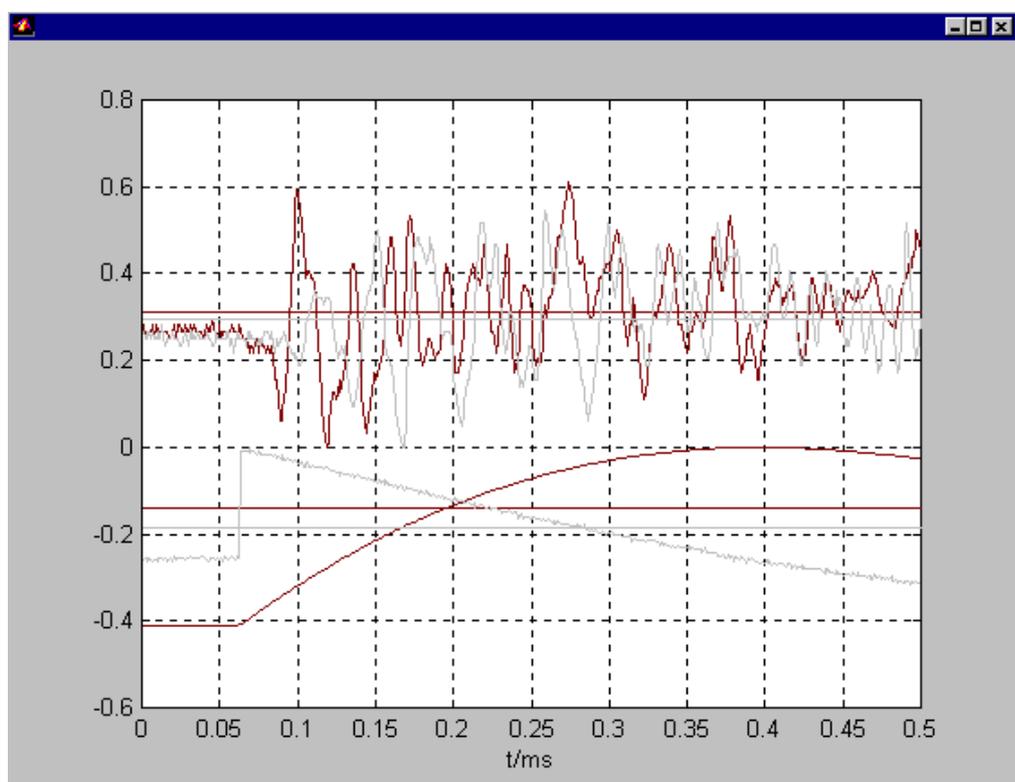


Bild 4.2: Signalverlauf bei Zeitbasis $t_{Basis} = 0,5\text{ms}$

Bei einem der beiden Abstände x befindet sich der Riss der Stahlstange zwischen Luftspule und Sensoren, bei dem anderen Abstand x ist das nicht der Fall. Auf den ersten Blick sind keine charakteristischen Unterschiede festzustellen. Eine genauere Analyse lässt jedoch einen prinzipiellen Unterschied zwischen den beiden übereinandergelegten Signalen im Zeitfenster von ca. $70\mu\text{s}$ bis ca. $120\mu\text{s}$ erkennen: Das Signal mit deutlich geringerer Elongation im gewählten Zeitfenster gehört zum Abstand „mit Riss“, das andere zum Abstand „ohne Riss“. Es zeigt sich, dass dieses Defektmerkmal für ein Defektkriterium genutzt werden kann, da es stets reproduzierbar auftritt.

Die physikalisch exakte Deutung des beobachteten Phänomens stößt auf Schwierigkeiten, da die Schallausbreitung im Verbund Stahl-Beton im einzelnen nicht bekannt ist (dazu wären aufwändige FEM-Rechnungen notwendig). Vereinfachend kann aber davon ausgegangen werden, dass der Schall durch den Riss im Stahl in seiner Ausbreitung vom Raumgebiet „A“ bis zum Raumgebiet „C“ (Bild 4.3) behindert und das Signal dadurch deformiert wird.

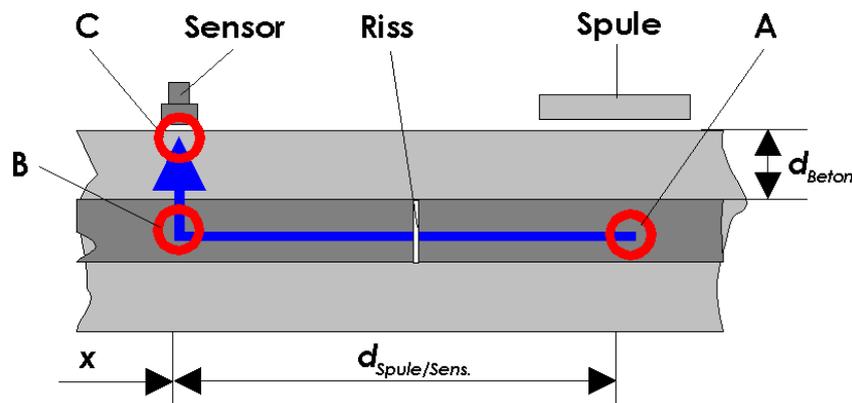


Bild 4.3: Schematische Darstellung der Schallausbreitung

Um die zeitliche Beziehung der Signalverläufe zur magnetischen Anregung sichtbar zu machen, sind im unteren Bereich Bild 4.2 Impulsstromverlauf $I(t)$ (näherungsweise Halbsinus) und Flussänderung $\frac{d\Phi(t)}{dt}$ (Sprung mit näherungsweise cosinusförmigem Abfall) dargestellt (vgl. auch Bild 2.4). Der Beginn der Signalaufzeichnung (Zeitpunkt $t = 0$ in Bild 4.2) wird durch das Signal „ $U_{\text{Synchr.}}$ “ des Impulsmagnetisators extern getriggert. Am Oszilloskop ist bei einer Zeitbasis $t_{\text{Basis}} = 0,5 \text{ ms}$ zunächst noch keine Zeitverzögerung (Trigger-Delay) eingestellt.

Im Zeitbereich $t = 0 \dots \approx 60 \mu\text{s}$ sind sowohl die Signalverläufe als auch Impulsstrom $I(t)$ und Flussänderung $\frac{d\Phi(t)}{dt}$ in Ruhe. Die Zeit von $60\mu\text{s}$ zwischen Auslösung des Synchronimpulses und Beginn der Magnetisierung durch Entladung der Kondensatorbatterie ist offensichtlich eine schaltungsbedingte Systemkonstante des Impulsmagnetisators.

Zum Zeitpunkt $t \approx 60\mu\text{s}$ beginnt der Magnetisierungsvorgang, gekennzeichnet durch den Sprung bei der Flussänderung $\frac{d\Phi(t)}{dt}$ bzw. den Knick beim Impulsstrom $I(t)$.

Nach ca. $30\mu\text{s}$ ist die Auswirkung auf das zum Abstand „ohne Riss“ gehörige Signal sichtbar. Zum Vergleich: in $30\mu\text{s}$ legt der Schall in Stahl 15 cm zurück. Der Abstand Spule/Sensor beträgt bei der Bild 4.2 zugrundeliegenden Messung 15 cm .

Bemerkenswert ist, dass der Zeitabschnitt von ca. $50\mu\text{s}$, in dem das Defektmerkmal zur Wirkung kommt, nur ca. 5% der Impulsbreite entspricht. Dieser Sachverhalt legt die Wahl einer noch

kleineren Zeitbasis $t_{Basis} = 100\mu s$ nahe, damit sich der signifikante Signalbereich über einen möglichst großen Bereich des Oszilloskops erstreckt. Dazu ist es aber notwendig, am Oszilloskop eine vom Abstand Spule/Sensoren $d_{Spule/Sens.}$ und der Betondeckung d_{Beton} abhängige Zeitverzögerung (Trigger-Delay) t_{Trig} einzustellen.

Für mehrere Kombinationen $d_{Spule/Sens.}$ und d_{Beton} wurde die jeweils optimale Zeitverzögerung am Oszilloskop (Trigger-Delay) t_{Trig} experimentell ermittelt, um daraus auf empirischem Wege eine möglichst einfache Berechnungsvorschrift $t_{Trig} = t_{Trig}(d_{Spule/Sens.}, d_{Beton})$ abzuleiten. Eine solche Vorschrift für die Berechnung der Zeitverzögerung t_{Trig} wurde gefunden:

$$t_{Trig} = t_0 + \frac{d_{Spule/Sens.}}{c_{Stahl}} + \frac{d_{Beton}}{c_{Beton}} \quad (4.1)$$

mit

t_0 : 40 μs , um 20 μs reduzierte Systemkonstante des Impulsmagnetisators
Der Wert für t_0 wurde vorsichtshalber um 20 μs gegenüber der Systemkonstanten des Impulsmagnetisators (60 μs) reduziert, um den Signalbeginn in die Auswertung sicher einzubeziehen.

c_{Beton} : Schallgeschwindigkeit in Beton

c_{Stahl} : Schallgeschwindigkeit in Stahl

Dasselbe Ergebnis wie in Gl. (4.1) erhält man auch durch eine einfache Überlegung:

Die Zeit $t_{A \rightarrow C}$ für die Ausbreitung des Schalls vom Raumgebiet „A“ zum Raumgebiet „C“ (Bild 4.3) setzt sich näherungsweise zusammen aus den Anteilen

$$t_{A \rightarrow B} = \frac{d_{Spule/Sens.}}{c_{Stahl}} \quad (\text{vom Raumgebiet „A“ zum Raumgebiet „B“})$$

und

$$t_{B \rightarrow C} = \frac{d_{Beton}}{c_{Beton}} \quad (\text{vom Raumgebiet „B“ zum Raumgebiet „C“})$$

Zu diesen Anteilen ist noch die reduzierte Systemkonstante t_0 hinzuzufügen, so dass mit

$$t_{Trig} = t_0 + t_{A \rightarrow C} = t_0 + t_{A \rightarrow B} + t_{B \rightarrow C}$$

wiederum Gl. (4.1) als Ergebnis entsteht.

Unter Steuerung des Messdatenverarbeitungssystems DEFA wird die Zeitverzögerung t_{Trig} zu einem geeigneten Zeitpunkt an das Oszilloskop gesendet.

Durch diese Maßnahme fällt bei den empfangenen Signalen $y_{ij}(t)$ die untere Begrenzung des relevanten Zeitfensters mit dem Nullpunkt des Koordinatensystems $t = 0$ zusammen.

Für die obere Begrenzung des Zeitfensters $t_{Fenster}$ gilt $t_{Fenster} \approx 50\mu s$.

Um eine möglichst genaue Berechnungsvorschrift für die ggf. vom Abstand Spule/Sensoren $d_{Spule/Sens.}$ und der Betondeckung d_{Beton} abhängige obere Begrenzung des Zeitfensters $t_{Fenster}$ von der Form $t_{Fenster} = t_{Fenster}(d_{Spule/Sens.}, d_{Beton})$ auf empirischem Wege zu erhalten, wurde folgendermaßen vorgegangen:

Für sämtliche bisher aufgenommenen Messreihen wurde visuell das am günstigsten erscheinende $t_{Fenster}$ in Abhängigkeit von $d_{Spule/Sens}$ und d_{Beton} ermittelt und tabellarisch erfasst. Eine einfache Beziehung analog Gl. (4.1) konnte allerdings daraus nicht abgeleitet werden. Als sinnvoller Ausweg wurden die o. g. Tabellenwerte in das Messdatenverarbeitungssystem DEFA (siehe Abschnitt 7.) eingearbeitet. Für nicht vorkommende Kombinationen $d_{Spule/Sens}$ und d_{Beton} wird $t_{Fenster} = 50\mu s$ angenommen. Dies scheint berechtigt, da auch die Tabellenwerte nur wenig von $50\mu s$ ab weichen. Bild 4.4 zeigt den Zusammenhang.

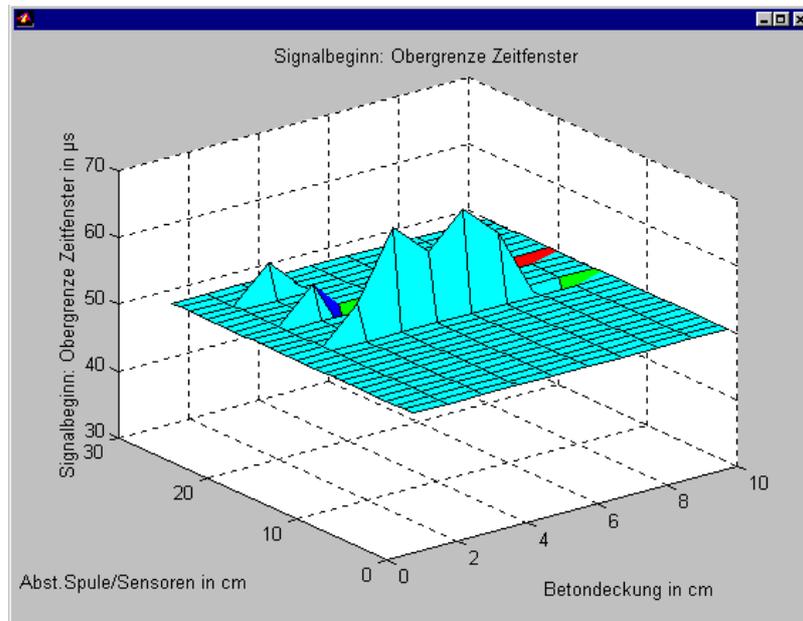


Bild 4.4: Obere Begrenzung Zeitfenster $t_{Fenster}$ in Abhängigkeit von $d_{Spule/Sens}$ und d_{Beton}

Die obere Begrenzung des Zeitfensters $t_{Fenster}$ wird nicht an das Speicheroszilloskop gesendet, sondern dient nur der internen Verarbeitung. In Bild 4.5 sind bei einer Zeitbasis $t_{Basis} = 100\mu s$ die Signale für 2 unterschiedliche Abstände x_1 und x_2 übereinandergelegt dargestellt.

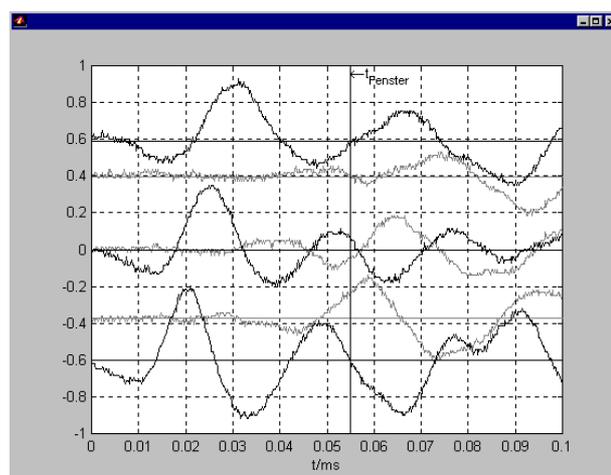


Bild 4.5: Signalverlauf mit/ohne Riss bei Zeitbasis $t_{Basis} = 100\mu s$

Das Zeitfenster von ca. $70\mu s$ bis ca. $120\mu s$ in Bild 4.2 wird durch die Maßnahme der Zeitverzögerung t_{Trig} in den Zeitbereich von 0 bis ca. $50\mu s$ in Bild 4.5 transformiert. Bei einer

Zeitbasis $t_{Basis} = 100 \mu s$ ist das Defektmerkmal deutlich zu erkennen: Befindet sich der Riss der Stahlstange zwischen Luftspule und Sensoren, zeigen die Signale deutlich geringere Elongation. Das Defektmerkmal wird somit von der Dynamik des Signalverlaufs innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters bestimmt. Mit einem geeigneten Signalanalyseverfahren kann für jedes Signal eine Signalkenngröße ermittelt wurde, die monoton mit der Dynamik des Signalverlaufs anwächst. Somit besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Defektmerkmal und Signalkenngröße.

4.2 Auswertung der Defektmerkmale bei einer hypothetischen Messreihe

Zunächst wird eine hypothetische Messreihe betrachtet, bei der die Signale rechentechnisch generiert und für jedes Signal eine Signalkenngröße ermittelt wurde. Bild 4.6 zeigt den Verlauf der Signalkenngröße als Funktion von x .

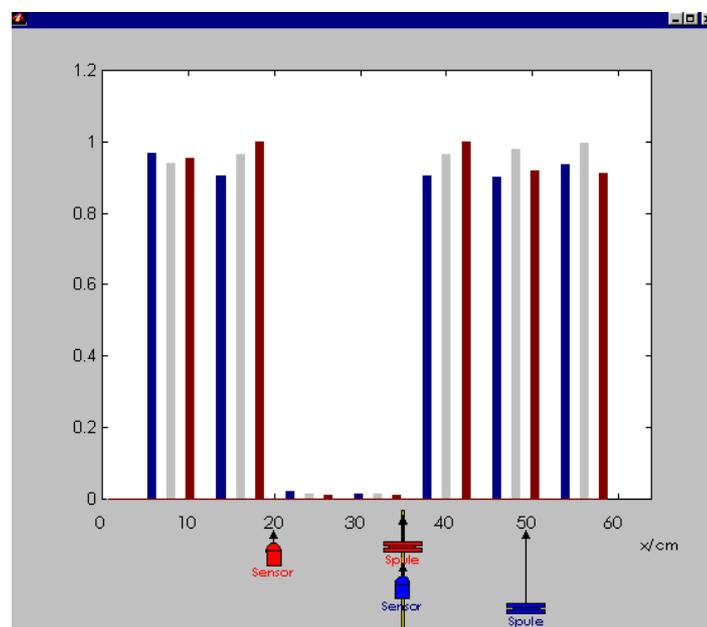


Bild 4.6: Verlauf der Signalkenngröße einer hypothetischen Messreihe

Der Verlauf der Signalkenngröße weist einen Einbruch im Bereich $20 \text{ cm} < x < 35 \text{ cm}$ auf. Dieses Gebiet wird im folgenden als Defektbereich bezeichnet. Der Riss befindet sich bei $x = 35 \text{ cm}$. Der Abstand Spule/Sensor beträgt im vorliegenden Fall 15 cm , wobei sich die Spule im folgenden stets rechts vom Sensor befindet. Die x -Koordinate gibt die Lage des Sensors an. Die Lage der Spule und eines Sensors ist für die beiden Grenzfälle $x = 20 \text{ cm}$ und $x = 35 \text{ cm}$ schematisch angedeutet. Sämtliche Lagen x zwischen diesen Grenzfällen, d. h. $20 \text{ cm} < x < 35 \text{ cm}$, sind dadurch charakterisiert, dass sich der Riss zwischen Spule und Sensor befindet. Da sich die Spule rechts vom Sensor befindet, fallen rechter Grenzfall des Defektbereiches und Riss zusammen (wenn sich die Spule links vom Sensor befinden würde, fielen linker Grenzfall des Defektbereiches und Riss zusammen).

An dieser Stelle ist es bereits möglich, eine qualitative Formulierung des Defektkriteriums vorzunehmen:

Ein Defekt liegt dann vor, wenn der Verlauf der Signalkenngröße (Bild 4.6) einen Defektbereich aufweist.

Diese Definition wird in Abschnitt 4.3 erweitert und in Abschnitt 4.4 quantitativ formuliert.

4.3 Signalanalyseverfahren

Zur Spezifizierung der in 4.2 erwähnten Signalkenngröße kommen Signalleistung, Signalhub und Signalkorrelation in Betracht.

Signalleistung

Die Signalleistung P_i für das i .te Signal $y_i(t)$ einer Messreihe wird berechnet nach

$$P_i = \frac{1}{2} \int_0^{t_{\text{Fenster}}} dt y_i^2(t) \quad (4.2)$$

Signalhub

Der Signalhub Δy_i für das i .te Signal $y_i(t)$ einer Messreihe wird berechnet nach

$$\Delta y_i = (\max(y_i) - \min(y_i))_0^{t_{\text{Fenster}}}$$

Bild 4.7 zeigt den Verlauf der Signalleistung P_i und des Signalhubs Δy_i für eine hypothetische Messreihe.

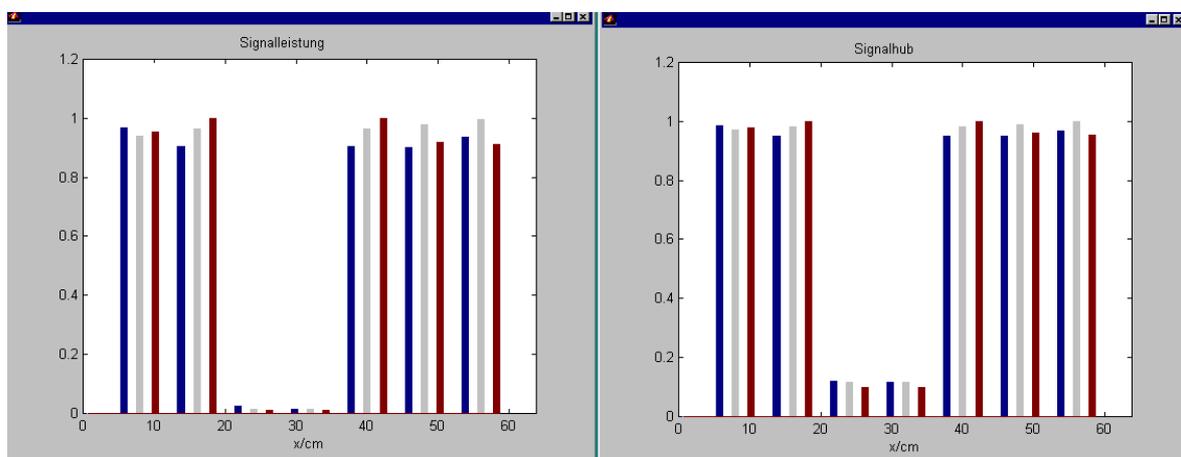


Bild 4.7: Signalleistung und Signalhub für eine hypothetische Messreihe

Erwartungsgemäß verhalten sich Signalleistung P_i und Signalhub Δy_i zueinander entsprechend $P_i \sim \Delta y_i^2$. Bei Wahl der Signalleistung P_i als Signalkenngröße tritt der Defektbereich deutlicher hervor im Vergleich zum Signalhub Δy_i . Aus diesem Grunde wird die Signalleistung P_i herangezogen, um eine quantitative Defektaussage zu treffen (siehe Abschnitt 4.4 und Abschnitt 7.4.10). Zur Information werden beide Signalkenngrößen vom Messdatenverarbeitungssystem DEFA angeboten (siehe Abschnitt 7.4.10).

Signalkorrelation

In Abschnitt 4.2 wurden die Signale einer hypothetischen Messreihe (Bild 4.6) rechtechnisch generiert. Der Grund dafür bestand darin, dass die Signalkenngröße bei einer realen Messreihe nicht so ideal verläuft wie in Bild 4.6. Zum besseren Verständnis war aber ein relativ idealer Verlauf notwendig. In Bild 4.8 sind die Verläufe der Signalleistungen für die hypothetische und für eine reale Messreihe gegenübergestellt.

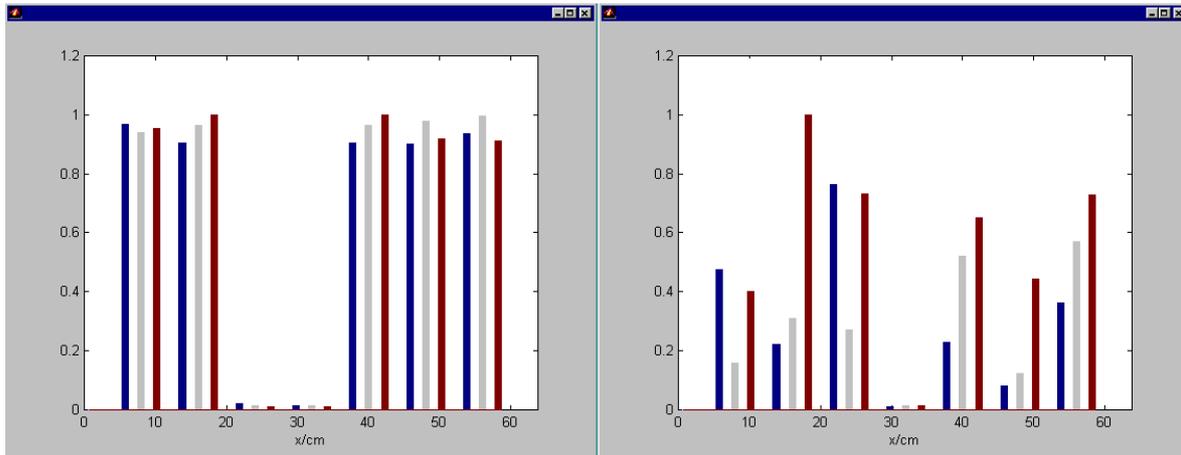


Bild 4.8: Verlauf der Signalleistung für hypothetische und reale Messreihe

Bei der realen Messreihe tritt der Defektbereich nicht mehr so deutlich hervor wie bei der hypothetischen Messreihe. Deshalb muss nach verbesserten Identifikationsmöglichkeiten gesucht werden.

Eine Möglichkeit, die in den Signalen enthaltenen Informationen effektiver zu nutzen, besteht in der Darstellung einer Messreihe als Korrelationsfeld. Während die Signalleistung nur eine Kenngröße pro Signal produziert, setzt das Korrelationsfeld alle Signale untereinander in Beziehung. Für die Komponenten r_{ij} des Korrelationsfeldes gilt:

$$r_{ij} = \max \left(\int_0^{t_{\text{Fenster}}} dt y_i(t) y_j(t - \tau) \right) \equiv \int_0^{t_{\text{Fenster}}} dt y_i(t) y_j(t - \tau_{\text{max}}) \quad (4.3)$$

wobei τ so einzustellen ist, dass das Integral zum Maximum wird.

Bild 4.9 zeigt das Ergebnis, wiederum für die hypothetische und die reale Messreihe. Die Korrelation zweier Signale, die beide außerhalb der Bruchzone liegen, ist hoch. Dagegen ist die Korrelation zweier Signale, bei denen eines oder beide innerhalb der Bruchzone liegen, klein. Übrigens ergibt sich die Darstellung Bild 4.8 aus dem Korrelationsfeld, wenn man dieses diagonal schneidet. Dann nämlich geht Gl. (4.3) über in

$$r_{ii} = \max \left(\int_0^{t_{\text{Fenster}}} dt y_i(t) y_i(t - \tau) \right) \equiv \int_0^{t_{\text{Fenster}}} dt y_i^2(t)$$

d. h. in Gl. (4.2) bis auf den Faktor $\frac{1}{2}$. Dabei wurde berücksichtigt, dass τ Null zu setzen ist, wenn das Integral zum Maximum werden soll.

Bild 4.9 zeigt das Korrelationsfeld für die hypothetische und eine reale Messreihe, jeweils eine Seitenansicht sowie die Draufsicht. Der Defekt wird im Korrelationsfeld durch das charakteristische Kreuz zum Ausdruck gebracht.

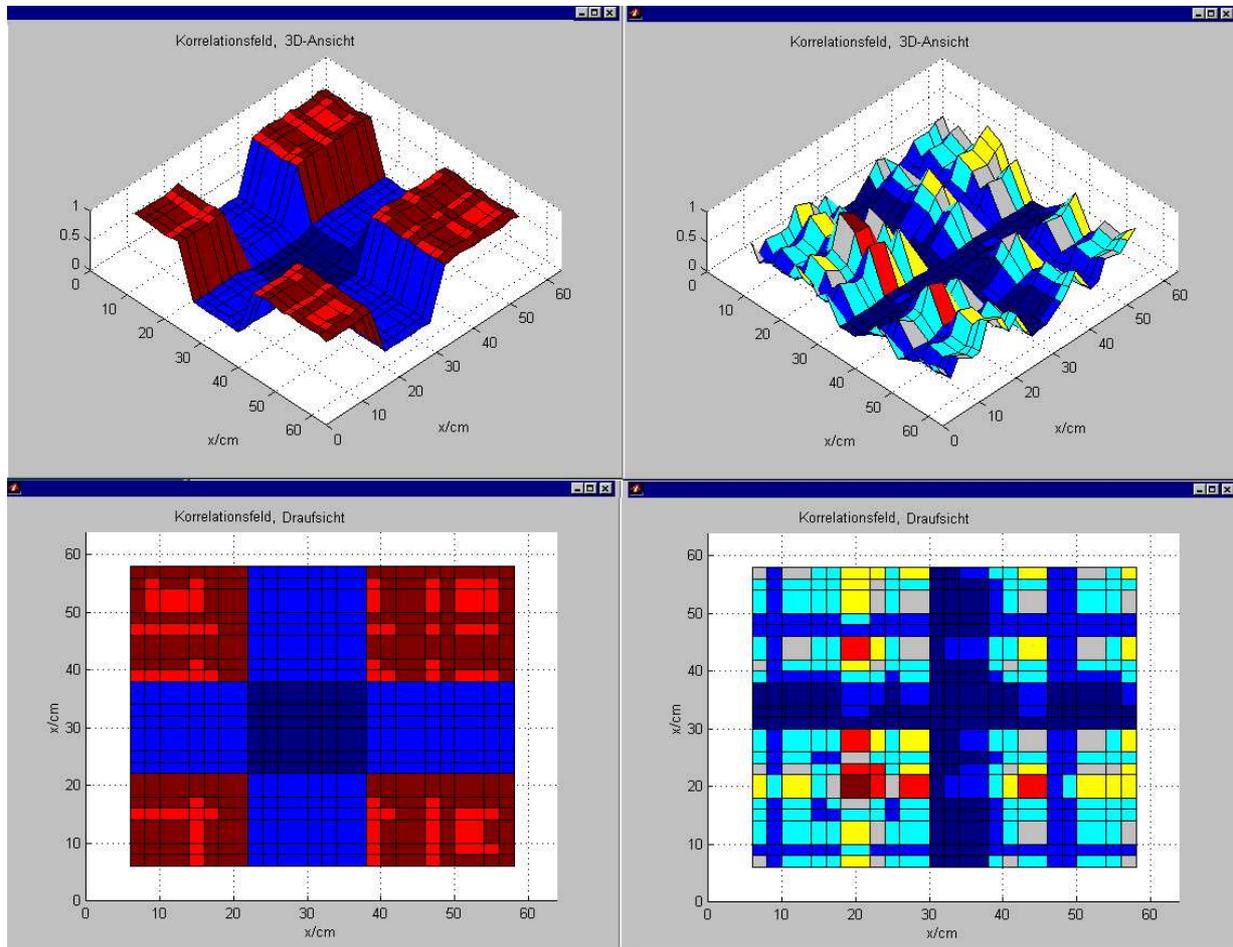


Bild 4.9: Korrelationsfeld für hypothetische und reale Messreihe

Der Vergleich der Bilder 4.8 und 4.9 zeigt: Für die hypothetische Messreihe mit ihrem nahezu idealem Verlauf ist das Balkendiagramm voll ausreichend. Für eine reale Messreihe bringt das Korrelationsfeld den Defektbereich deutlicher zum Ausdruck. Vom Messdatenverarbeitungssystem DEFA werden für jede Messreihe das Balkendiagramm sowie vier verschiedene 3D-Ansichten und die Draufsicht, jeweils sensorbezogen, und zusätzlich bei Verwendung von mehr als einem Sensor sensorgemittelt angeboten, wobei zusätzlich der Farbkontrast variiert werden kann (siehe Abschnitt 7.4.10).

Die qualitative Formulierung des Defektkriteriums aus Abschnitt 4.2 kann an dieser Stelle wie folgt erweitert werden:

Ein Defekt liegt dann vor, wenn im Korrelationsfeld ein charakteristisches Kreuz (Bild 4.9) erscheint.

4.4 Algorithmus für eine quantitative Defektaussage - Defektkriterium

Um eine quantitative Aussage über das Vorhandensein eines Defekts treffen zu können, sind zunächst eine oder mehrere geeignete Kenngrößen für die komplette Messreihe zu definieren. Deren Definition ist so zu wählen, dass beispielsweise in Bild 4.8 für die linke (generierte) Messreihe hohe Werte, für die rechte (reale) Messreihe dagegen niedrigere Werte auftreten.

Als geeignete Kenngrößen haben sich Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} und Trennschärfe S_{Trenn} erwiesen. Für beide Kenngrößen wurde der Berechnungsalgorithmus im Messdatenverarbeitungssystem „DEFA“ implementiert (siehe Abschnitt 7.4.10, Bild 7.40).

Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des Algorithmus sind konstante Abstände der Messpunkte voneinander. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Länge des Defektbereichs gleich dem Abstand Spule/Sensor $d_{Spule/Sens.}$ ist.

Zunächst wird aus dem größten vorhandenen x -Wert x_{max} der Messreihe, dem kleinsten vorhandenen x -Wert x_{min} der Messreihe, dem Abstand Spule/Sensoren (=Länge des Defektbereichs) $d_{Spule/Sens.}$ und der Gesamtanzahl der Signale n_{ges} die Anzahl der Signale $n_{defekt,soll}$ berechnet, deren Signalleistung kleiner sein sollte als die aller übrigen Signale und die zusätzlich lückenlos nebeneinander und außerdem nicht an den Rändern des Messbereichs liegen müssen, falls ein Defekt vorliegt:

$$n_{defekt,soll} = n_{ges} \frac{d_{Spule/Sens.}}{x_{max} - x_{min}}$$

Allerdings existieren u. U. nur

$$n_{defekt,ist} = p_{defekt} n_{defekt,soll} = p_{defekt} n_{ges} \frac{d_{Spule/Sens.}}{x_{max} - x_{min}} < n_{defekt,soll} \quad (4.4)$$

solcher zusammenhängender Minima, weil (bei vorliegendem Defekt) aufgrund von Messungenauigkeiten oder Materialinhomogenitäten ein Teil der Minima im gesamten Messbereich verstreut ist.

Aus Gl. (4.4) ist die Beziehung für die Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} direkt abzulesen:

$$p_{defekt} = \frac{n_{defekt,ist}}{n_{defekt,soll}}$$

Die Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} ist ein Maß für die Ausprägung des Defektbereichs und nimmt den Maximalwert von 100% an, wenn alle erwarteten Minima tatsächlich lückenlos nebeneinander liegen. Sie wird kleiner, wenn ein Teil der Minima im gesamten Messbereich verstreut ist (bei vorliegendem Defekt) und extrem klein, wenn kein Defekt vorliegt oder die Grenze des Verfahrens erreicht wird (siehe Abschnitt 4.5).

Der im Messdatenverarbeitungssystem DEFA implementierte Algorithmus beginnt mit $p_{defekt} = 100\%$, sucht die entsprechende Anzahl Minima und prüft, *ob diese lückenlos nebeneinanderliegen*. Ist das nicht der Fall, wird derselbe Ablauf mit $p_{defekt} = 99\%$ versucht. Dieser Zyklus wird so lange wiederholt, bis die entsprechende (immer kleiner werdende) Anzahl lückenlos nebeneinanderliegender Minima gefunden wird (dann steht die Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} fest) oder festgestellt werden muss, dass keine quantitative Aussage möglich ist.

Von den gefundenen $n_{defekt,ist}$ Signalen bestimmen diejenigen 2 Signale mit dem kleinsten bzw. größten x -Wert den linken bzw. rechten Rand des Defektbereichs.

Die Trennschärfe S_{Trenn} ist definiert als das Verhältnis der Mittelwerte der Signalleistungen außerhalb und innerhalb des Defektbereichs:

$$S_{Trenn} = \frac{\frac{\sum P_i}{\text{außerhalbDefektbereich}}}{\frac{\sum P_i}{\text{innerhalbDefektbereich}}} \cdot \frac{n_{gesamt} - n_{defekt,ist}}{n_{defekt,ist}} \quad (4.5)$$

Vom Messdatenverarbeitungssystem „DEFA“ werden Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} , Trennschärfe S_{Trenn} und Defektbereich für jede Messreihe berechnet und ausgewiesen, oder es erfolgt eine Information über die Unmöglichkeit einer quantitativen Defektaussage.

Bei allen bisher aufgezeichneten Messreihen ergab der Vergleich der quantitativen Defektaussage mit der parallel dazu durchgeführten visuellen Analyse eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Abschnitt 5.).

Weiterhin besteht innerhalb der Grenzen des Verfahrens (siehe Abschnitt 4.5) eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität (Defekt vorhanden/nicht vorhanden).

An dieser Stelle erfolgt die quantitative Formulierung des Defektkriteriums:

Ein Defekt liegt dann vor, wenn die Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} einen Schwellwert $p_{defekt,min}$ und die Trennschärfe S_{Trenn} einen Schwellwert $S_{Trenn,min}$ überschreitet:

$$p_{defekt} > p_{defekt,min} \quad S_{Trenn} > S_{Trenn,min}$$

Im Messdatenverarbeitungssystem „DEFA“ wurden folgende Schwellwerte implementiert:

$$p_{defekt,min} = 25 \% \quad S_{Trenn,min} = 3$$

Mit den so gewählten Schwellwerten wurde die o. g. sehr gute Übereinstimmung erreicht.

Eine Heraufsetzung der Schwellwerte würde die quantitative Defektaussage dahingehend modifizieren, dass u. U. Defekte „unterschlagen“ werden, während durch eine Herabsetzung der Schwellwerte u. U. Defekte „vorgetäuscht“ würden. Die Festlegung der Schwellwerte entspricht der „Justage“ des Defektkriteriums.

4.5 Anwendungsgrenzen des magneto-akustischen Verfahrens zur Defektanalyse

In Abschnitt 2. war bereits auf die starke Abnahme der magnetischen Feldstärke mit wachsendem Abstand hingewiesen worden (Bild 2.8, Bild 2.9 und Bild 2.12). Es ist daher zu erwarten, dass die Betondeckung eine kritische Größe darstellt und dass ggf. eine Grenz-Betondeckung existiert, ab der das Verfahren zumindest mit der vorgegebenen Spulengeometrie nicht mehr funktioniert (da die Reichweite des Feldes ungefähr dem Radius des größten Drahringes entspricht, siehe Abschnitt 2.).

Abstandsgesetz

Zunächst wird gezeigt, dass sich die Abnahme der magnetischen Feldstärke \vec{B} mit wachsendem Abstand d stark auf die Signalleistung P_i auswirkt (Bild 4.10).

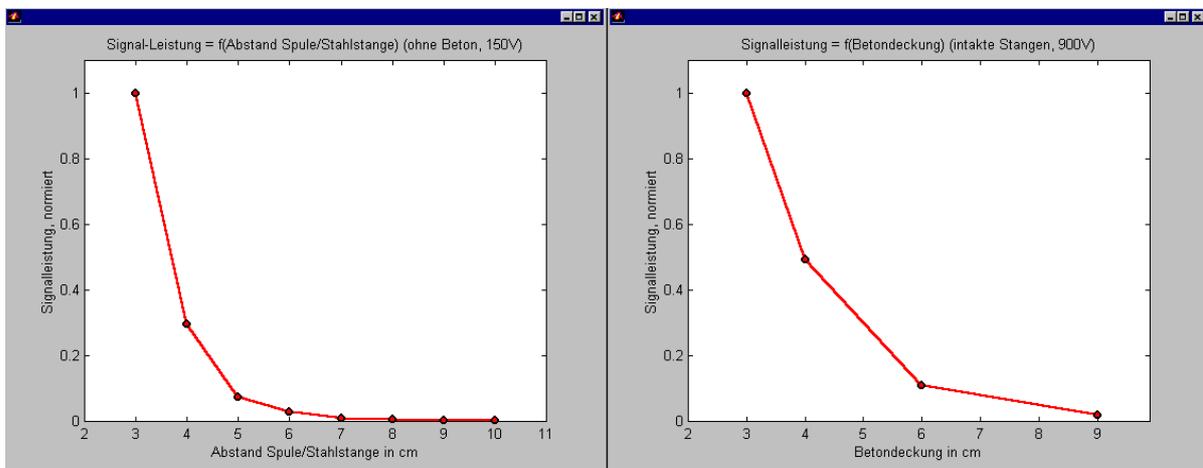


Bild 4.10: Abstandsgesetz ohne und mit Beton

Dabei wurde bei konstantgehaltenem Impulsstrom der Abstand Spule/Stahlstange variiert („Abstandsgesetz“ ohne Beton), bzw. die Betondeckung selbst bestimmt den Abstand („Abstandsgesetz“ mit Beton).

Nun ist eine aufgrund des größeren Abstandes d geringere Feldstärke \vec{B} bzw. Signalleistung P_i für sich allein noch kein Grund dafür, dass das Verfahren versagt. Wenn jedoch das Messdatenverarbeitungssystem „DEFA“ über die durch Gl. (4.5) definierte Trennschärfe S_{Trenn} (jeweils in Übereinstimmung mit der visuellen Analyse) keine Aussage mehr machen kann, ist die Anwendungsgrenze des Verfahrens erreicht.

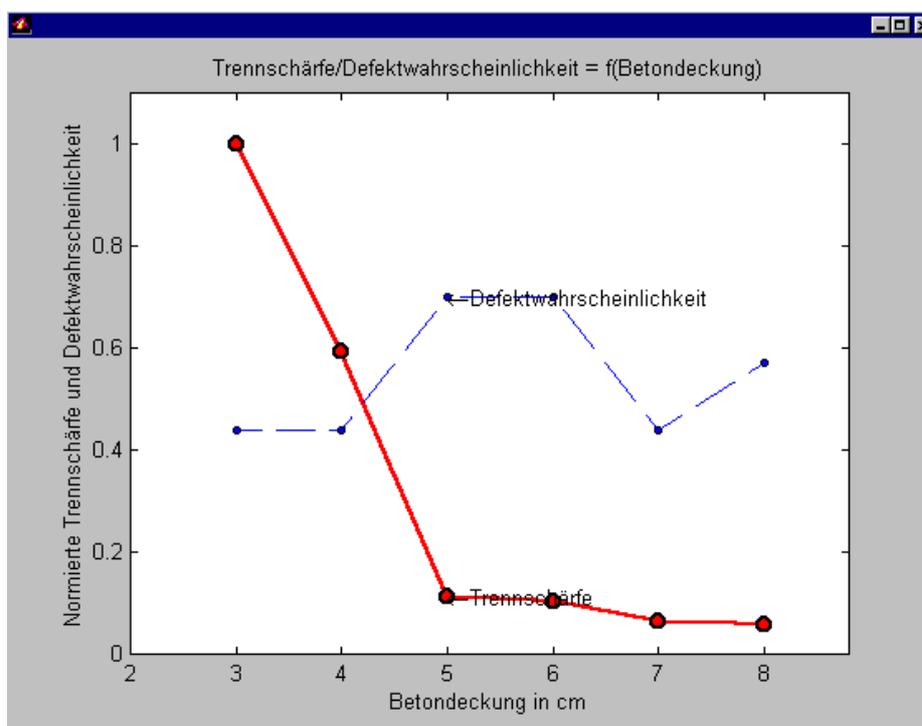


Bild 4.11: Trennschärfe S_{Trenn} in Abh. von der Betondeckung d_{Beton}

In Bild 4.11 ist die normierte Trennschärfe S_{Trenn} in Abhängigkeit von der Betondeckung d_{Beton} bis zu einer Betondeckung von $d_{Beton} = 8\text{cm}$ dargestellt. Ab einer Betondeckung von $d_{Beton} = 9\text{cm}$ kann keine Defektaussage mehr gemacht werden.

Die Werte für die Darstellung Bild 4.11 wurden aus ausgewählten Messreihen (siehe Abschnitt 5.) unter Anwendung des im Messdatenverarbeitungssystem „DEFA“ (siehe Abschnitt 7.4.10) implementierten Berechnungsalgorithmus für eine quantitative Defektaussage entsprechend 4.4 entnommen.

Die Trennschärfe S_{Trenn} zeigt einen mit ansteigender Betondeckung d_{Beton} stark abfallenden Verlauf. Die in Bild 4.11 gestrichelt dargestellte Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} bewegt sich für alle Betondeckungen d_{Beton} in einem Bereich $p_{defekt} > 40\%$.

Die Anwendungsgrenze des magneto-akustischen Verfahrens zur Defektanalyse liegt hinsichtlich der Betondeckung bei $d_{Beton} = 8\text{cm}$.

4.6 Abschätzung des optimalen Abstands Spule/Sensor

Der Abstand Spule/Sensor $d_{Spule/Sens.}$ ist für eine Messreihe konstant zu halten, kann aber für eine andere Messreihe einen anderen Wert annehmen. In den aufgezeichneten Messreihen (siehe Abschnitt 5.) wurden die Abstände 15 cm, 20 cm und 25 cm verwendet. Die visuelle Analyse während der Aufnahme mehrerer Messreihen vermittelte den Eindruck, dass der Abstand 15cm am günstigsten ist. Zur quantitativen Bestätigung dieses Eindrucks ist die Trennschärfe S_{Trenn} in Abhängigkeit vom Abstand Spule/Sensor $d_{Spule/Sens.}$ in Bild 4.12 dargestellt.

Die Werte für die Darstellung Bild 4.12 wurden aus ausgewählten Messreihen (siehe Abschnitt 5.) unter Anwendung des im Messdatenverarbeitungssystem „DEFA“ (siehe Abschnitt 7.4.10) implementierten Berechnungsalgorithmus für eine quantitative Defektaussage entsprechend Abschnitt 4.4 entnommen.

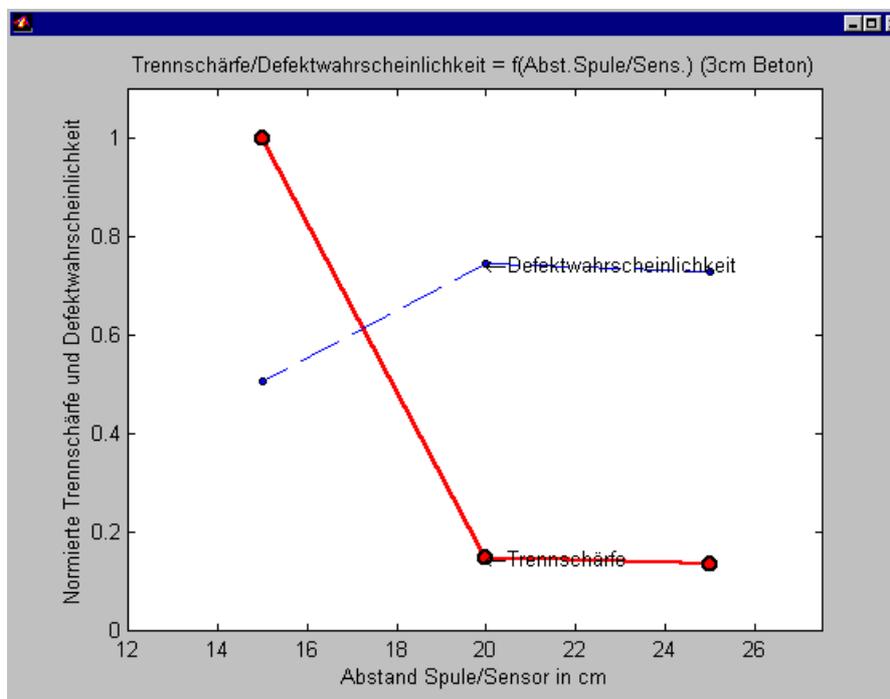


Bild 4.12: Trennschärfe S_{Trenn} in Abhängigkeit vom Abstand Spule/Sensor $d_{Spule/Sens.}$

Die Trennschärfe S_{Trenn} in Abhängigkeit vom Abstand Spule/Sensor $d_{Spule/Sens}$ bestätigt den visuellen Eindruck. Die in Bild 4.12 gestrichelt dargestellte Defektwahrscheinlichkeit p_{defekt} bewegt sich für alle Abstände Spule/Sensor $d_{Spule/Sens}$ im Bereich $p_{defekt} > 60\%$.

Von den verwendeten Abständen Spule/Sensor $d_{Spule/Sens}$ ist der Abstand 15cm der günstigste. Eine weitere deutliche Verkleinerung des Abstands $d_{Spule/Sens}$ ist einerseits wegen der Geometrie der Spule nicht möglich, zum anderen sollten die Sensoren nicht zu hohen magnetischen Feldstärken ausgesetzt werden.

5. Messergebnisse an ausgewählten Probekörpern

Mit Hilfe des Messdatenverarbeitungssystems „DEFA“ (siehe Abschnitt 7.) wurden für unterschiedliche Messobjekte Messreihen entsprechend Versuchsanordnung nach Bild 2.1 aufgenommen, gespeichert und berechnet. Die Ergebnisdarstellung je Messreihe erfolgt einheitlich nach folgendem Schema:

Messreihe (Bezeichnung)
Messobjekt
Messbedingungen
Signalleistung, Korrelationsfeld , quantitative Defektaussage
Kurzkomentar

5.1 Lange Balken

Messreihe: „c1u0“ (Bild 5.1)

Messobjekt (1): Betonbalken 200 cm, Stahlstange intakt

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
Ladespannung U_{soll}	=	300 V
Anz. Sensoren	=	2
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens.}}$	=	20 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

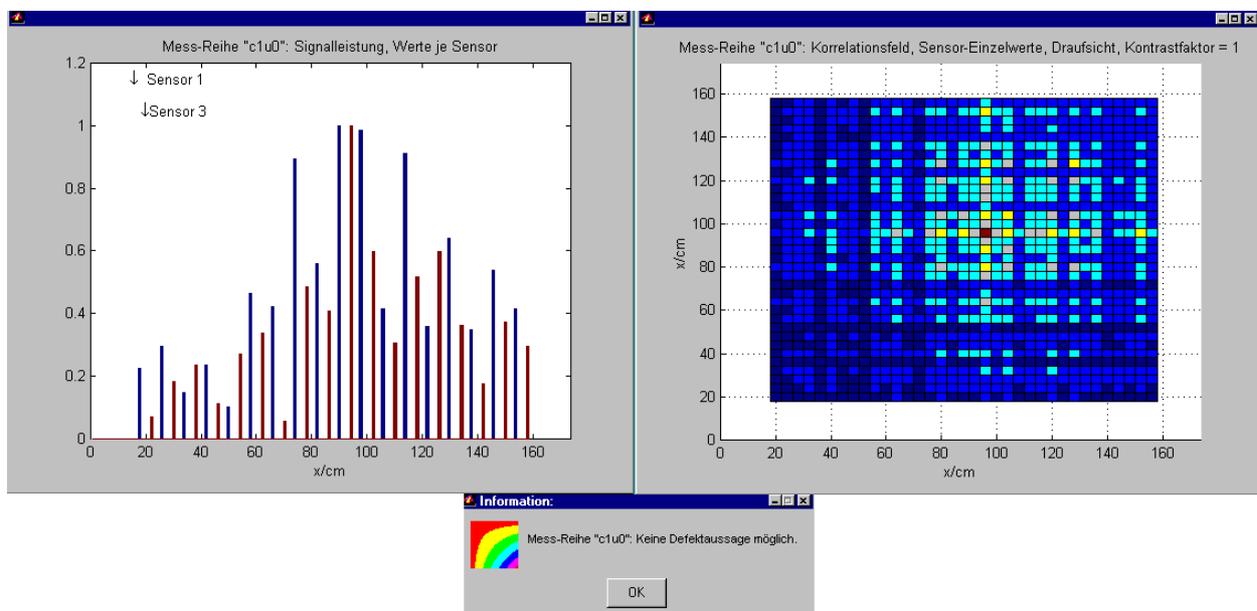


Bild 5.1: Ergebnisse Messreihe „c1u0“

Bei der Messreihe „c1u0“ (Bild 5.1) ist sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld kein Defekt erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

Messreihe: „c1d0“ (Bild 5.2)

Messobjekt (2) : Betonbalken 200 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 100\text{cm}$)

Messbedingungen: Betondeckung d_{Beton} = 3 cm
Ladespannung U_{soll} = 300 V
Anz. Sensoren = 3
Sensorabstand = 2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$ = 20 cm
Zeitbasis t_{Basis} = 100 μs

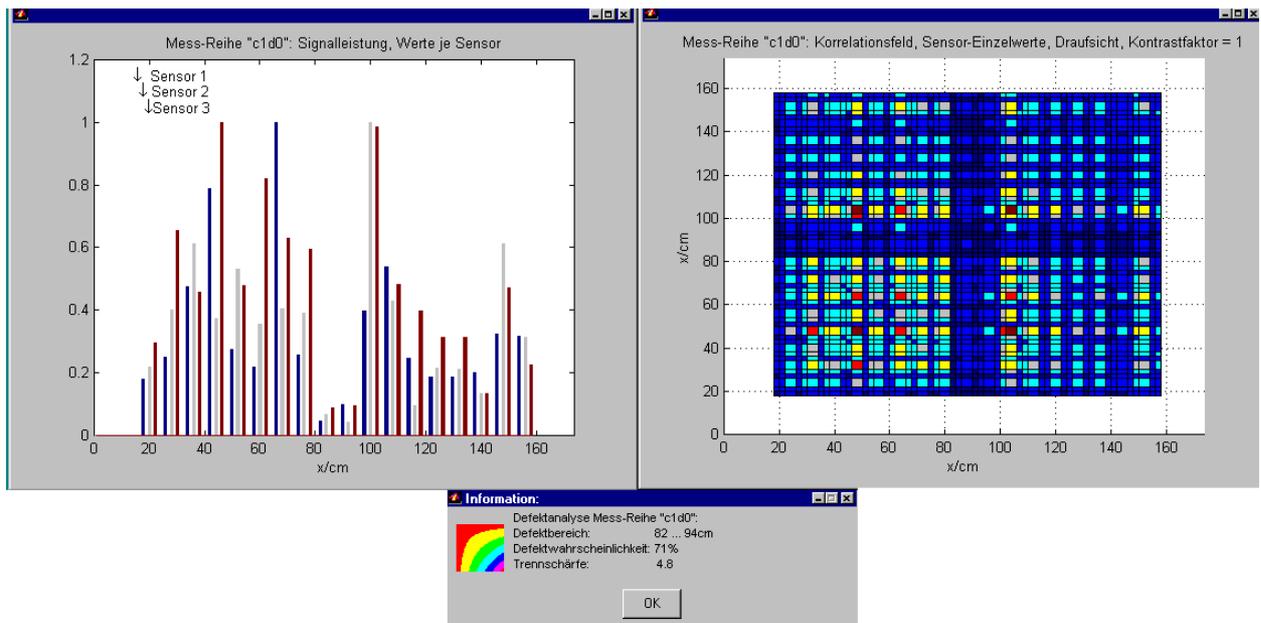


Bild 5.2: Ergebnisse Messreihe „c1d0“

Bei der Messreihe „c1d0“ (Bild 5.2) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

5.2 Kurze Balken

Messreihe: „o331“ (Bild 5.3)

Messobjekt (3): Betonbalken 70 cm, Stahlstange intakt

Messbedingungen: Betondeckung d_{Beton} = 3 cm
Ladespannung U_{soll} = 300 V
Anz. Sensoren = 3
Sensorabstand = 2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$ = 20 cm
Zeitbasis t_{Basis} = 100 μs

Bei der Messreihe „o331“ (Bild 5.3) ist sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld kein Defekt erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

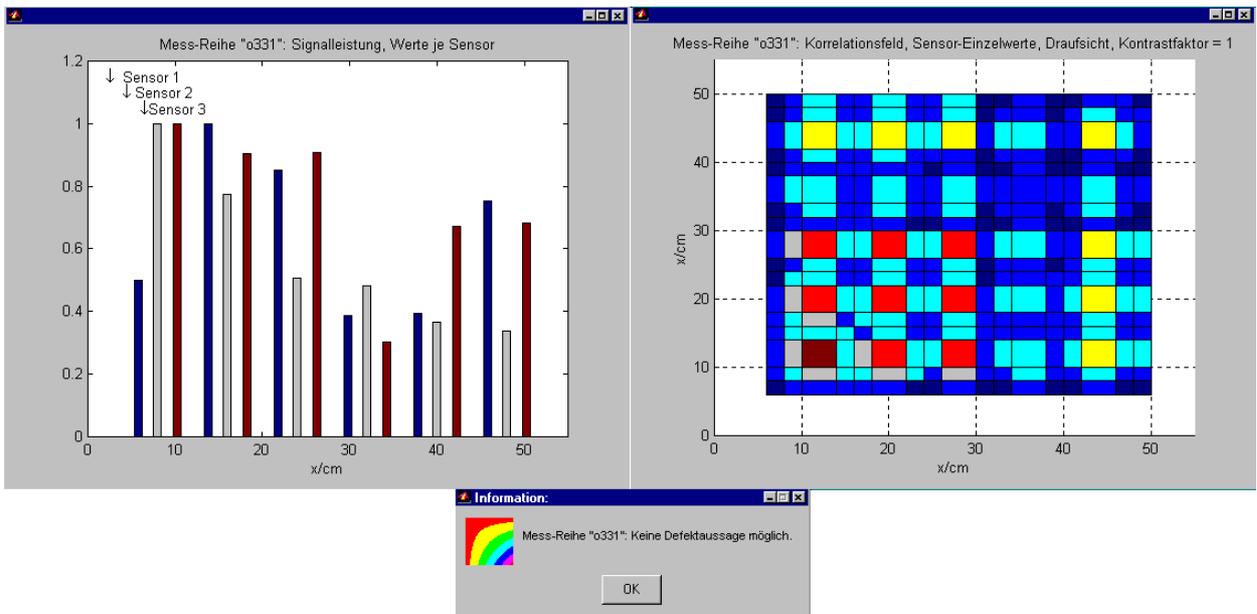


Bild 5.3: Ergebnisse Messreihe „o331“

Messreihe: „k331“ (Bild 5.4)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
Ladespannung U_{soll}	=	300 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	20 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

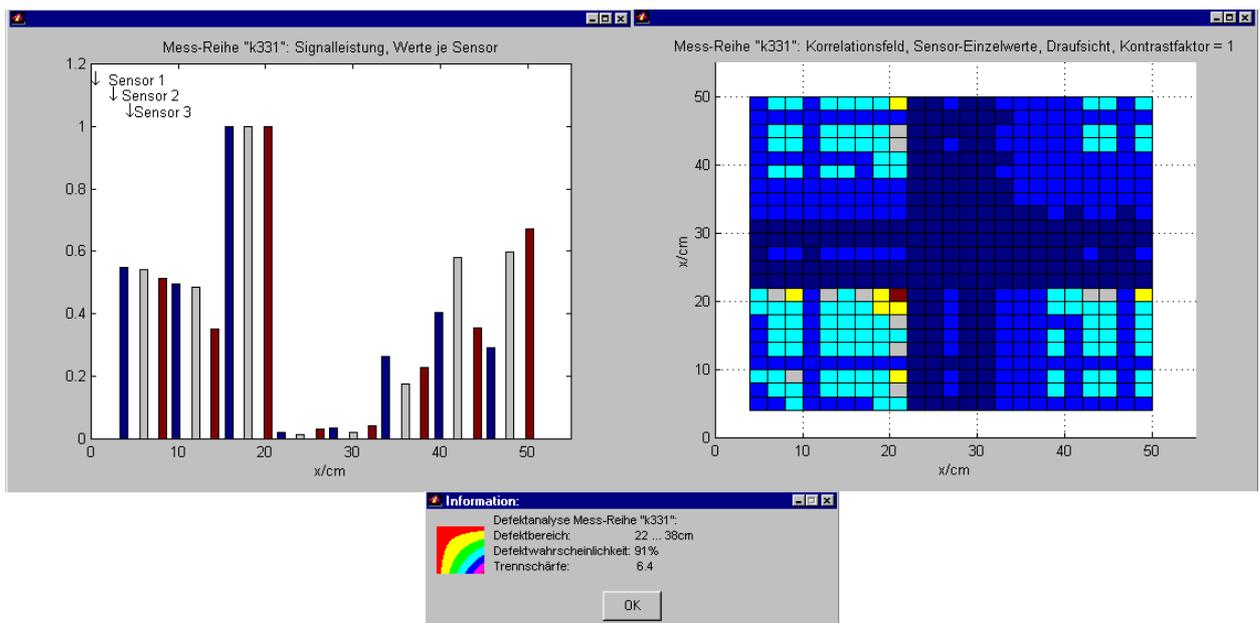


Bild 5.4: Ergebnisse Messreihe „k331“

Bei der Messreihe „k331“ (Bild 5.4) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage.

Messreihe: „k332“ (Bild 5.5)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
Ladespannung U_{soll}	=	300 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

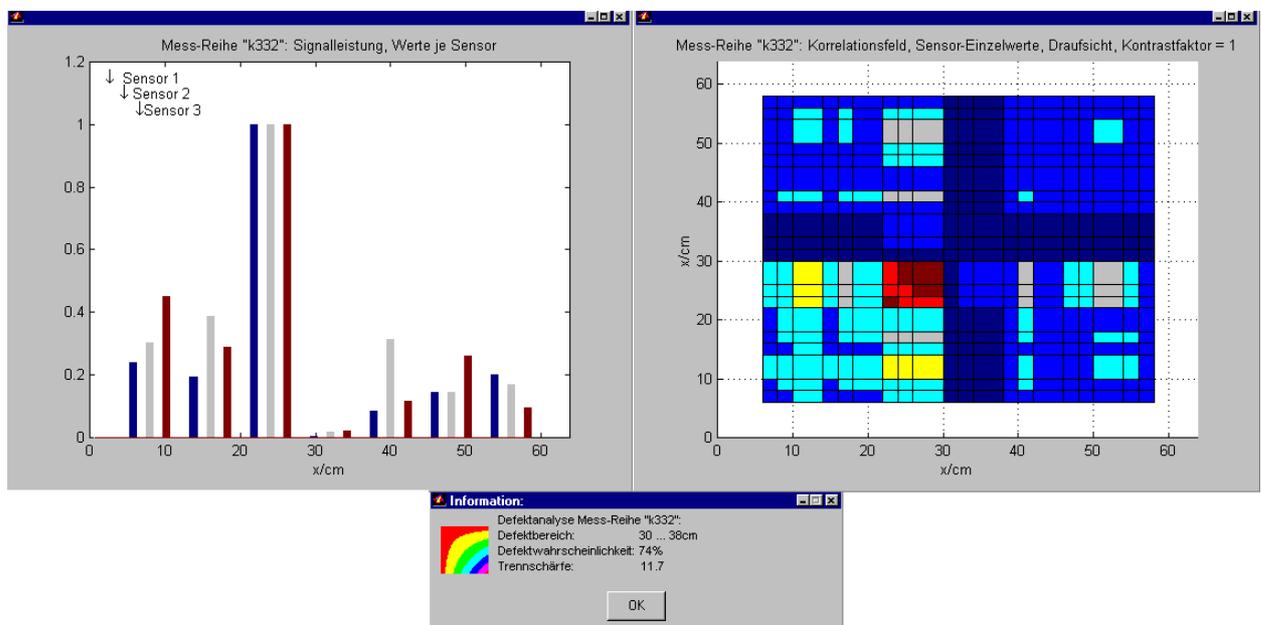


Bild 5.5: Ergebnisse Messreihe „k332“

Bei der Messreihe „k332“ (Bild 5.5) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

Der Unterschied zur vorhergehenden Messreihe „k331“ besteht ausschließlich in der Wahl eines veränderten Abstandes Spule/Sensor (15cm statt 20cm), das Messobjekt ist dasselbe. Der Grund für dieses Vorgehen war die Untersuchung des Einflusses des Abstandes Spule/Sensor und schließlich dessen Optimierung (siehe Abschnitt 4.6).

Messreihe:	„c331“ (Bild 5.6)		
Messobjekt (6):	Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm)		
Messbedingungen:	Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
	Ladespannung U_{soll}	=	300 V
	Anz. Sensoren	=	3
	Sensorabstand	=	2 cm
	Abst. Spule/Sens. $d_{Spule/Sens}$	=	15 cm
	Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μ s

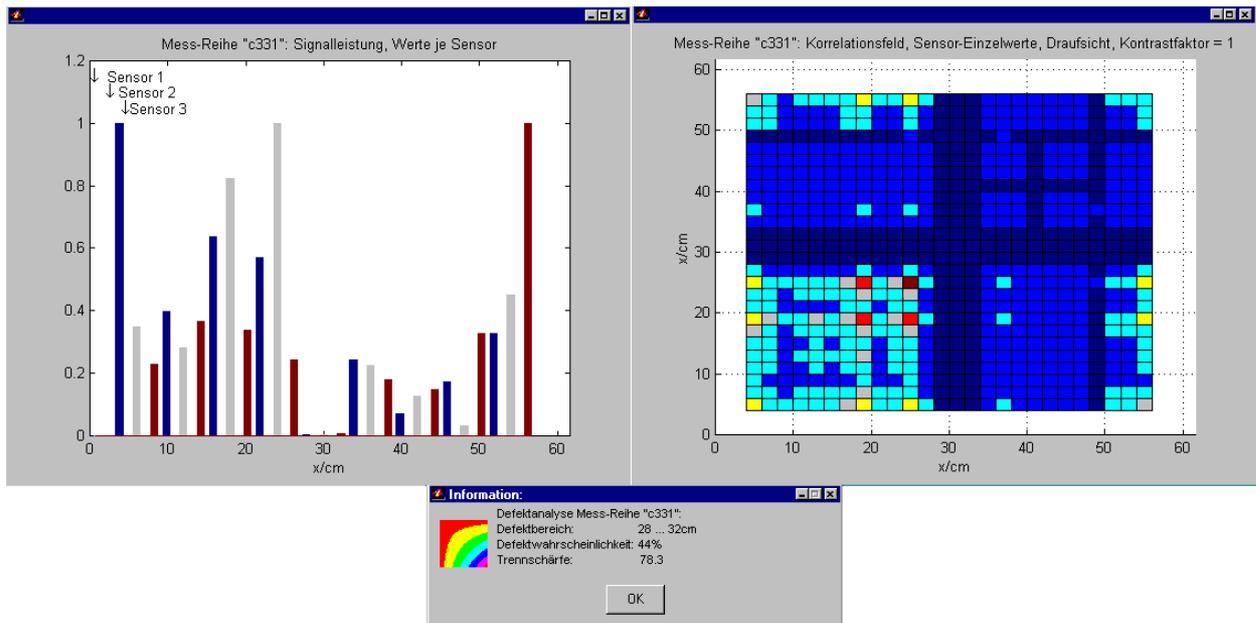


Bild 5.6: Ergebnisse Messreihe „c331“

Bei der Messreihe „c331“ (Bild 5.6) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

Der Unterschied zur vorhergehenden Messreihe „k332“ besteht in der Wahl eines anderen Messobjektes mit ansonsten identischen Messbedingungen, insbesondere gleicher Betondeckung. Der Grund für dieses Vorgehen war die Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Verfahrens („Exemplarstreuung“).

Bei allen bis hierher beschriebenen Messreihen wurde mit einer Betondeckung von 3cm gearbeitet. Bei den folgenden Messreihen wird die Betondeckung schrittweise erhöht, bis das Verfahren ab einer so zu ermittelnden Grenz-Betondeckung nicht mehr funktioniert (siehe Abschnitt 4.5). Die visuelle Erkennbarkeit des Defektes sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld wird sich erwartungsgemäß schrittweise verschlechtern in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage.

Wegen der starken Abnahme der magnetischen Feldstärke mit wachsendem Abstand (siehe Abschnitt 2.) wird die Ladespannung am Impulsmagnetisator U_{soll} proportional zur Betondeckung eingestellt nach der Beziehung $U_{soll} = 100 \frac{\text{V}}{\text{cm}} d_{Beton}$. Diese einfache Faustregel hat sich praktisch sehr gut bewährt.

Messreihe: „k442“ (Bild 5.7)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	4 cm
Ladespannung U_{soll}	=	400 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

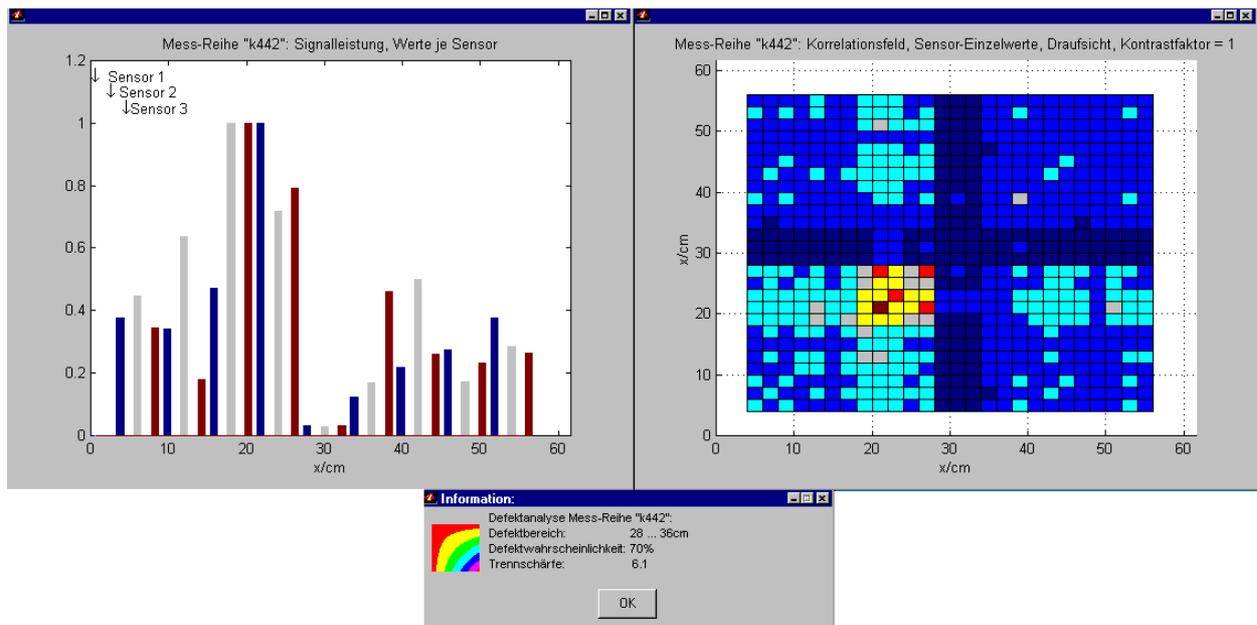


Bild 5.7: Ergebnisse Messreihe „k442“

Bei der Messreihe „k442“ (Bild 5.7) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

Messreihe: „c341“ (Bild 5.8)

Messobjekt (6): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	4 cm
Ladespannung U_{soll}	=	400 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

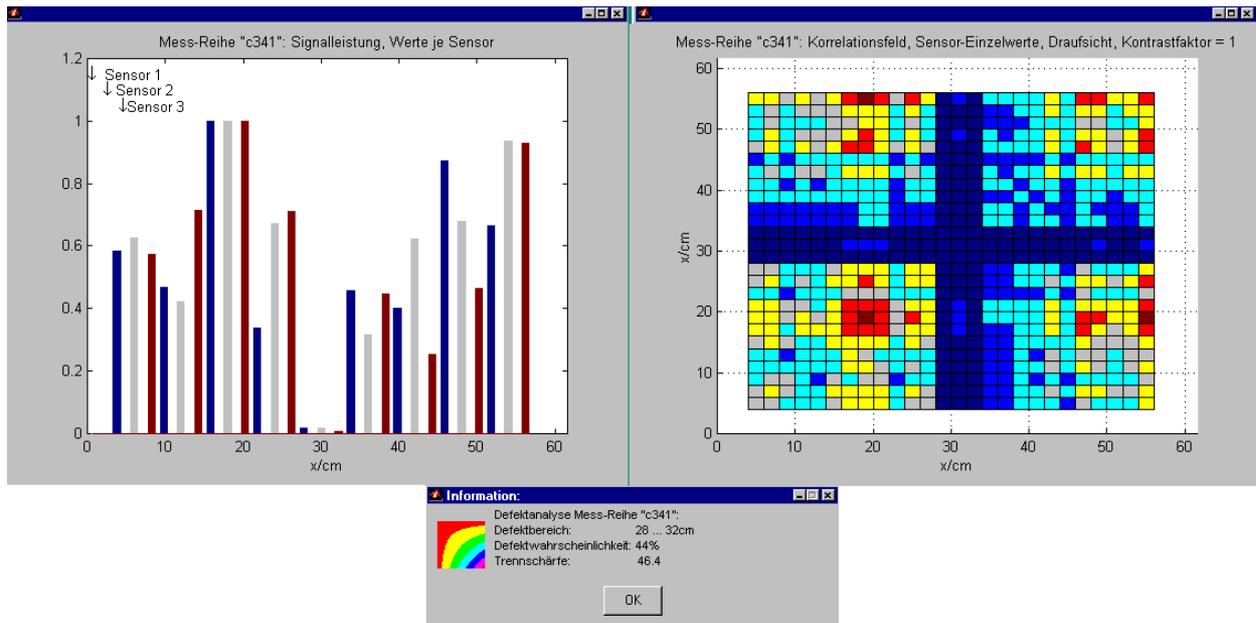


Bild 5.8: Ergebnisse Messreihe „c341“

Bei der Messreihe „c341“ (Bild 5.8) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität.

Der Unterschied zur vorhergehenden Messreihe „k442“ besteht in der Wahl eines anderen Messobjektes mit ansonsten identischen Messbedingungen, insbesondere gleicher Betondeckung. Der Grund für dieses Vorgehen war die Untersuchung der Reproduzierbarkeit des Verfahrens („Exemplarstreuung“).

Messreihe: „c351“ (Bild 5.9)

Messobjekt (5): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	5 cm
Ladespannung U_{soll}	=	500 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

Bei der Messreihe „c351“ (Bild 5.9) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld noch einigermaßen deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität, jedoch verschlechtert sich die Trennschärfe bereits gegenüber den vorangegangenen Messreihen.

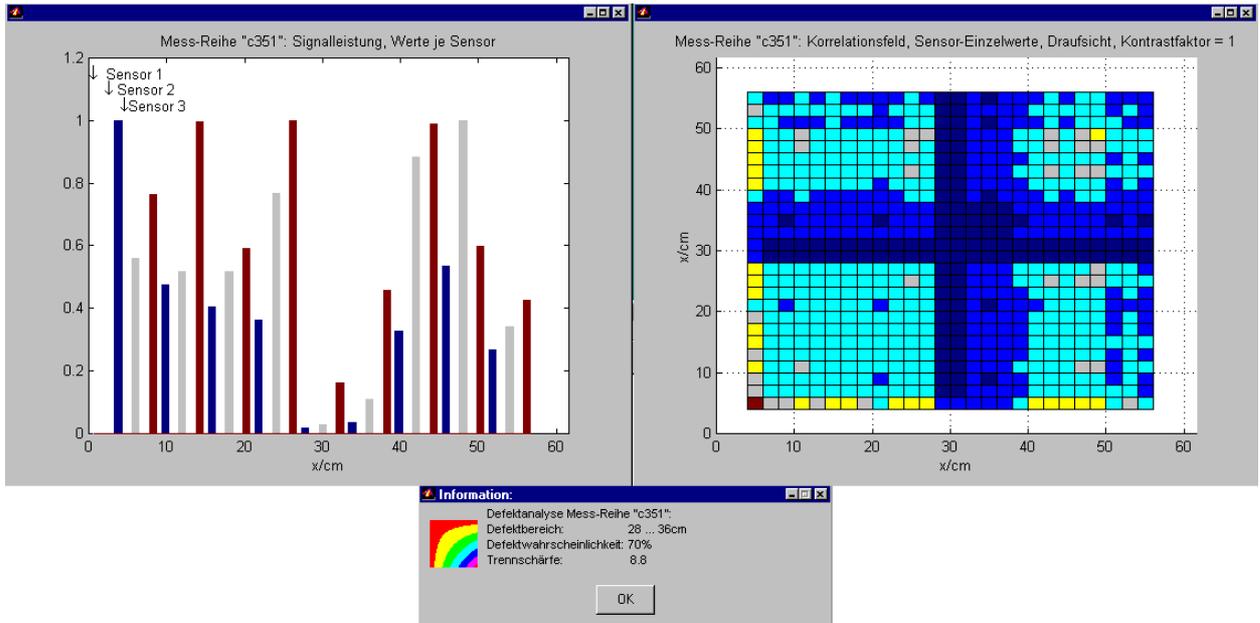


Bild 5.9: Ergebnisse Messreihe „c351“

Messreihe: „c361“ (Bild 5.10)

Messobjekt (5): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	6 cm
Ladespannung U_{soll}	=	600 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{Spule/Sens}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μ s

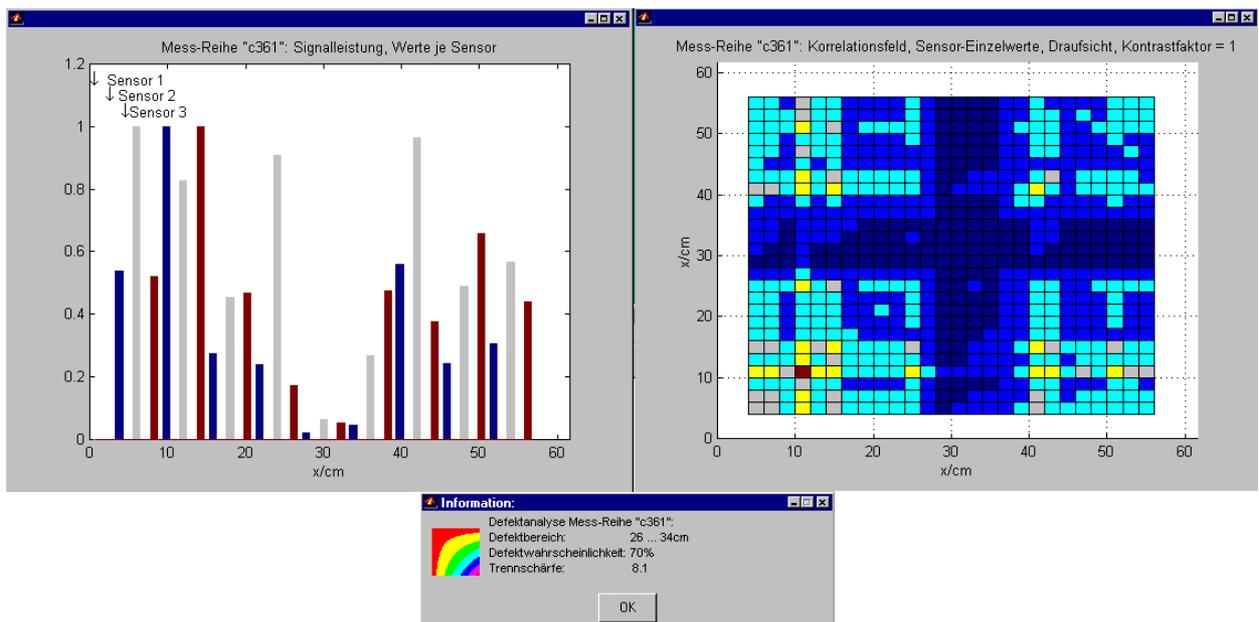


Bild 5.10: Ergebnisse Messreihe „c361“

Bei der Messreihe „c361“ (Bild 5.10) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld noch erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität, jedoch verschlechtert sich die Trennschärfe weiter gegenüber den vorangegangenen Messreihen.

Messreihe: „c371“ (Bild 5.11)

Messobjekt (5): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm)

Messbedingungen: Betondeckung d_{Beton} = 7 cm
 Ladespannung U_{soll} = 700 V
 Anz. Sensoren = 3
 Sensorabstand = 2 cm
 Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$ = 15 cm
 Zeitbasis t_{Basis} = 100 μs

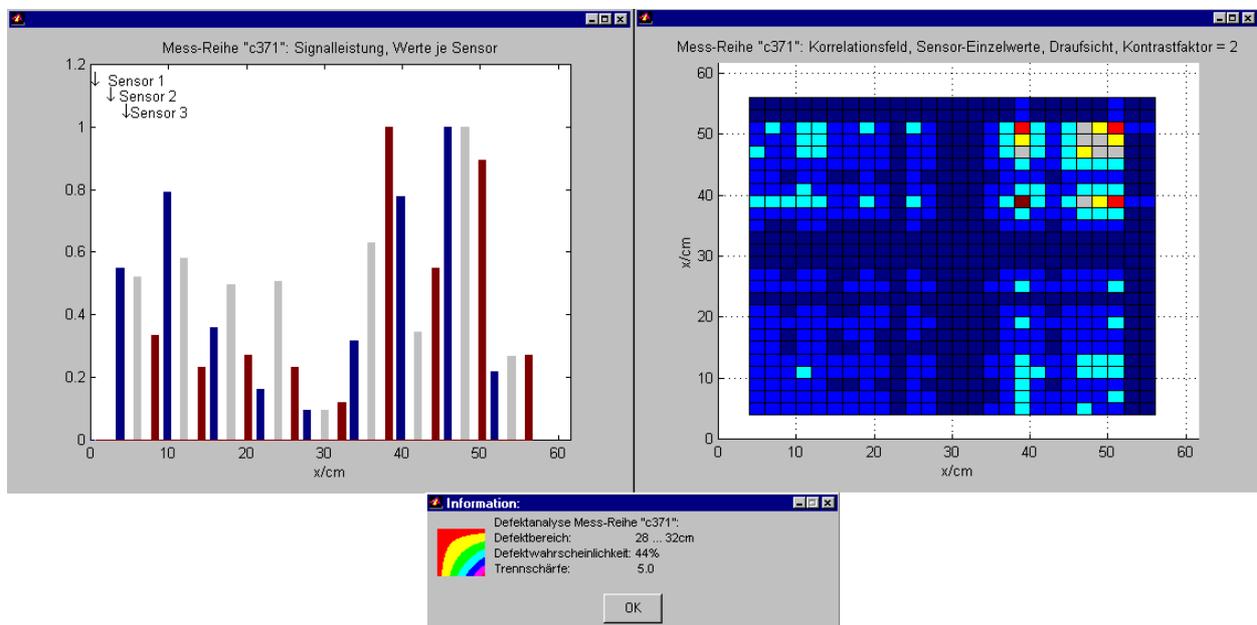


Bild 5.11: Ergebnisse Messreihe „c371“

Bei der Messreihe „c371“ (Bild 5.11) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld gerade noch erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage und der Realität, jedoch verschlechtert sich die Trennschärfe weiter gegenüber den vorangegangenen Messreihen.

Messreihe: „c381“ (Bild 5.12)

Messobjekt (6): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm)

Messbedingungen: Betondeckung d_{Beton} = 8 cm
 Ladespannung U_{soll} = 800 V
 Anz. Sensoren = 3
 Sensorabstand = 2 cm
 Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$ = 15 cm
 Zeitbasis t_{Basis} = 100 μs

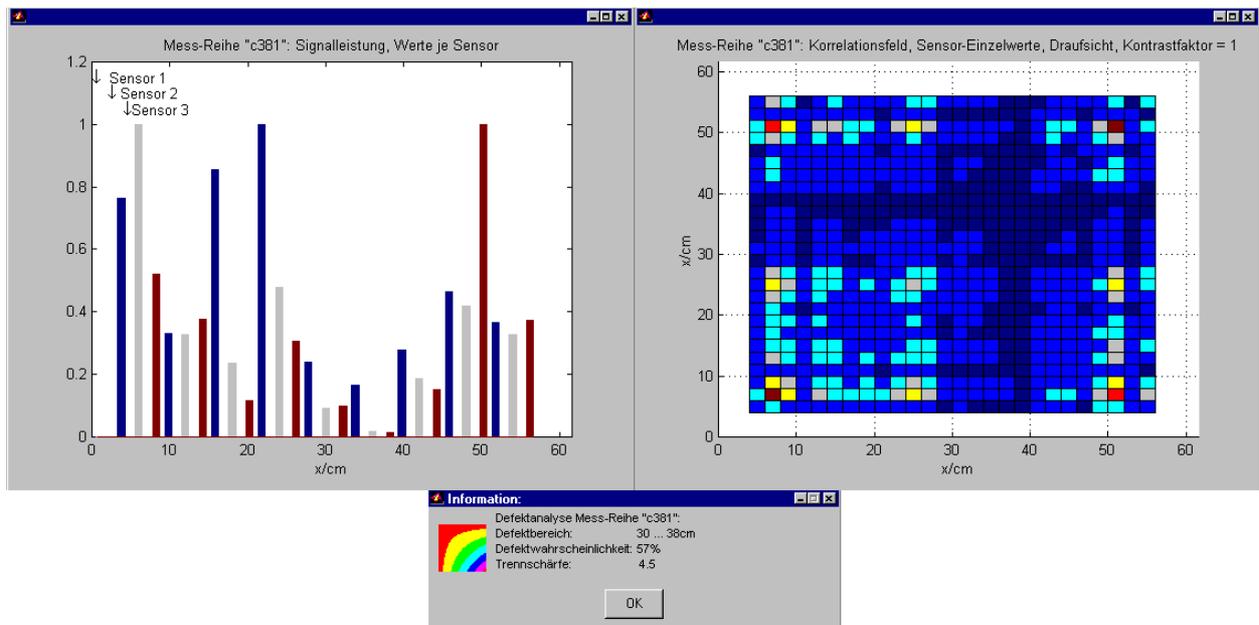


Bild 5.12: Ergebnisse Messreihe „c381“

Bei der Messreihe „c381“ (Bild 5.12) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld kaum noch erkennbar.

Messreihe: „k991“ (Bild 5.13)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	9 cm
Ladespannung U_{soll}	=	900 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

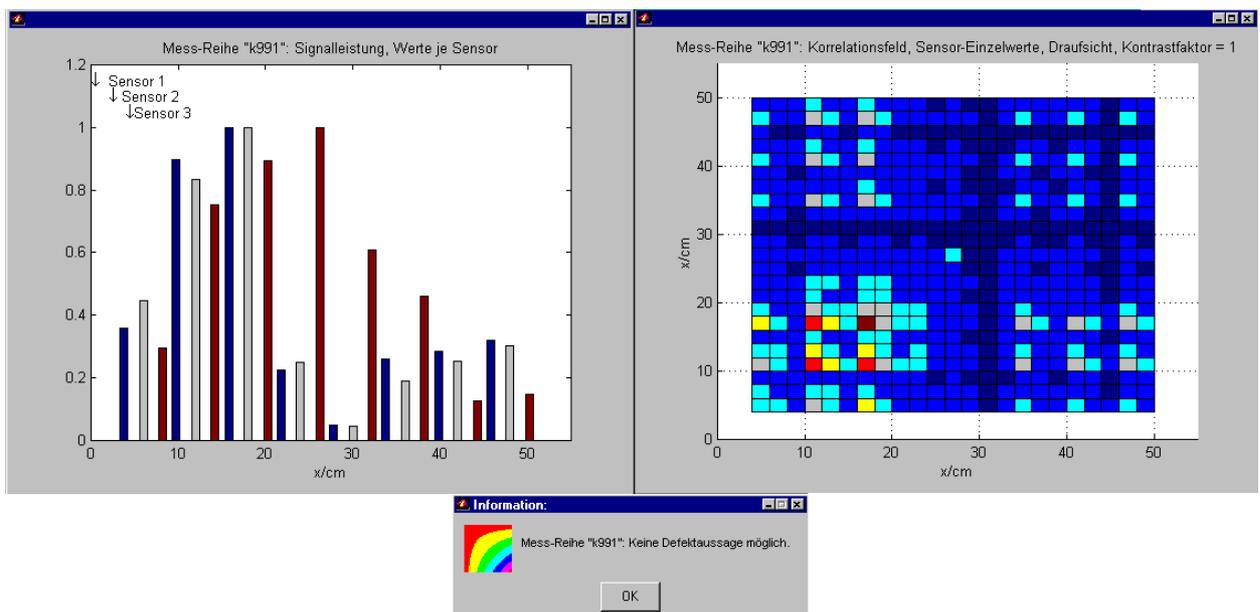


Bild 5.13: Ergebnisse Messreihe „k991“

Bei der Messreihe „k991“ (Bild 5.13) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld nicht mehr erkennbar. Die Grenze der Anwendung des Verfahrens scheint bei einer Betondeckung von 9cm erreicht.

Messreihe: „c391“ (Bild 5.14)

Messobjekt (6): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	9 cm
Ladespannung U_{soll}	=	900 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

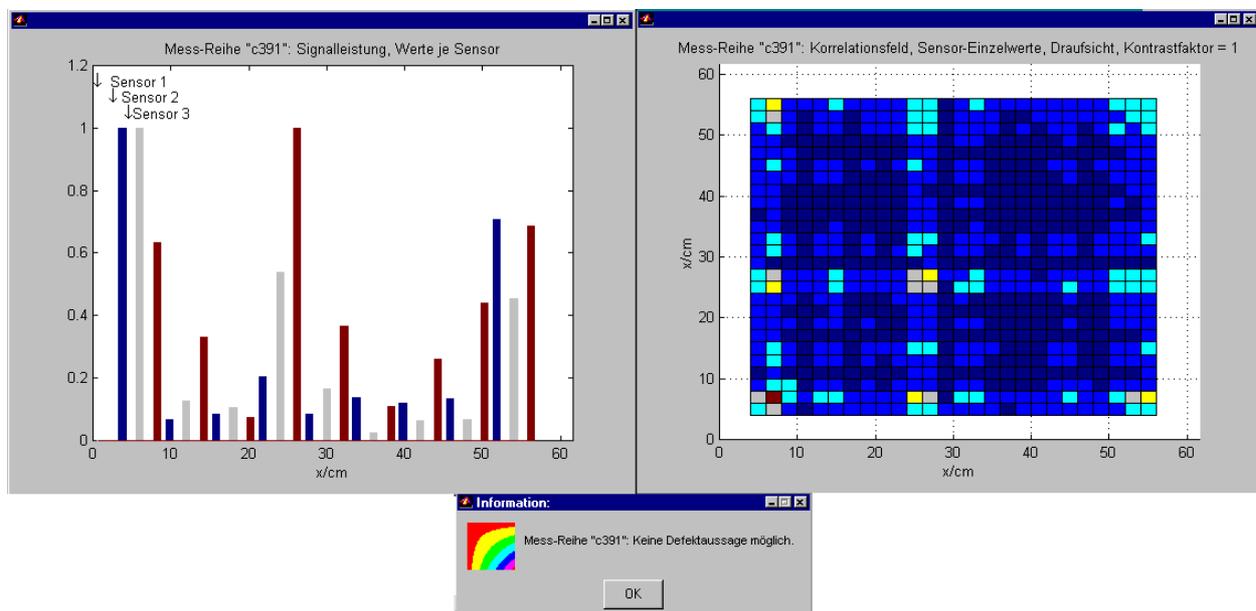


Bild 5.14: Ergebnisse Messreihe „c391“

Bei der Messreihe „c391“ (Bild 5.14) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld nicht mehr erkennbar.

Der Unterschied zur vorhergehenden Messreihe „k991“ besteht in der Wahl eines anderen Messobjektes mit ansonsten identischen Messbedingungen, insbesondere gleicher Betondeckung. Der Grund für dieses Vorgehen war die Bestätigung der Grenze der Anwendung des Verfahrens bei einer Betondeckung von 9cm.

5.3 Verbundprobe

Mit der Verbundprobe soll überprüft werden, ob das Verfahren auch dann funktioniert, wenn sich die zu untersuchende Stahlstange innerhalb eines breiteren Betonbalkens gemeinsam mit einer im Abstand von 20cm parallel angeordneten weiteren Stahlstange befindet. Bild 5.15 enthält die Ergebnisse.

Messreihe:	„verb“ (Bild 5.15)		
Messobjekt (7):	Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm) (Verbundprobe)		
Messbedingungen:	Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
	Ladespannung U_{soll}	=	300 V
	Anz. Sensoren	=	3
	Sensorabstand	=	2 cm
	Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
	Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

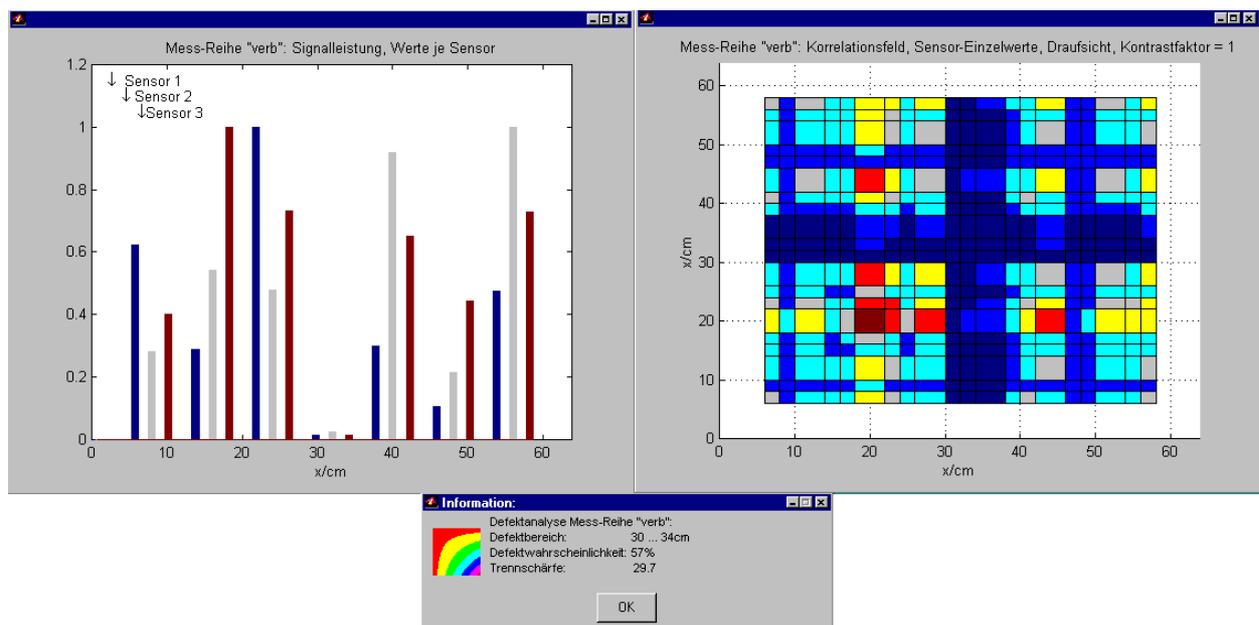


Bild 5.15: Ergebnisse Messreihe „verb“

Bei der Messreihe „verb“ (Bild 5.15) ist der Defekt sowohl im Balkendiagramm für die Signalleistung als auch im Korrelationsfeld deutlich erkennbar in Übereinstimmung mit der quantitativen Defektaussage. Ein Defekt ist also auch innerhalb eines Verbundes detektierbar, insbesondere wirkt sich die im Abstand von 20 cm parallel angeordnete weitere Stahlstange nicht störend aus. Wegen der Reichweite des Magnetfeldes von nur ca. 10 cm war dieses Ergebnis zu erwarten.

5.4 Hüllrohrprobe

Mit der Hüllrohrprobe soll überprüft werden, ob das Verfahren auch dann funktioniert, wenn die zu untersuchende Stahlstange von einem Hüllrohr umgeben ist, wobei der Zwischenraum Hüllrohr/Stahlstange mit Beton verfüllt ist. Bild 5.16 enthält die Ergebnisse.

Messreihe:	„hüll“ (Bild 5.16)		
Messobjekt (8):	Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei x = 35cm) (Hüllrohrprobe)		
Messbedingungen:	Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
	Ladespannung U_{soll}	=	300 V
	Anz. Sensoren	=	3
	Sensorabstand	=	2 cm
	Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
	Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

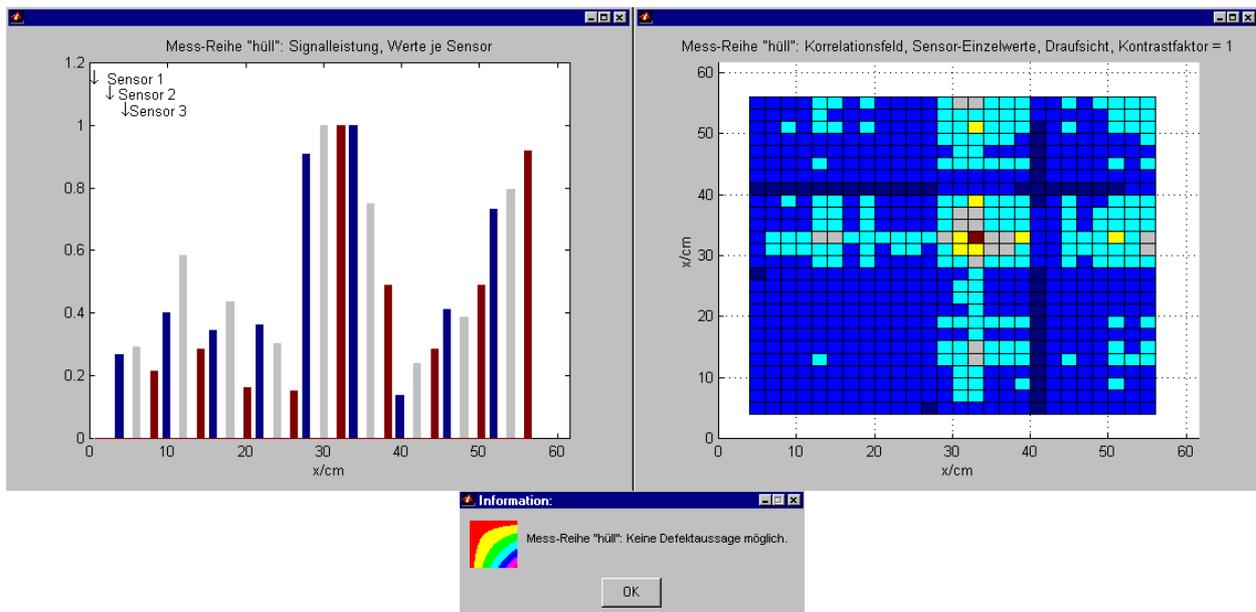


Bild 5.16: Ergebnisse Messreihe „hüll“

Bei der Messreihe „hüll“ (Bild 5.16) ist der Defekt überraschenderweise nicht detektierbar. Die Ursache ist noch unklar. Möglicherweise wirkt das Hüllrohr wie ein „akustischer Kurzschluss“ über dem Bruch oder Riss, oder der mit Beton verfüllte (nicht verpresste!) Zwischenraum Hüllrohr/Stahlstange weist Inhomogenitäten auf. Zu diesem Problem sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

5.5 Messungen mit abweichender Versuchsanordnung

Sämtliche bis hierher beschriebenen Messreihen wurden entsprechend Versuchsanordnung nach Bild 2.1 aufgenommen. Bild 5.17 zeigt die Seitenansicht von Bild 2.1: Die Symmetrieachse der Luftspule und die der Sensoren stehen parallel zueinander. Abweichend von dieser Versuchsanordnung wurde die Luftspule für die folgenden Messreihen so angeordnet, dass die Symmetrieachse der Luftspule und die der Sensoren senkrecht aufeinander stehen (Bild 5.18).

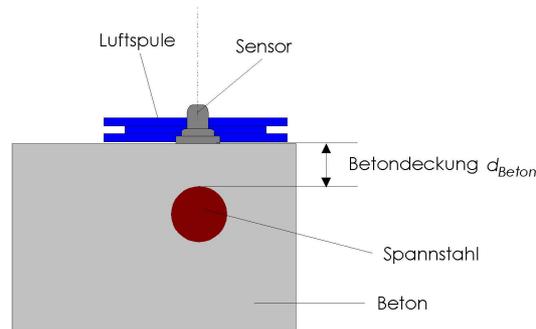


Bild 5.17: Seitenansicht der Versuchsanordnung entsprechend Bild 2.1

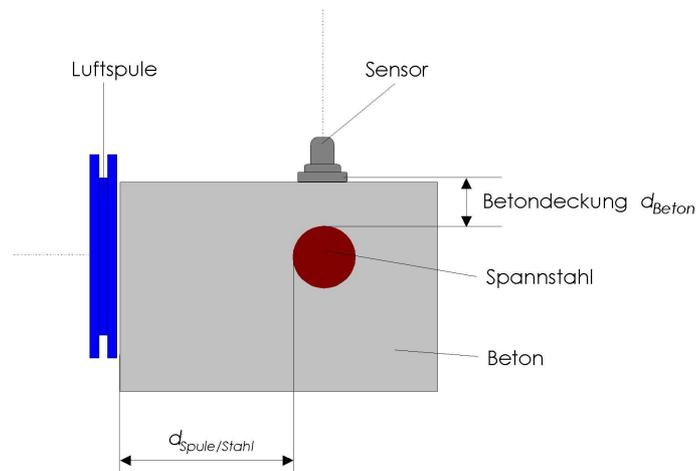


Bild 5.18: Seitenansicht der abweichenden Versuchsanordnung

Bei den bis hierher beschriebenen Messreihen entsprechend Bild 5.17 traf der Begriff „Betondeckung“ sowohl für die Luftspule als auch für den Sensor in einheitlichem Sinn zu, so dass es ausreichte, das Formelzeichen „ d_{Beton} “ dafür zu verwenden. Die variierte Versuchsanordnung erfordert nun, die „Betondeckung bezüglich Sensor“ von der „Betondeckung bezüglich Luftspule“ zu unterscheiden. Für die „Betondeckung bezüglich Sensor“ wird nach wie vor das Formelzeichen „ d_{Beton} “ verwendet, für die „Betondeckung bezüglich Luftspule“ wird das Formelzeichen „ $d_{\text{Spule/Stahl}}$ “ gewählt.

Die Messungen mit abweichender Versuchsanordnung wurden aus folgenden Gründen durchgeführt:

Zunächst ist es prinzipiell von Interesse, ob analoge Ergebnisse erzielt werden, wenn die Richtung der magnetischen Anregung und die vom Sensor aufgenommene Schwingungsrichtung nicht wie bisher übereinstimmen, sondern um 90° versetzt sind (Messreihe „k334“, Bild 5.19).

Zum anderen soll damit untersucht werden, ob hinsichtlich der Anwendungsgrenze des Verfahrens die „Betondeckung bezüglich Luftspule $d_{\text{Spule/Stahl}}$ “ oder die „Betondeckung bezüglich Sensor d_{Beton} “ den entscheidenden Einfluss ausübt (Messreihe „k992“, Bild 5.20 und Messreihe

„k993“, Bild 5.21). Bei den genannten Messreihen sind die Werte für d_{Beton} und $d_{\text{Spule/Stahl}}$ einfach vertauscht. Falls eine Messreihe bessere Ergebnisse zeigt als die andere, können entsprechende Rückschlüsse gezogen werden.

Messreihe: „k334“ (Bild 5.19)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
Betondeckung $d_{\text{Spule/Stahl}}$	=	4 cm
Ladespannung U_{soll}	=	300 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

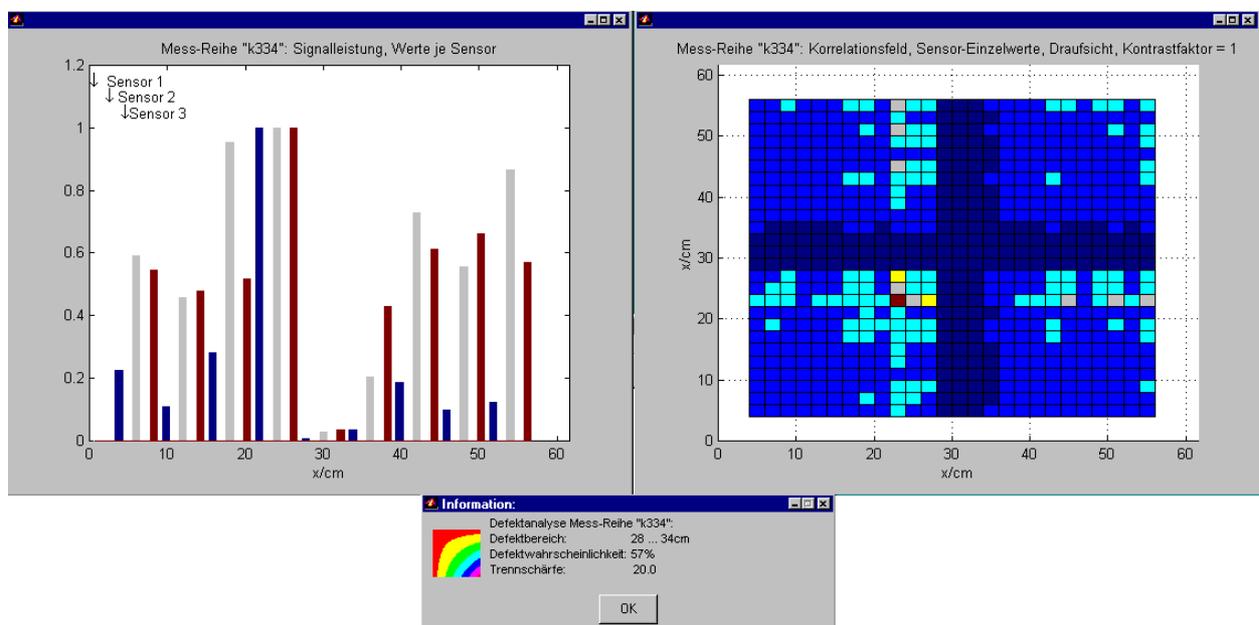


Bild 5.19: Ergebnisse Messreihe „k334“

Da sich bei der Messreihe „k334“ (Bild 5.19) d_{Beton} und $d_{\text{Spule/Stahl}}$ um nur 1cm unterscheiden und die Ergebnisse in etwa mit denen der Messreihe „k332“ (Bild 5.5) übereinstimmen, kann daraus geschlossen werden, dass es unwesentlich ist, wenn die Richtung der magnetischen Anregung und die vom Sensor aufgenommene Schwingungsrichtung nicht übereinstimmen, sondern um um 90° versetzt sind.

Messreihe: „k992“ (Bild 5.20)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	9 cm
Betondeckung $d_{\text{Spule/Stahl}}$	=	3 cm
Ladespannung U_{soll}	=	300 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	15 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

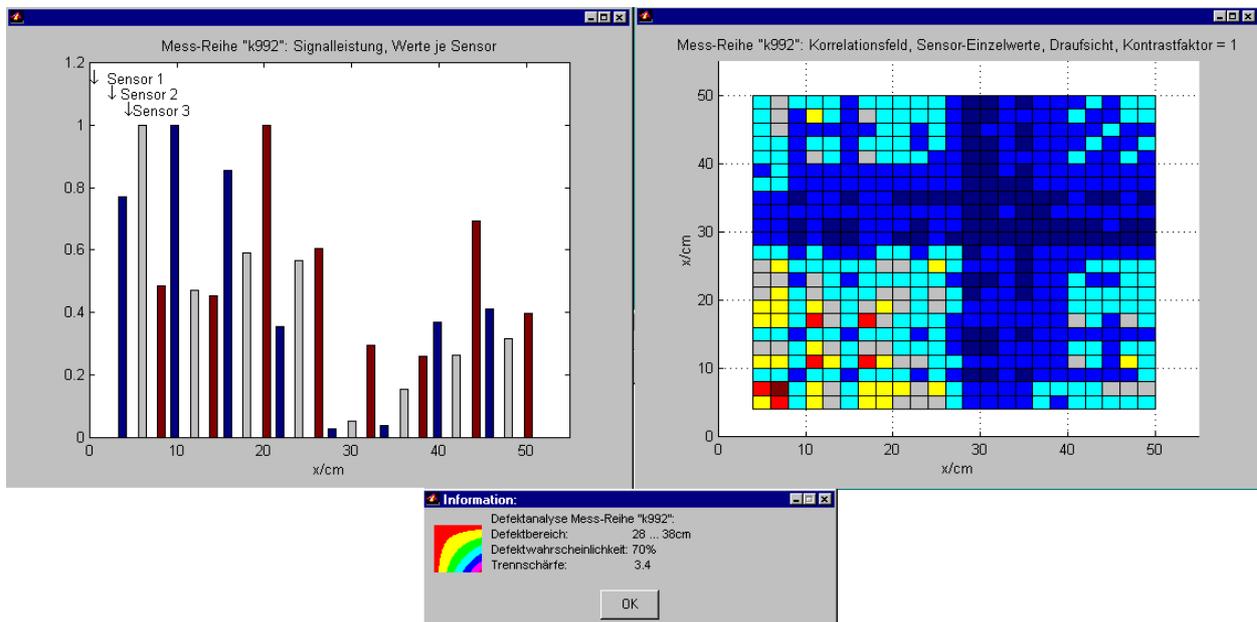


Bild 5.20: Ergebnisse Messreihe „k992“

Messreihe: „k993“ (Bild 5.21)

Messobjekt (4): Betonbalken 70 cm, Stahlstange defekt (bei $x = 35\text{cm}$)

Messbedingungen:

Betondeckung d_{Beton}	=	3 cm
Betondeckung $d_{\text{Spule/Stahl}}$	=	9 cm
Ladespannung U_{soll}	=	900 V
Anz. Sensoren	=	3
Sensorabstand	=	2 cm
Abst. Spule/Sens. $d_{\text{Spule/Sens}}$	=	20 cm
Zeitbasis t_{Basis}	=	100 μs

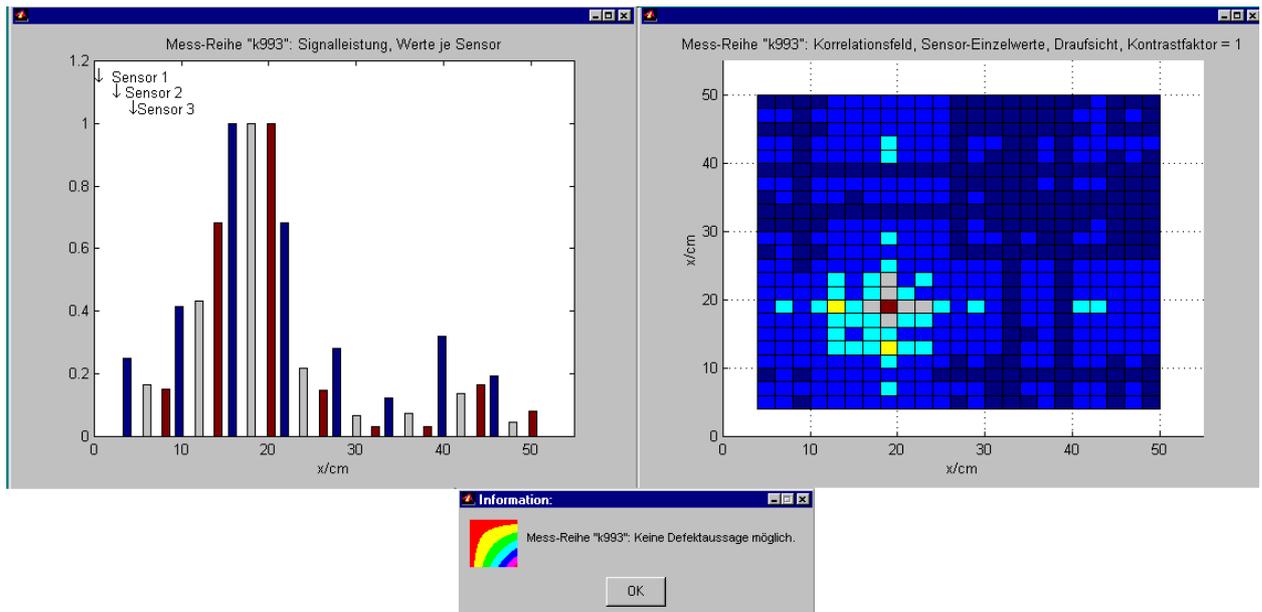


Bild 5.21: Ergebnisse Messreihe „k993“

Die Analyse der Messreihen „k992“ (Bild 5.20) und Messreihe „k993“ (Bild 5.21) liefert das Ergebnis, dass der Einfluss der „Betondeckung bezüglich Luftspule $d_{Spule/Stahl}$ “ größer ist als der Einfluss der „Betondeckung bezüglich Sensor d_{Beton} “. Die Reichweite des Magnetfeldes verhält sich kritischer als der längere Weg, den der Körperschall im Beton bis zum Sensor zurückzulegen hat. Bemerkenswert ist weiterhin, dass auch die Erhöhung des Impulsstroms das Problem „Reichweite des Magnetfeldes“ nicht kompensieren kann.

5.6 Defekte im Beton

Bei den bis hierher beschriebenen Messreihen sind die Messobjekte so beschaffen, dass die defekte (oder intakte) Stahlstange von Beton umgeben ist, der selbst keine Defekte aufweist. Ursprünglich so nicht beabsichtigt, stand jedoch gegen Ende der Bearbeitungszeit ein Messobjekt zur Verfügung, bei dem die Stahlstange von defektem Beton umgeben ist: der Betonbruch verläuft zwischen den Sensoren 1 und 3 ungefähr bis zur Mitte des Betonbalkens (Bild 5.22).



Bild 5.22: Balken mit defektem Beton

Aus Zeitmangel konnten keine umfassenden Untersuchungen durchgeführt werden, nur für 2 unterschiedliche Abstände x stehen die Signalverläufe zur Verfügung (Bild 5.23), wobei die relativ große Zeitbasis $t_{Basis} = 2$ ms zu wählen war. Die grau dargestellten Signalverläufe gehören zur Position der Sensoren in unmittelbarer Nähe zum Betonbruch, wie in Bild 5.22 gezeigt, während die grün dargestellten Signalverläufe einer davon entfernten Position entsprechen. Die Ergebnisse können im Rahmen der noch verfügbaren Zeit nicht komplett interpretiert werden. Die deutlichen Unterschiede weisen jedoch darauf hin, dass ggf. auch Betondefekte mit magneto-akustischen Verfahren detektierbar sein könnten. Interessant ist bei den grau dargestellten Signalverläufen der Unterschied zwischen Signal Sensor 1 (links vom Betonbruch) einerseits und den Signalen Sensor 2 und Sensor 3 andererseits (rechts vom Betonbruch): Die Signale im Zeitbereich bis 0,2 ms verlaufen „gegenphasig“.

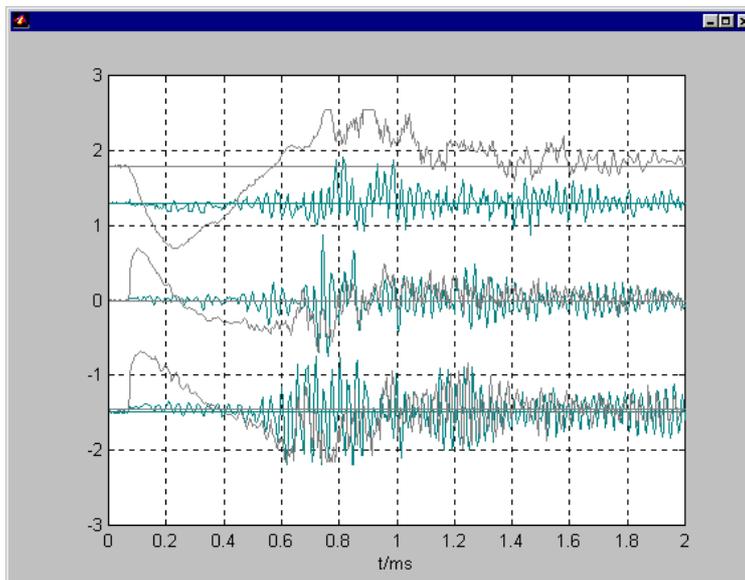


Bild 5.23: Signalverlauf bei defektem Beton

5.7 Bewertung der Ergebnisse

Das in Abschnitt 4. entwickelte magneto-akustische Verfahren zur Defektanalyse von Spannstählen in Beton wurde an mehreren Messobjekten erprobt.

Als Messobjekte dienen praxisnahe Probekörper, bei denen der Spannstahl mit Riss in Beton durch zwei in geringem Abstand voneinander einbetonierte Stahlstangen mit ebenen Rissflächen simuliert wird, wobei der Stahl nicht unter mechanischer Spannung steht.

Mit dem Verfahren wurden sämtliche Defekte bis zu einer Betondeckung $d_{Beton} = 8$ cm erfolgreich detektiert, sofern der Beton selbst frei von Defekten und der Spannstahl nicht von einem Hüllrohr umgeben ist.

Für den Fall, dass der Beton selbst Defekte aufweist (siehe Abschnitt 5.6), sind weitere Untersuchungen notwendig, ebenso für den Fall, dass der Spannstahl von einem Hüllrohr umgeben ist (siehe Abschnitt 5.4).

Weitere Untersuchungen sind notwendig, indem die praxisnahen Probekörper durch reale Spannstähle, die unter mechanischer Spannung in den Beton eingebracht wurden und nichtebene Rissflächen aufweisen, ersetzt werden. Schließlich ist zu untersuchen, ob das Verfahren auch für komplette Spannglieder anwendbar ist.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das in Abschnitt 4. entwickelte neue magneto-akustische Verfahren zur Defektanalyse von Spannstählen in Beton wurde an mehreren praxisnahen Probekörpern erfolgreich getestet.

Bei diesem Prüfverfahren werden Spannstähle durch den umhüllenden Beton hindurch magnetisch so angeregt, dass sie akustische Signale abgeben. Die Auswertung dieser Signale liefert Aussagen über Risse und Brüche in den Spannstählen.

Mit dem Verfahren wurden Defekte bis zu einer Betondeckung von 8 cm erfolgreich detektiert.

Weitere Untersuchungen sind notwendig, indem die praxisnahen Probekörper durch reale Spannstähle, die unter mechanischer Spannung in den Beton eingebracht wurden und nichtebene Rissflächen aufweisen, ersetzt werden. Schließlich ist zu untersuchen, ob das Verfahren auch für komplette Spannglieder anwendbar ist.

Für den Fall, dass der Beton selbst Defekte aufweist (siehe Abschnitt 5.6), sind weitere Untersuchungen notwendig, ebenso für den Fall, dass der Spannstahl von einem Hüllrohr umgeben ist (siehe Abschnitt 5.4).

Weiterhin sollte untersucht werden, ob eine Erhöhung der Betondeckung über 8 cm hinaus durch Vergrößerung der Spule möglich ist (da die Reichweite des Magnetfeldes ungefähr dem Radius des größten Drahringes entspricht, siehe Abschnitt 2.).

Die Anwendung des magneto-akustischen Verfahrens zur Defektanalyse von Spannstählen in Beton setzt voraus, dass sowohl die Lage von Spannelemente im Beton als auch die Betondeckung bekannt sind. Dieser Sachverhalt stellt keine Einschränkung der Anwendbarkeit dar, weil beispielsweise Georadar die Ortung von Eisenteilen im Beton ermöglicht und somit der Vorbereitung der Anwendung des magneto-akustischen Verfahrens dienen kann.

Es ist aber prinzipiell auch möglich, das magneto-akustische Verfahren selbst für die Ortung heranzuziehen: die bisher eindimensionale Erfassung der Beschleunigungssignale kann ohne prinzipielle Probleme auf zweidimensionale Verfahrensweise ausgedehnt werden, wobei die Abhängigkeit der Signalleistung in von der Betondeckung (siehe Abschnitt 4.5, Bild 4.10) genutzt werden kann.

Der angedeutete Übergang zu einer zweidimensionalen Verfahrensweise würde erfordern, dass sehr viel mehr Messwerte erfasst werden müssten. Dies würde eine deutliche Verbesserung der bisher verwendeten Verfahrenstechnologie verlangen. Zu diesem Problem sollten folgende Untersuchungen angestellt werden:

Z. Zt. werden die Beschleunigungssensoren mit Wachs auf das Messobjekt geklebt. Diese Form der Befestigung ist angesichts der notwendigen zweidimensional scannenden Verfahrensweise ineffektiv. Eine Verbesserung in dieser Hinsicht wäre durch berührungslose Schwingungsaufnahme (evtl. Vibrometer) denkbar. Eine andere Entwicklungsrichtung bestünde im Einsatz eines Sensor-Arrays, wobei die Sensoren über gefederte Spitzen an das Messobjekt gekoppelt werden. Hierbei sind jedoch massive Kopplungsprobleme zu erwarten.

Weiterhin ist z. Zt. die Datenübertragung vom Speicheroszilloskop Le Croy LC534A zum Messrechner sehr langsam (pro Signal einige Sekunden). Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Datenübertragungsgeschwindigkeit besteht darin, die Schnittstelle RS232C durch GPIB (General Purpose Interface Bus) zu ersetzen. Eine weitere Verbesserung des Zeitverhaltens könnte erreicht werden, wenn der Datentransfer vom Speicheroszilloskop Le Croy LC534A statt mit dem **INSPECT?**-Kommando (einfache Programmierung, aber lange Laufzeit) mit dem **WAVEFORM?**-Kommando (umfangreiche Programmierung, aber geringe Laufzeit) realisiert würde [9].

7. Inbetriebnahme

Das Messdatenverarbeitungssystem „DEFA – Defektanalyse bei Stahlbeton“ steuert den Datenaustausch des Messrechners mit dem Speicheroszilloskop Le Croy LC534A und übernimmt die Erfassung, Speicherung und Verarbeitung der Signale.

7.1 Systemvoraussetzungen Hardware – Software

Als Messrechner wird ein PC Intel Pentium III mit dem Betriebssystem Windows98 verwendet, der über ein 9-poliges RS232C-Nullmodemkabel mit dem Speicheroszilloskop Le Croy LC534A verbunden ist.

Die Installation von MATLAB 5.3.0.10183 (Release 11) auf dem Messrechner wird vorausgesetzt und ist nicht Bestandteil von 7.3.

7.2 Softwaretechnische Realisierung

Die Programmierung des Messdatenverarbeitungssystems DEFA erfolgte mit MATLAB 5.3.0.10183 (Release 11).

Zur Realisierung des physischen Datenaustausches mit dem Speicheroszilloskop Le Croy LC534A über die RS232C-Schnittstelle wurde der Modul „Cntrl_Oszi.EXE“ in Visual Basic 4.0 (32-Bit-Version) erstellt und in das System eingebunden. Diese Vorgehensweise war erforderlich, da es nach [8] erst ab MATLAB (Release 12) möglich ist, mit Hilfe der *Instrument Control Toolbox* externe Geräte direkt mit MATLAB zu steuern.

Falls MATLAB (Release 12) zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung steht, kann der Modul „Cntrl_Oszi.EXE“ durch die entsprechende MATLAB-Komponente ersetzt werden. Der Modul „Cntrl_Oszi.EXE“ benötigt das Laufzeitsystem von Visual-Basic.

7.3 Software-Installation

Zuerst ist die auf der DEFA-Installations-CD befindliche selbstentpackende Datei „DEFA_InStall.EXE“ auszuführen. Dabei wird die Angabe des Zielverzeichnisses angefordert. Für die folgenden Verzeichnisangaben wird vorausgesetzt, dass sich das Zielverzeichnis mit dem Namen „DEFA“ im Laufwerk C: befindet.

Anschließend ist die Batch-Datei „C:\DEFA\Install\Install.BAT“ auszuführen. Mit diesem Schritt wird das Laufzeitsystem von Visual-Basic in das Windows-System installiert, außerdem wird ein Icon „DEFA_Matlab“ auf den Desktop gelegt, welches bereits beim Start von Matlab das gewünschte Verzeichnis „C:\DEFA\DEFA_M_Files“ einstellt.

Wird ein anderes Zielverzeichnis gewählt, ist das Icon „DEFA_Matlab“ über „Eigenschaften“ entsprechend zu modifizieren.

7.4 Bedienungsanleitung

Am Speicheroszilloskop Le Croy LC534A ist als Schnittstelle „RS232“ auszuwählen mit den Einstellungen 8 Bit, 1 Stopp-Bit, keine Parität und 9,2 Kbaud.

Nach dem Start von MATLAB wird das Grundmenü (Bild 7.1) durch Eingabe „defa“ aufgerufen. Die einzelnen Menüauswahlpunkte werden durch Anklicken der entsprechenden Schaltflächen aktiviert.



Bild 7.1: Grundmenü des Messdatenverarbeitungssystems DEFA

7.4.1 Menüpunkt „Umschaltung Protokollstatus“

Durch Anklicken dieses Menüpunktes kann zwischen dem reduzierten und dem kompletten Protokollstatus hin- und hergewechselt werden, wobei sich die Beschriftung der Schaltfläche entsprechend Bild 7.2 jeweils ändert. Der Protokollstatus wirkt sich auf die Ablaufsteuerung innerhalb der Menüpunkte „Aufzeichnung einer Messreihe“, „Signaldarstellung einer Messreihe (x-Auswahl manuell)“, „Signaldarstellung einer Messreihe (x-Auswahl automatisch)“ und „Ergebnisdarstellung einer berechneten Messreihe“ aus und wird bei der Beschreibung dieser Menüpunkte näher erläutert.



Bild 7.2: Umschaltung des Protokollstatus

7.4.2 Menüpunkt „Einstellung der aktuellen Konfiguration“

Nach dem Anklicken des Menüpunktes „Einstellung der aktuellen Konfiguration“ erscheint der Eingabedialog zur Einstellung der aktuellen Konfiguration für die Aufzeichnung einer Messreihe (Bild 7.3).

Einstellung der aktuellen Konfiguration für die Aufzeichnung einer Mess-Reihe

Ordnungsbegriff(10-stellig)
zzzzzzzzzz

Erklärender Text:

Zeitbasis Oszi (gesamtes Grid, in ms):
0.1

Anordnung der Sensoren (0 = "in line", 1 = "Vibrometer-Anordnung"):
0

Anzahl Sensoren (1,2 oder 3):
3

Sensor-Abstand (in cm):
2

Abstand Spule/Sensoren(in cm):
15

Beton-Deckung (in cm):
4

Ordnung des Filters:
0

Untere Grenzfrequenz des Bandpasses (in kHz):
0

Obere Grenzfrequenz des Bandpasses (in kHz):
0

Breite des linken Window-Nullbereichs (in %):
0

Breite des Window-Anstiegs / Abfalls (in %):
0

Cancel OK

Bild 7.3: Einstellung der Konfiguration für die Aufzeichnung einer Messreihe

Unter „Konfiguration“ ist die Gesamtheit der Parameter (Konfigurationsdaten) zu verstehen, die für eine Messreihe relevant sind. Jede Messreihe hat somit ihre individuelle Konfiguration, wobei zwischen konstanten (nachträglich nicht änderbaren) und variablen (jederzeit nachträglich änderbaren) Konfigurationsdaten unterschieden wird.

Die Konfigurationsdaten haben folgende Bedeutung:

Ordnungsbegriff

Der Ordnungsbegriff steuert die Sortierreihenfolge der Messreihen in den Dialoglisten (z. B. Bild 7.14 oder Bild 7.20). Dieser Parameter kann jederzeit nachträglich geändert werden.

Erklärender Text

Der erklärende Text erscheint in den Dialoglisten (z. B. Bild 7.14 oder Bild 7.20) zum Zweck der zusätzlichen Charakterisierung einer Messreihe. Dieser Parameter kann jederzeit nachträglich geändert werden.

Zeitbasis

Die Zeitbasis ist der zehnfache Wert der am Oszilloskop einzustellenden Zeiteilung (time division) und gilt somit für das komplette Grid. Die Zeitbasis wird für die Datenauswertung benötigt und außerdem an das Speicheroszilloskop gesendet. Dieser Parameter kann nachträglich nicht mehr geändert werden.

Anordnung der Sensoren

Praktisch ist nur die „Inline-Anordnung“ (0) der Sensoren sinnvoll. Wird „Vibrometer-Anordnung“ (1) eingetragen, erscheint eine Warnung (Bild 7.4). Siehe auch Abschnitt 7.4.4. Dieser Parameter kann nachträglich nicht mehr geändert werden.

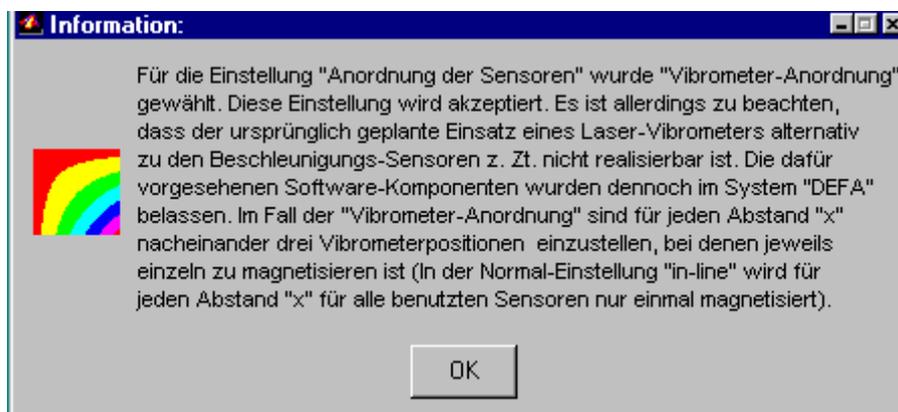


Bild 7.4: Warnung bei Wahl der „Vibrometer-Anordnung“

Anzahl Sensoren

Die Anzahl der verwendeten Sensoren wird für die Datenauswertung benötigt und beeinflusst den Inhalt der Daten, die an das Speicheroszilloskop gesendet werden. Dieser Parameter kann nachträglich nicht mehr geändert werden.

Sensorabstand

Bei 3 vorhandenen Sensoren bezeichnet der Sensorabstand den Abstand der äußeren Sensoren vom vorhandenen mittleren Sensor. Bei 2 vorhandenen Sensoren bezeichnet der Sensorabstand den halben Abstand der beiden Sensoren voneinander. Bei nur 1 vorhandenem Sensor ist der Sensorabstand Null zu setzen. Der Sensorabstand wird für die Datenauswertung benötigt. Dieser Parameter kann nachträglich nicht mehr geändert werden.

Abstand Spule/Sensoren

Der Abstand Spule/Sensoren zählt von der Mittelachse der Spule zum Mittelwert der Abstände der einzelnen Sensoren. Der Abstand Spule/Sensoren wird für die Datenauswertung benötigt und beeinflusst den Inhalt der Daten, die an das Speicheroszilloskop gesendet werden (Trigger-Delay). Dieser Parameter kann nachträglich nicht mehr geändert werden.

Betondeckung

Die Betondeckung wird für die Datenauswertung benötigt und beeinflusst den Inhalt der Daten, die an das Speicheroszilloskop gesendet werden (Trigger-Delay). Dieser Parameter kann nachträglich nicht mehr geändert werden.

Ordnung des Filters

Untere Grenzfrequenz des Bandpasses

Obere Grenzfrequenz des Bandpasses

Breite des linken Window-Nullbereichs

Breite des Window-Anstiegs/Abfalls

Für Voruntersuchungen mit Zeitbasen $> 1\text{ms}$ war die Anwendung der Window-Technik zur Verminderung des Leakage-Effektes sowie die Filterung der Signale mittels Bandpass notwendig. Für die Defekt-Analyse von Stahl in Beton sind diese Parameter aufgrund der zu empfehlenden Zeitbasis von $100\ \mu\text{s}$ nicht relevant. Sie werden durch Null-Setzen unwirksam gemacht. Die genannten Parameter können jederzeit nachträglich geändert werden.

Der Menüpunkt „Einstellung der aktuellen Konfiguration“ ist unter folgenden Bedingungen abzuarbeiten:

- nach Aufruf des Software-Systems „DEFA“ nach Einschalten des Rechners
- wenn eine neue Messreihe mit veränderter Konfiguration aufgezeichnet werden soll
- wenn eine bereits existierende Messreihe mit veränderter Konfiguration ergänzt werden soll

Durch Klicken auf die Schaltfläche „OK“ werden die eingetragenen Konfigurationsdaten übernommen und die Initialisierungsdaten an das Speicheroszilloskop gesendet.

Durch Klicken auf die Schaltfläche „Cancel“ wird der Menüpunkt „Einstellung der aktuellen Konfiguration“ abgebrochen. Diese Möglichkeit ist nützlich, um die aktuelle Konfiguration ohne Änderungsabsicht zu überprüfen.

7.4.3 Menüpunkt „Aufzeichnung einer Messreihe“

Nach dem Anklicken des Menüpunktes „Aufzeichnung einer Messreihe“ erfolgt zunächst die Abfrage über die Protokollierung der aufzuzeichnenden Daten (Bild 7.5).

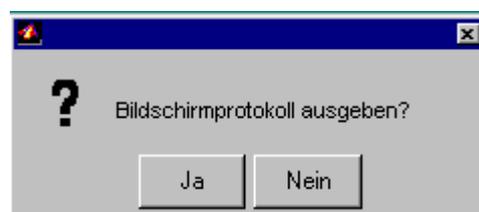


Bild 7.5: Abfrage über Protokollierung der aufzuzeichnenden Daten

Bei Beantwortung der Abfrage durch Klicken auf „Ja“ werden je nach Einstellung des Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) komplette oder reduzierte Protokollinformationen ausgegeben, ansonsten entfallen diese. In der folgenden Darstellung wird davon ausgegangen, dass die Protokollierung während der Aufzeichnung der Messreihe entfällt (Klicken auf „Nein“). In 7.4.6 (Signaldarstellung einer Messreihe) wird der Inhalt der Protokollinformationen ausführlich erläutert.

Als nächstes wird zur Eingabe der Bezeichnung der Messreihe aufgefordert (Bild 7.6).



Bild 7.6: Eingabe der Bezeichnung der Messreihe

Falls die Messreihe existiert, kann sie um weitere Messpunkte vervollständigt werden. Handelt es sich um eine neue Messreihe, wird folgende Information ausgegeben (Bild 7.7)

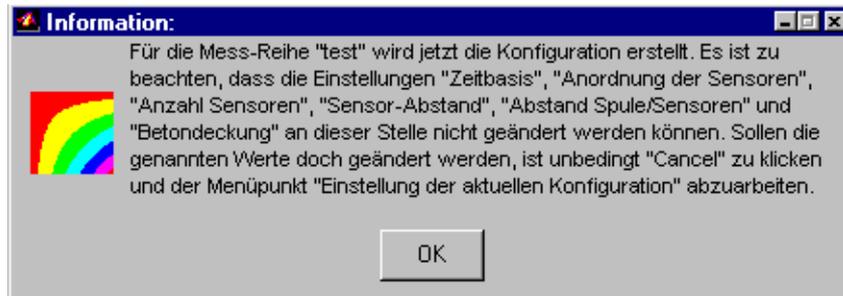


Bild 7.7: Information zu Beginn einer neuen Messreihe

Schließlich folgt noch die Anzeige der Konfiguration der Messreihe „test“ (Bild 7.8)

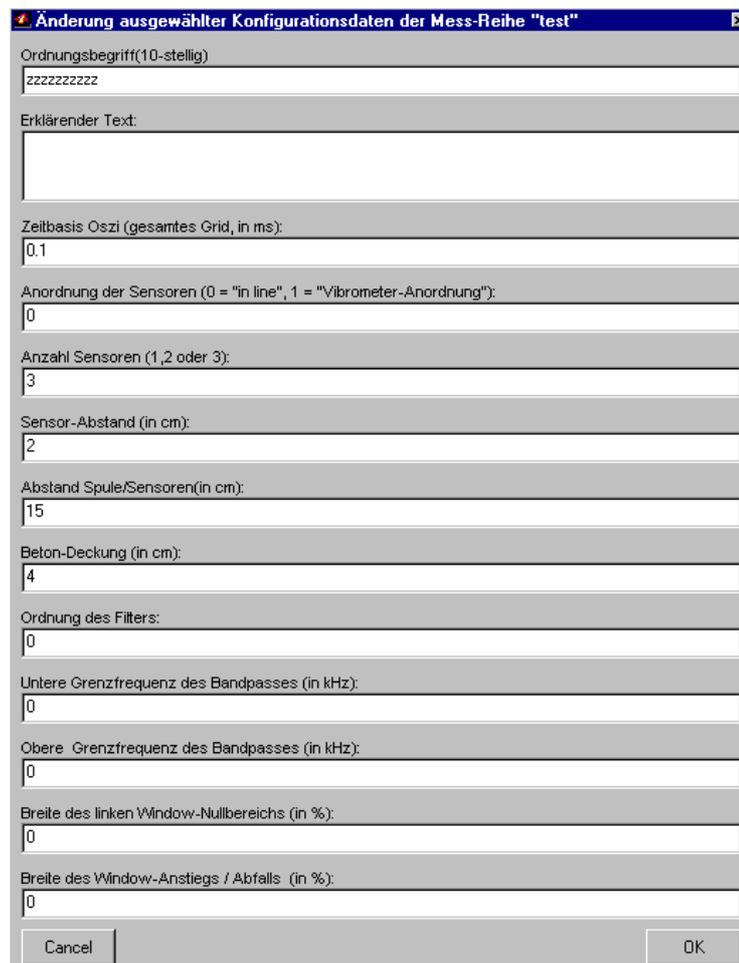


Bild 7.8: Konfiguration der Messreihe „test“

An dieser Stelle können variable Konfigurationsdaten geändert werden. Durch Klicken auf „Cancel“ kann die Bearbeitung abgebrochen werden, anderenfalls beginnt nach Klicken auf „OK“ der eigentliche Messzyklus mit der Abfrage nach dessen Beendigung (Bild 7.9)



Bild 7.9: Endeabfrage bei einer Messreihe

Nach Klicken auf „Nein“ im Falle der Fortführung der Messreihe wird jetzt zur Eingabe der x-Koordinate aufgefordert (Bild 7.10).

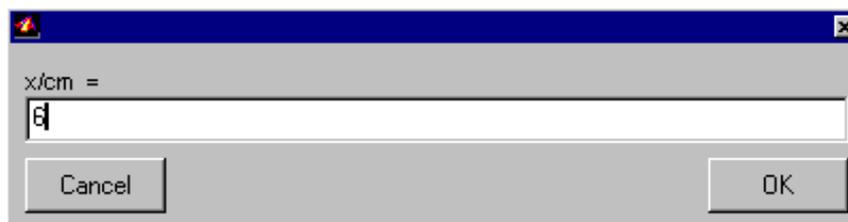


Bild 7.10: Eingabe der x-Koordinate

Die x-Koordinate zählt vom linken Ende des Probekörpers bis zum mittleren Sensor, wenn 3 Sensoren vorhanden sind, sonst zum Mittelwert der Abstände der einzelnen Sensoren. Nach Klicken „OK“ wird zum Vormagnetisieren aufgefordert (Bild 7.11), danach zum Magnetisieren für die Datenübernahme vom Oszilloskop (Bild 7.12).



Bild 7.11: Aufforderung zum Vormagnetisieren

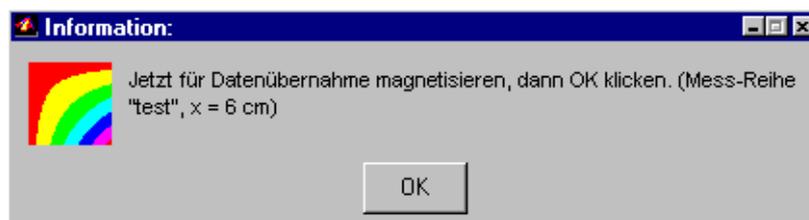


Bild 7.12: Aufforderung zum Magnetisieren für Datenübernahme

7.4.4 Menüpunkt „Aufsplittung einer Vibrometer-Messreihe“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes wird eine Warnung ausgegeben (Bild 7.13). Siehe auch Abschnitt 7.4.2.

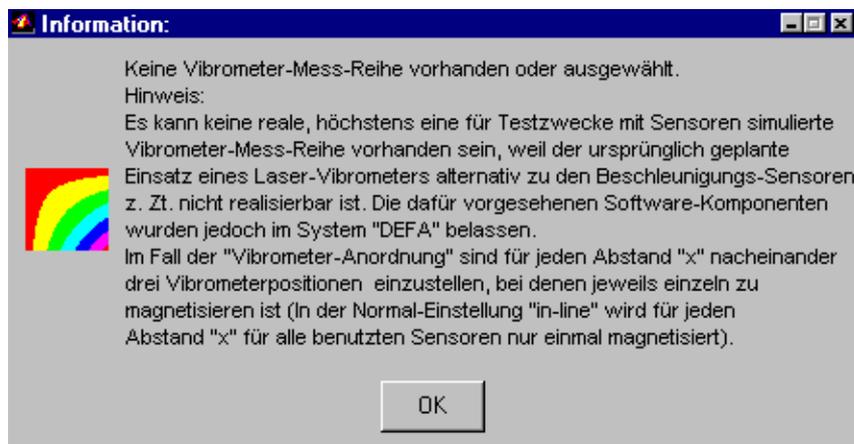


Bild 7.13: Warnung bei Aufsplittung einer Vibrometer-Messreihe

7.4.5 Menüpunkt „Änderung ausgewählter Konfigurationsdaten einer Messreihe“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes erscheint folgende Dialogliste (Bild 7.14).

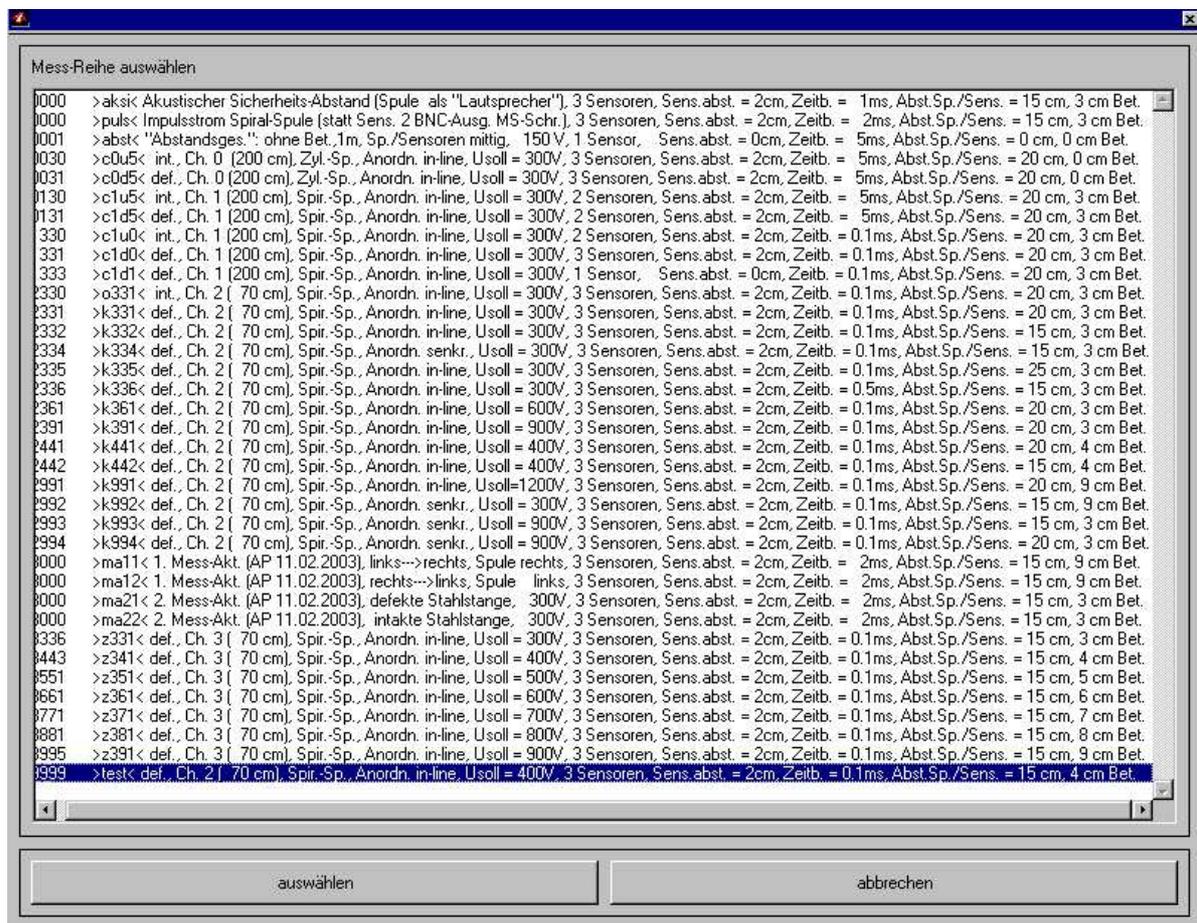


Bild 7.14: Dialogliste zur Änderung ausgewählter Konfigurationsdaten einer Messreihe

Durch Klicken auf die Messreihe „test“ wird diese vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „Auswählen“ erscheint die Konfiguration der Messreihe „test“. An dieser Stelle wurden einige variable Konfigurationsdaten geändert, und zwar die für Filter und Window. Bild 7.15 zeigt die Konfiguration nach erfolgter Eingabe:

The screenshot shows a dialog box titled "Änderung ausgewählter Konfigurationsdaten der Mess-Reihe 'test'". It contains several input fields with the following values:

- Ordnungsbegriff(10-stellig): 9999
- Erklärender Text: def., Ch. 2 (70 cm), Spir.-Sp., Anordn. in-line, Usoll = 400V
- Zeitbasis Oszi (gesamtes Grid, in ms): 0.1
- Anordnung der Sensoren (0 = "in line", 1 = "Vibrometer-Anordnung"): 0
- Anzahl Sensoren (1,2 oder 3): 3
- Sensor-Abstand (in cm): 2
- Abstand Spule/Sensoren(in cm): 15
- Beton-Deckung (in cm): 4
- Ordnung des Filters: 4
- Untere Grenzfrequenz des Bandpasses (in kHz): 10
- Obere Grenzfrequenz des Bandpasses (in kHz): 100
- Breite des linken Window-Nullbereichs (in %): 10
- Breite des Window-Anstiegs / Abfalls (in %): 10

Buttons for "Cancel" and "OK" are located at the bottom of the dialog.

Bild 7.15: Konfiguration der Messreihe „test“

Die Eintragungen für Filter und Window sind notwendig, um im nächsten Abschnitt (7.4.6) deren Auswirkung auf die Protokollierung zu demonstrieren. Ohne diese Eintragungen würden nur ungefilterte Signale und Spektren protokolliert werden, mit diesen Eintragungen werden ungefilterte und anschließend gefilterte Signale und Spektren gezeigt. Für die Weiterverarbeitung der Signale sind Filter und Window unnötig, da sie das Signal aufgrund der Zeitbasis von 100µs nur wenig verändern. Aus diesem Grunde wird auch die folgende Warnung ausgegeben (Bild 7.16):

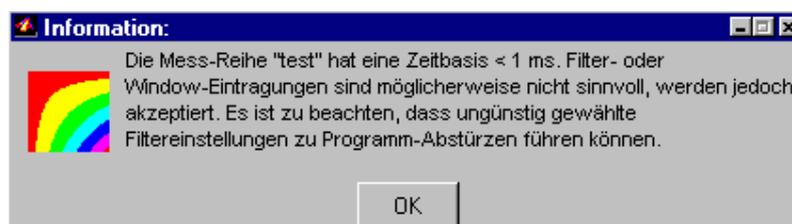


Bild 7.16: Warnung vor evtl. unnötigem Window und Filter

Die Form des Windows zeigt Bild 7.17.

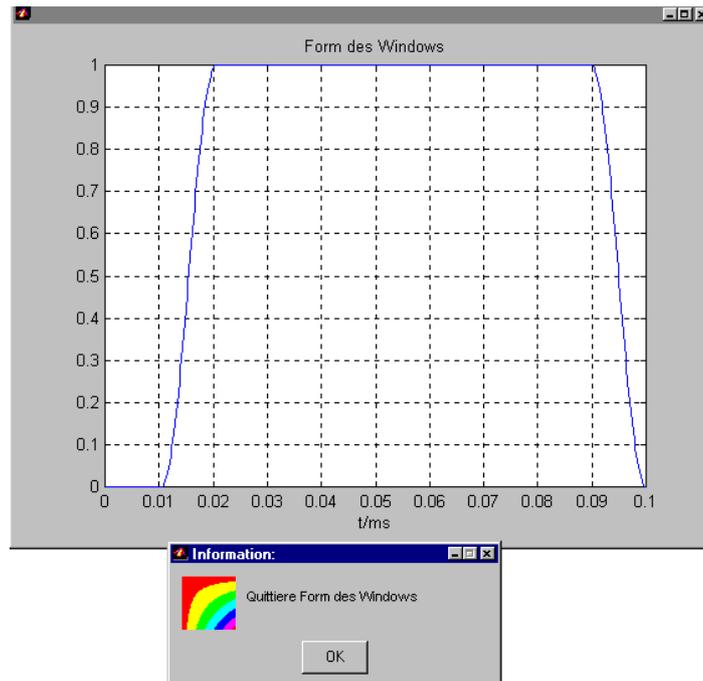


Bild 7.17: Form des Windows

Den Amplitudengang des Bandpasses zeigt Bild 7.18.

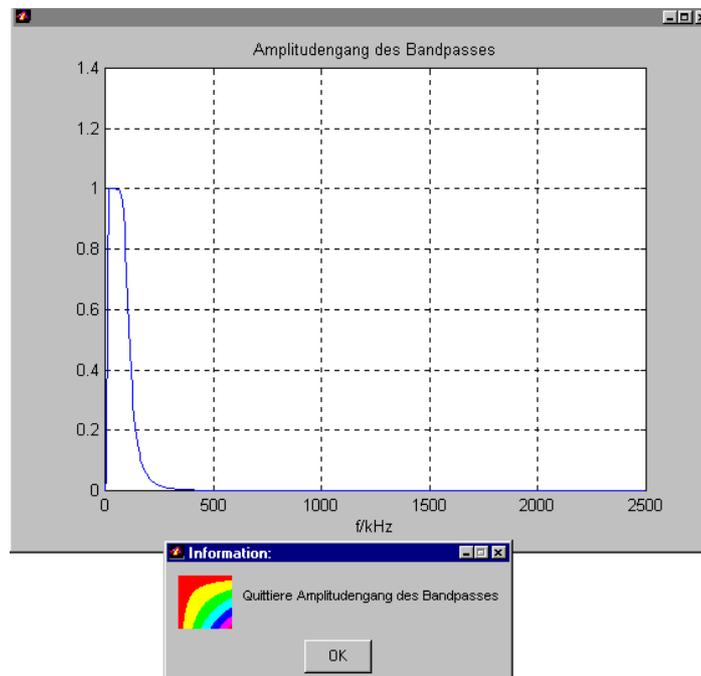


Bild 7.18: Amplitudengang des Bandpasses

Bild 7.19 zeigt die Wirkung des Windows und des Filters auf das Signal. Das ungefilterte Signal wird durch Überlagerung trigonometrischer Funktionen rechenstechnisch generiert und hat daher bei jeder gewählten Zeitbasis dasselbe Aussehen. Bei einer Zeitbasis von $100\mu\text{s}$ treten bei dem hier generierten Signal sehr hohe Frequenzanteile auf, so dass eine sehr starke Filterwirkung zu bemerken ist. Die realen Signale in 7.4.6 haben nicht so hohe Frequenzanteile, so dass dort eine sehr viel geringere Filterwirkung zu erkennen sein wird.

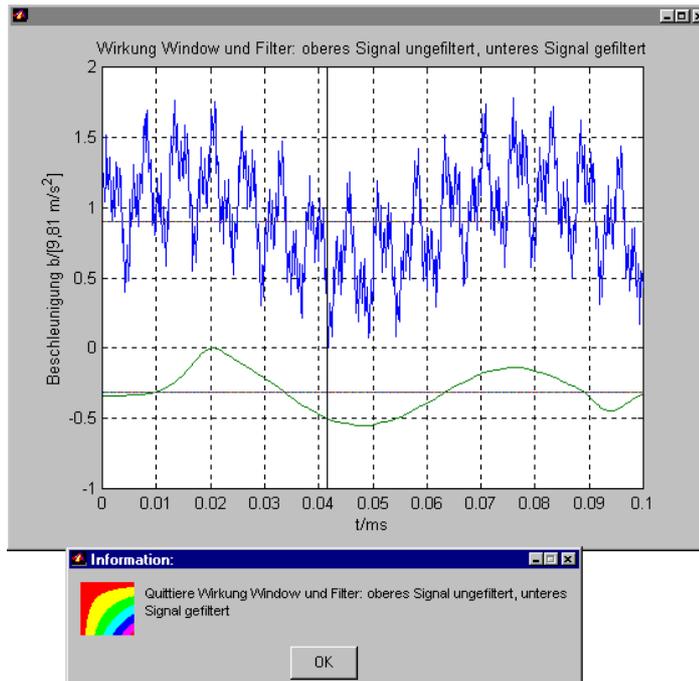


Bild 7.19: Wirkung des Windows und des Filters

7.4.6 Menüpunkt „Signaldarstellung einer Messreihe (x-Auswahl manuell)“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes erscheint folgende Dialogliste (Bild 7.20).

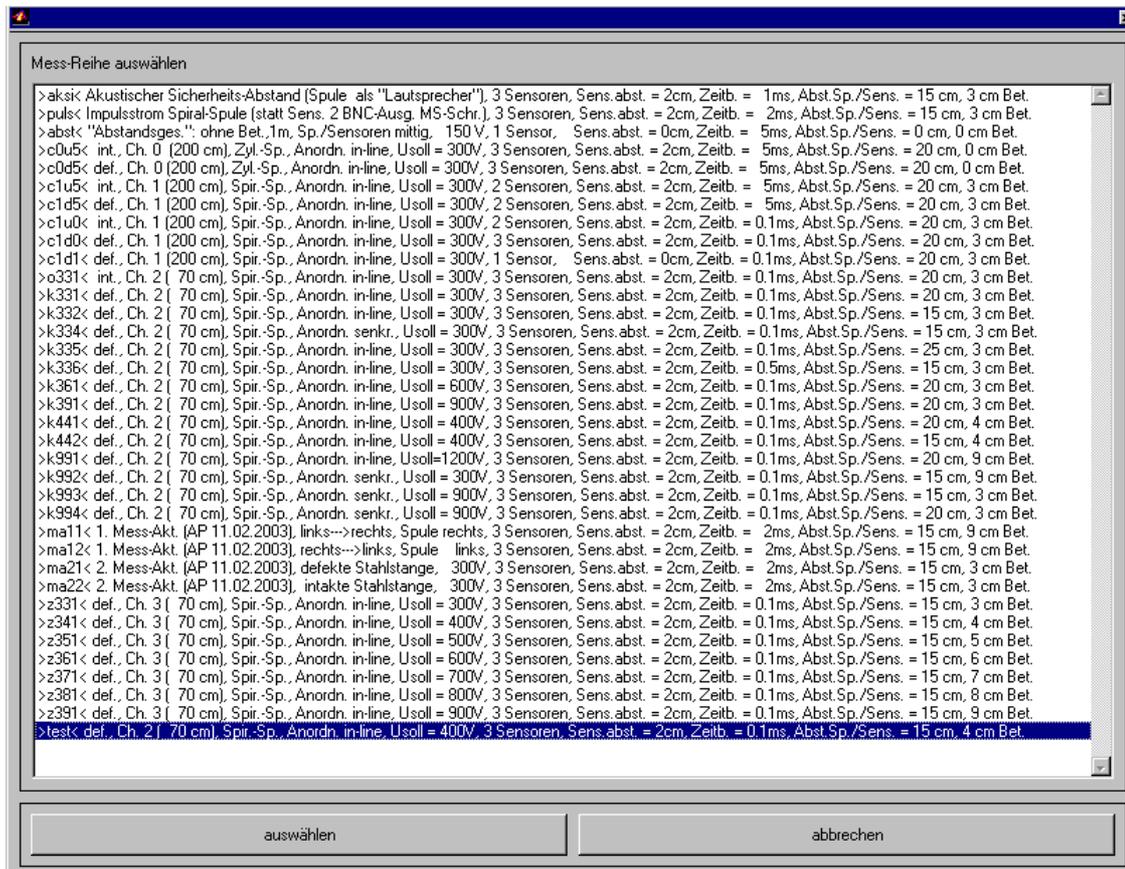


Bild 7.20: Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe

Durch Klicken auf die Messreihe „test“ wird diese vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „Auswählen“ erscheint eine weitere Dialogliste zur Auswahl des Abstandes x (Bild 7.21). Der folgende Zyklus wird wiederholt, bis auf die Schaltfläche „abbrechen“ geklickt wird.



Bild 7.21: Dialogliste zur Auswahl des Abstandes x

Nach Klicken auf den Abstand „18 cm“ ist dieser vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „auswählen“ werden zunächst die ungefilterten Signale für diesen Abstand dargestellt (Bild 7.22)

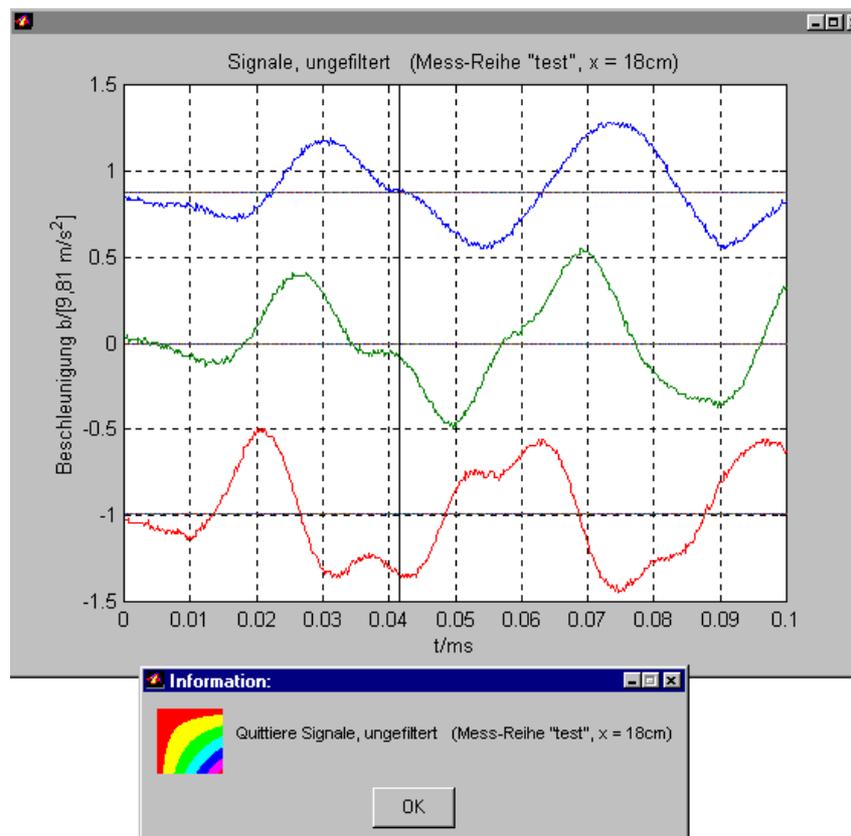


Bild 7.22: Signale, ungefiltert

Die senkrechte Gerade bei $\approx 0,04$ ms markiert die Obergrenze des von der Betondeckung abhängigen Zeitfensters, bis zu dem sich die Auswertung erstreckt (siehe Abschnitt 7.4.9).

Die ungefilterten Spektren der Signale (Bild 7.23) werden nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

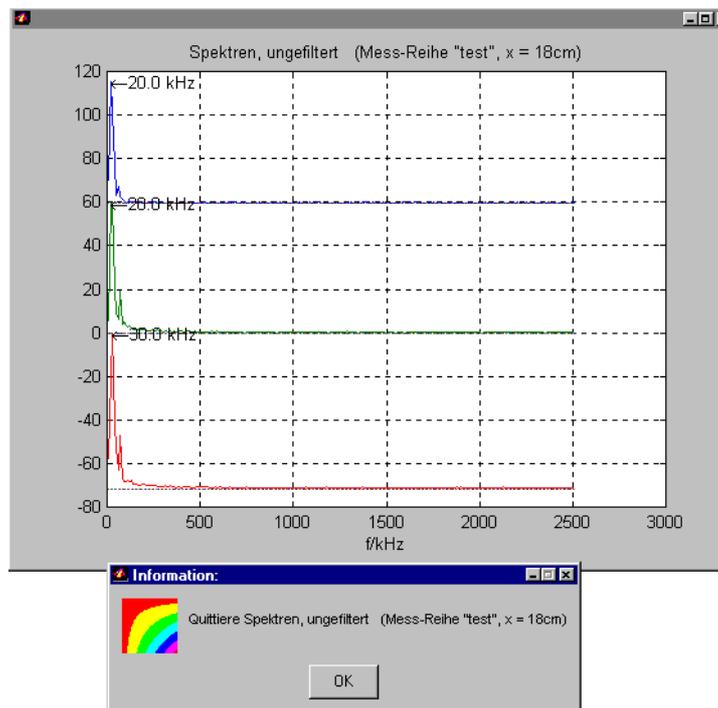


Bild 7.23: Spektren, ungefiltert

Die gefilterten Signale (Bild 7.24) werden auch im reduzierten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt, wenn die Konfiguration Filter-Eintragen enthält.

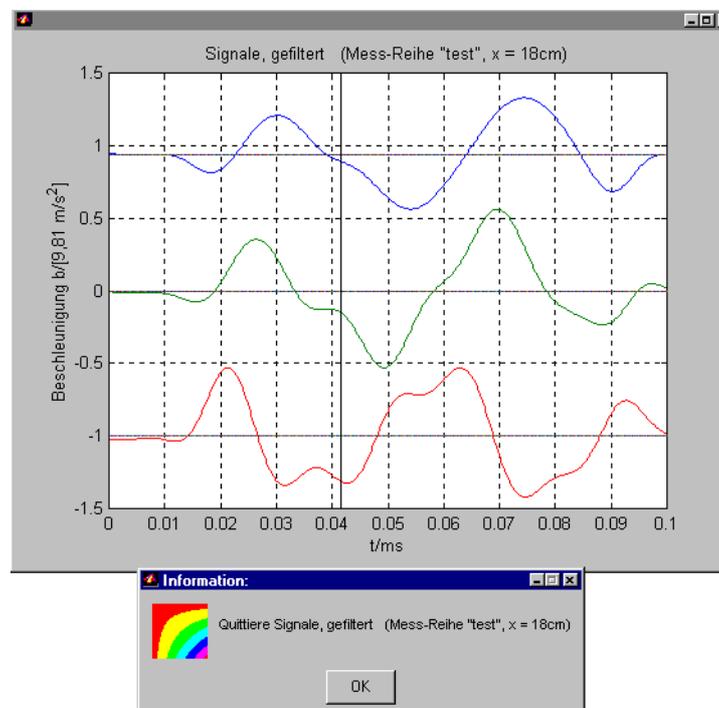


Bild 7.24: Signale, gefiltert

Der Vergleich der ungefilterten mit den gefilterten Signalen (Bild 7.22 und Bild 7.24) zeigt, dass die Filterwirkung relativ gering ist. Das ist folgendermaßen zu erklären: Die Periodenlänge in

Bild 7.22 liegt bei ca. $30\mu\text{s}$, so dass das relevante Frequenzband bei ca. 30 kHz liegt. In 7.4.5 wurde ein Bandpass mit einer unteren Grenzfrequenz von 10 kHz und einer oberen Grenzfrequenz von 100 kHz in die Konfiguration eingetragen. Durch den so dimensionierten Bandpass wird das Frequenzband nicht wesentlich beeinflusst. Die Wirkung des Windows hingegen ist deutlich zu erkennen: Am linken und rechten Ende sind die Signale abgesenkt. Die gefilterten Spektren der Signale (Bild 7.25) werden nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

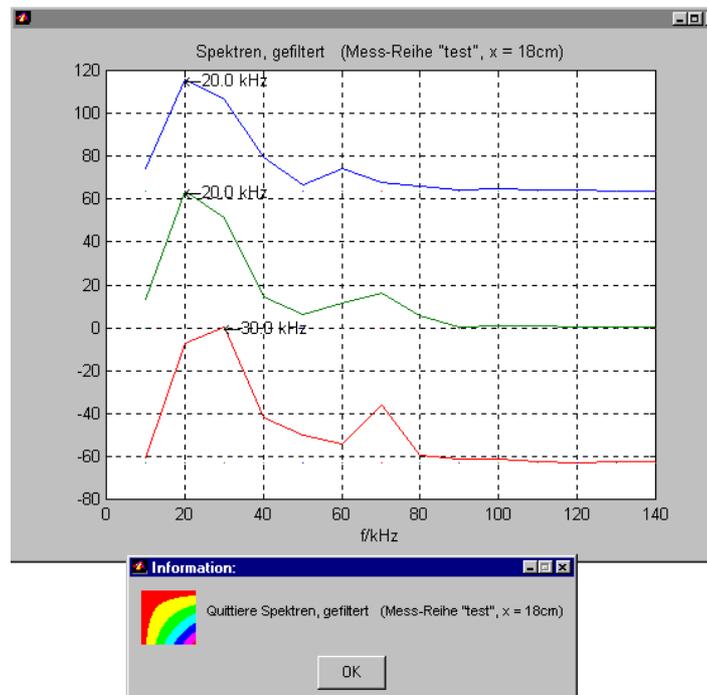


Bild 7.25: Spektren, gefiltert

Bild 7.26 zeigt die Korrelationsfunktionen der Signale untereinander

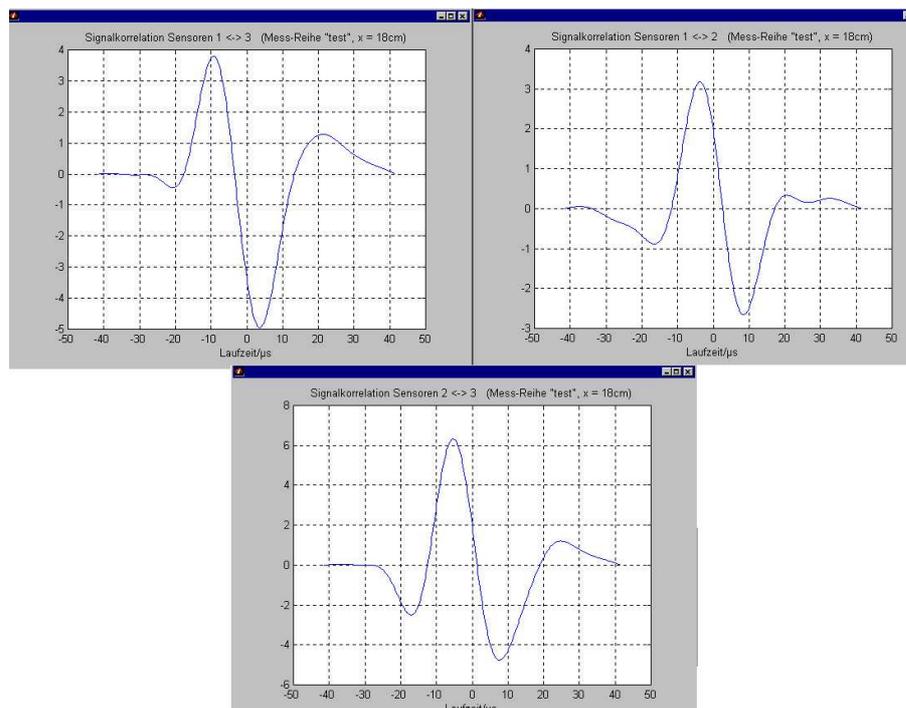


Bild 7.26: Korrelationsfunktionen

Die Korrelationsfunktion der Signale der Sensoren $1 \Leftrightarrow 3$ hat ihr Maximum bei ca. $-9 \mu\text{s}$, d. h. das Signal 1 ist gegenüber dem Signal 3 um $9 \mu\text{s}$ verzögert. Die Hälfte dieser Verzögerungszeit tritt bei den Sensorkombinationen $1 \Leftrightarrow 2$ und $2 \Leftrightarrow 3$ auf. Dieser Sachverhalt ist auch aus Bild 7.22 (mit geringerer Genauigkeit) direkt ablesbar. Andererseits beträgt die Schallgeschwindigkeit in Stahl bzw. Beton 5000m/s bzw. 4000m/s , d. h. für 1 cm werden $2\mu\text{s}$ bzw. $2,5\mu\text{s}$ benötigt. Die Entfernung der Sensoren $1 \Leftrightarrow 3$ voneinander beträgt 4 cm , dies entspricht $8\mu\text{s}$ bzw. $10\mu\text{s}$ und bestätigt den obigen Wert.

Im vorliegenden Beispiel mit 3 beteiligten Sensoren wurden 3 Korrelationsfunktionen ermittelt. Wenn nur 1 Sensor verwendet wird, kann keine Korrelationsfunktion ermittelt werden, bei 2 beteiligten Sensoren würde nur eine Korrelationsfunktion ermittelt werden.

7.4.7 Menüpunkt „Signaldarstellung einer Messreihe (x-Auswahl automatisch)“

Dieser Menüpunkt ist dem Menüpunkt 7.4.6 sehr ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass in 7.4.6 auf die Abstände x einer Messreihe direkt zugegriffen werden kann, während hier die Abstände x nacheinander in aufsteigender Reihenfolge vom System angeboten werden.

Bei Aufruf des Menüpunktes „Signaldarstellung einer Messreihe (x-Auswahl automatisch)“ erscheint wiederum die Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe (Bild 7.20). Durch Klicken auf die Messreihe „test“ wird diese vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „Auswählen“ erscheinen je nach Protokollstatus für jeden Abstand x die Bilder 7.22...7.26 vollständig bzw. teilweise. Zwischenzeitlich besteht jederzeit die Möglichkeit, die Signaldarstellung zu beenden (Bild 7.27).



Bild 7.27: Beendigung der Signaldarstellung

7.4.8 Menüpunkt „Overlay-Darstellung mehrerer Messreihen“

Bei diesem Menüpunkt sind mit Hilfe der Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe (Bild 7.20) sowie der Dialogliste zur Auswahl des Abstandes x (Bild 7.21) die gewünschten Abstände aus ggf. verschiedenen Messreihen zusammenzustellen. Die Overlay-Darstellung kann jederzeit beendet werden (Bild 7.28).



Bild 7.28: Beendigung der Overlay-Darstellung

Der Menüpunkt „Overlay-Darstellung mehrerer Messreihen“ gestattet die Darstellung beliebiger Signale aus verschiedenen Messreihen in einer Grafik durch das Übereinanderlegen der Signale mit verschiedenen Farben. Damit kann beispielsweise die erwartete Ähnlichkeit von Signalen sehr gut visuell überprüft werden, aber auch evtl. erwartete Unterschiede können sichtbar gemacht werden. Zur Demonstration werden aus der Messreihe „test“ die Signale der Abstände $x = 12\text{cm}$ und $x = 30\text{cm}$ übereinandergelegt (Bild 7.29). Diese Abstände wurden gewählt, weil sich beim Abstand $x = 12$ kein Riss zwischen Spule und Sensoren befindet, beim Abstand $x = 30$ ist dies jedoch der Fall. Die unterschiedliche Form der Signale innerhalb des Zeitfensters liefert das Kriterium für das Vorhandensein eines Risses.

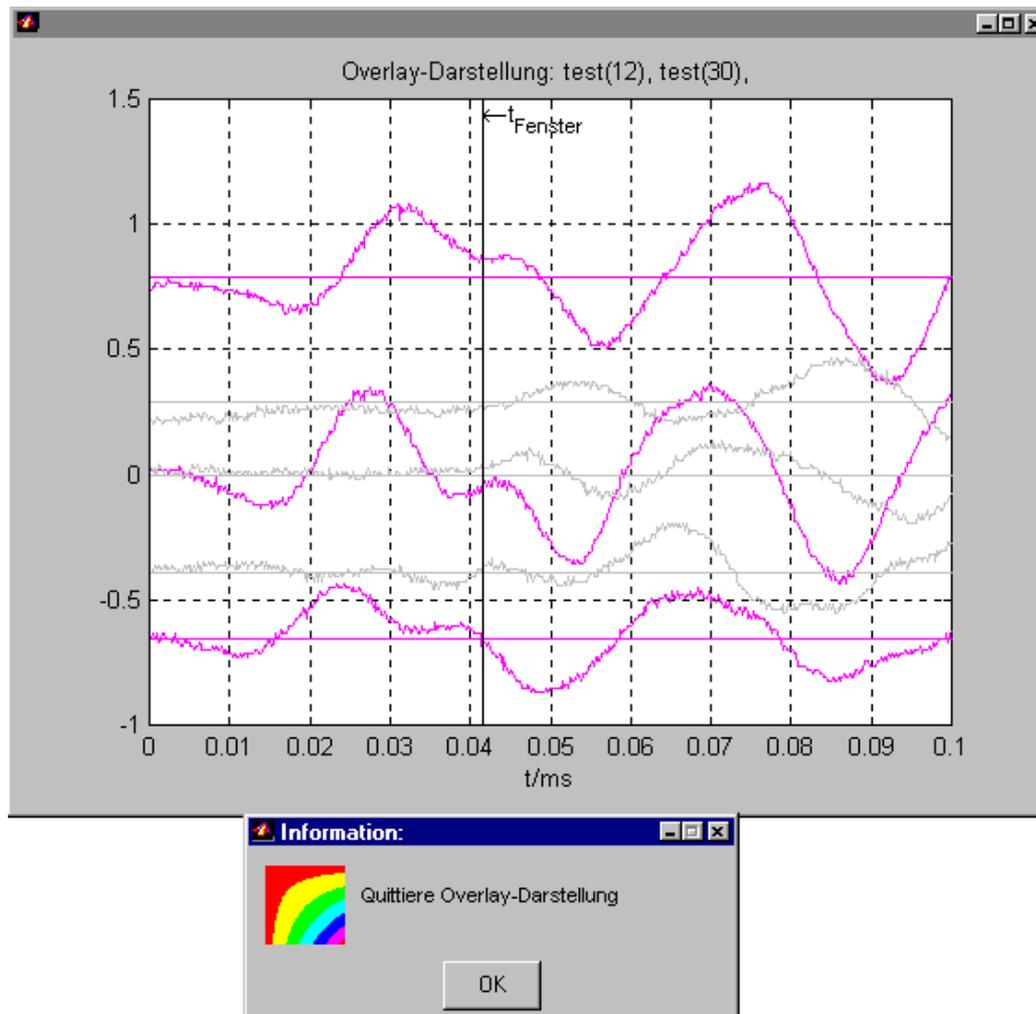


Bild 7.29: Overlay-Darstellung

Das Signal mit den höheren Amplituden gehört zu $x = 12\text{ cm}$ (kein Riss zwischen Spule und Sensor, „Start-Welle“ deutlich ausgeprägt). Das Signal mit nahezu waagrecht Verlauf gehört zu $x = 30\text{ cm}$ (Riss zwischen Spule und Sensor, „Start-Welle“ nur schwach ausgeprägt).

7.4.9 Menüpunkt „Berechnung einer Messreihe“

Bei Aufruf des Menüpunktes „Berechnung einer Messreihe“ erscheint wiederum die Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe (Bild 7.20). Durch Klicken auf die Messreihe „test“ wird diese vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „Auswählen“ erfolgt die komplette Berechnung. Dieser Vorgang kann einige Sekunden dauern. Der Arbeitsfortschritt wird angezeigt (Bild 7.30). Die Berechnung einer Messreihe ist Voraussetzung für die Durchführung des Menüpunktes „Ergebnisdarstellung einer berechneten Messreihe“.



Bild 7.30: Anzeige des Arbeitsfortschritts

7.4.10 Menüpunkt „Ergebnisdarstellung einer berechneten Messreihe“

Bei Aufruf des Menüpunktes „Ergebnisdarstellung einer berechneten Messreihe“ erscheint wiederum die Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe (Bild 7.20). Durch Klicken auf die Messreihe „test“ wird diese vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „Auswählen“ wird zunächst die Signalkorrelation der möglichen Sensor-Kombinationen dargestellt (Bild 7.31).

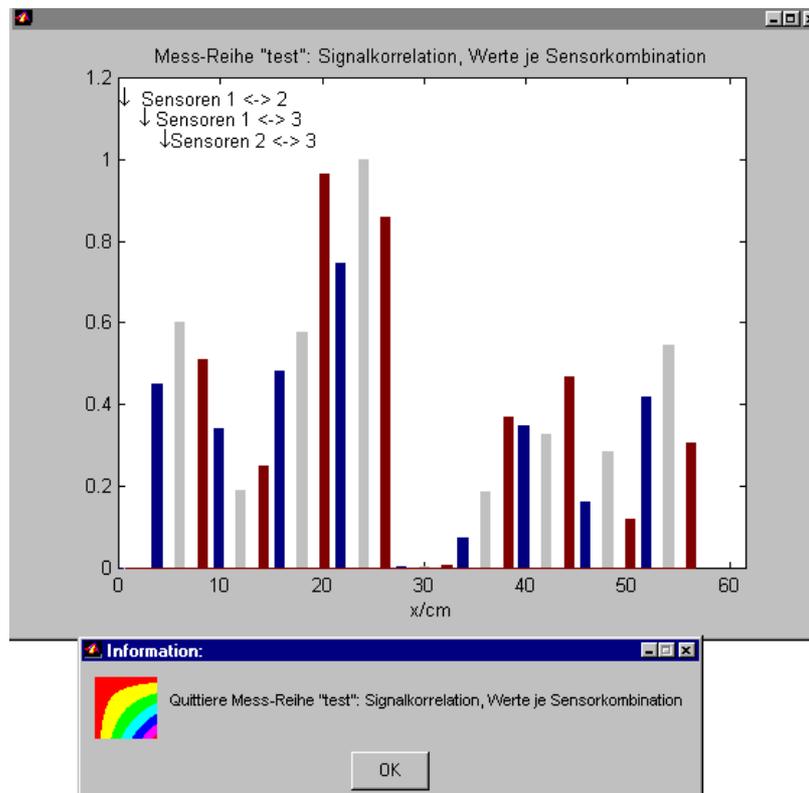


Bild 7.31: Signalkorrelation

Die Maxima der in Bild 7.26 für einen Abstand x dargestellten Korrelationsfunktionen sind hier für sämtliche Abstände x der Messreihe „test“ in einer Grafik zusammengestellt. Die

Signalkorrelation (Bild 7.31) wird nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

Anschließend wird die Signalleistung je Sensor dargestellt (Bild 7.32).

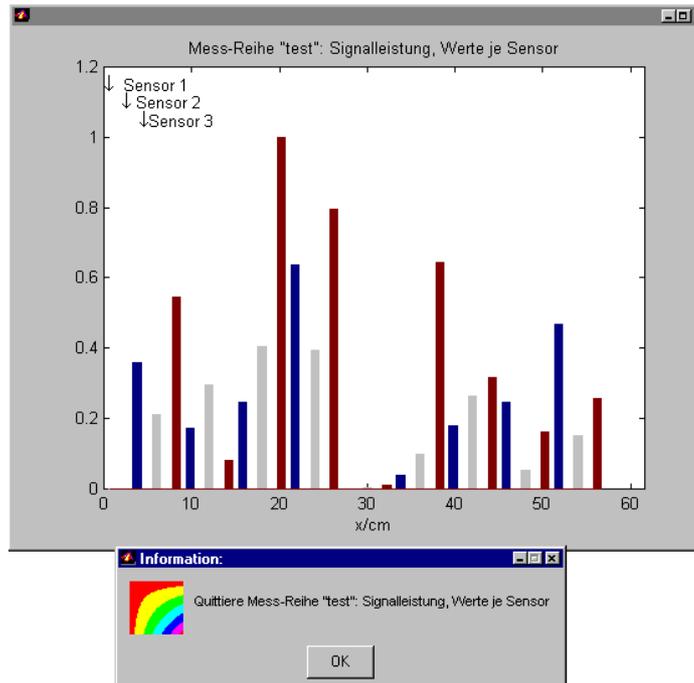


Bild 7.32: Signalleistung je Sensor

Die Signalleistung je Sensor (Bild 7.32) wird auch im reduzierten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

Danach wird die Signalleistung sensorgemittelt dargestellt (Bild 7.33).

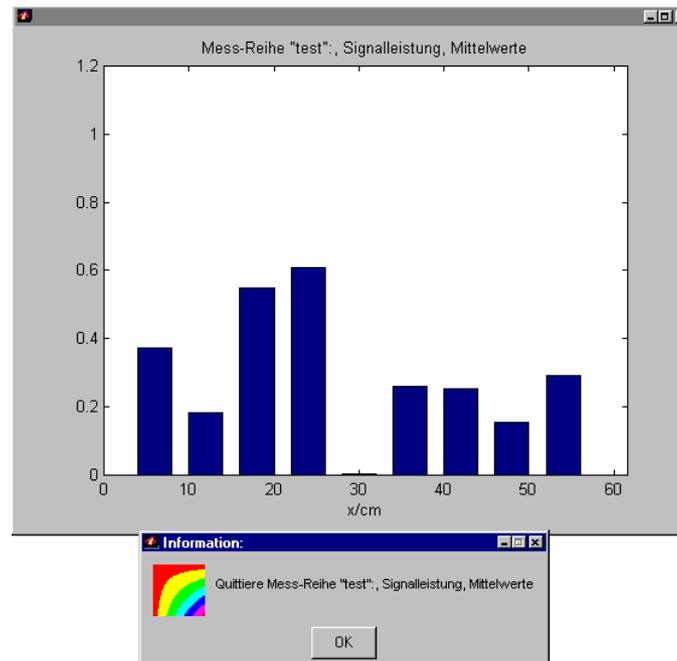


Bild 7.33: Signalleistung sensorgemittelt

Die Signalleistung sensorgemittelt (Bild 7.33) wird auch im reduzierten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

Anschließend wird der Signalhub je Sensor dargestellt (Bild 7.34).

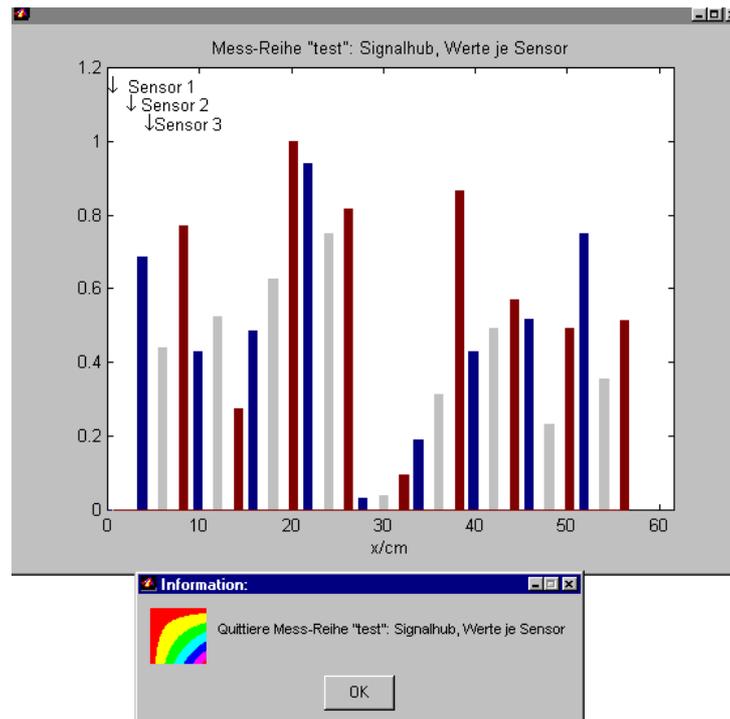


Bild 7.34: Signalhub je Sensor

Der Signalhub je Sensor (Bild 7.34) wird nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

Danach wird der Signalhub sensorgemittelt dargestellt (Bild 7.35).

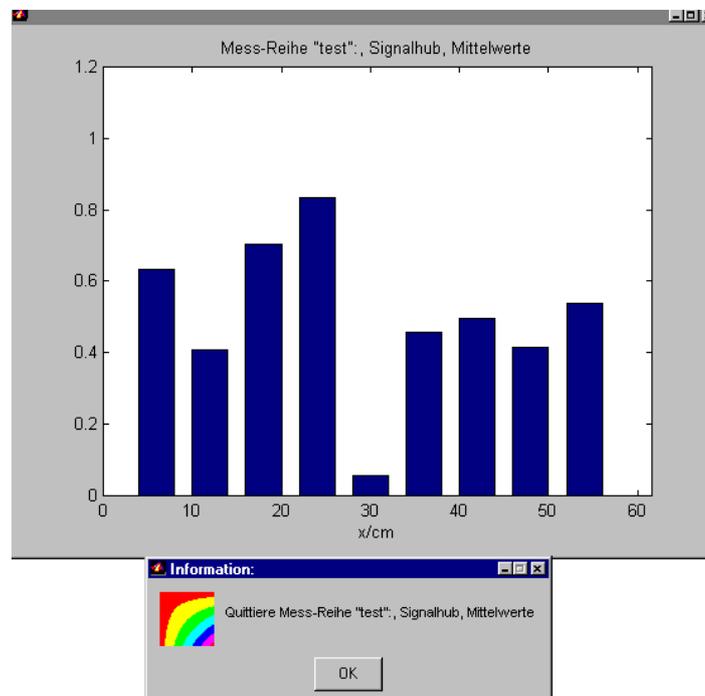


Bild 7.35: Signalhub sensorgemittelt

Der Signalhub sensorgemittelt (Bild 7.35) wird nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

Anschließend wird der Signalhub je Sensor dargestellt (Bild 7.34).

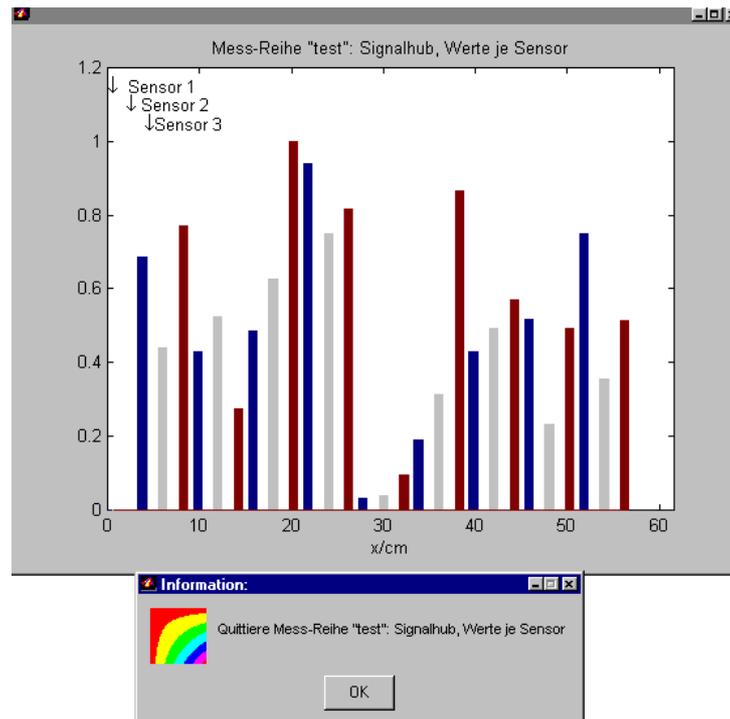


Bild 7.34: Signalhub je Sensor

Der Signalhub je Sensor (Bild 7.34) wird nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt. Danach wird der Signalhub sensorgemittelt dargestellt (Bild 7.35).

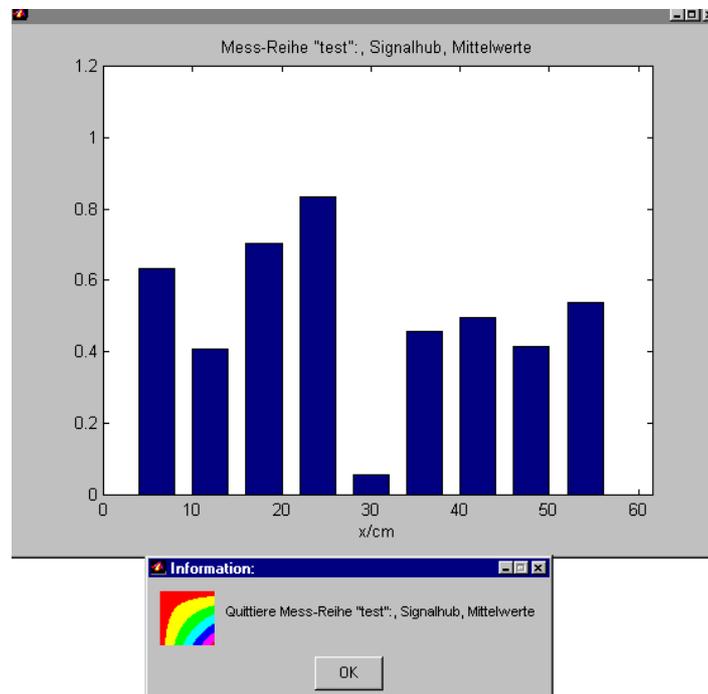


Bild 7.35: Signalhub, sensorgemittelt

Der Signalhub sensorgemittelt (Bild 7.35) wird nur im kompletten Protokollstatus (siehe Abschnitt 7.4.1) dargestellt.

Es folgt die dreidimensionale Darstellung des Korrelationsfeldes von vier Seiten, je Sensor (Bild 7.36) und sensorgemittelt (Bild 7.37).

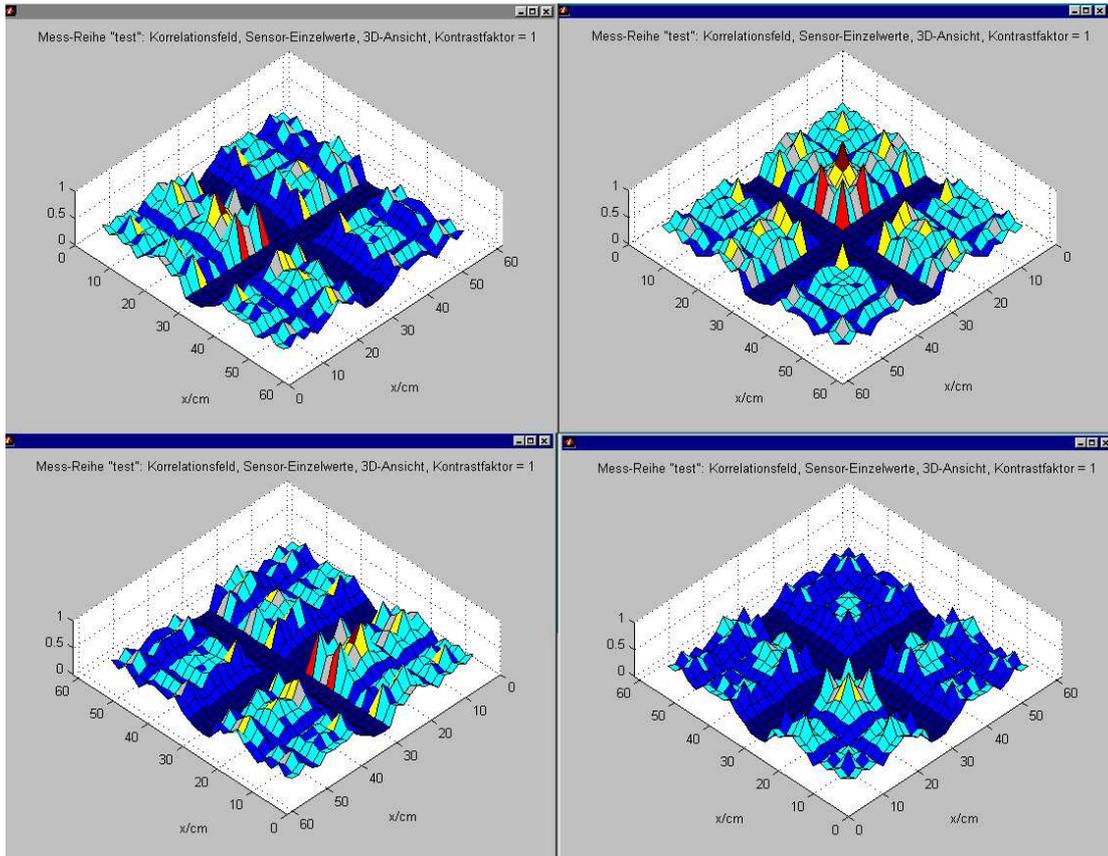


Bild 7.36: Korrelationsfeld je Sensor, 3D-Ansicht

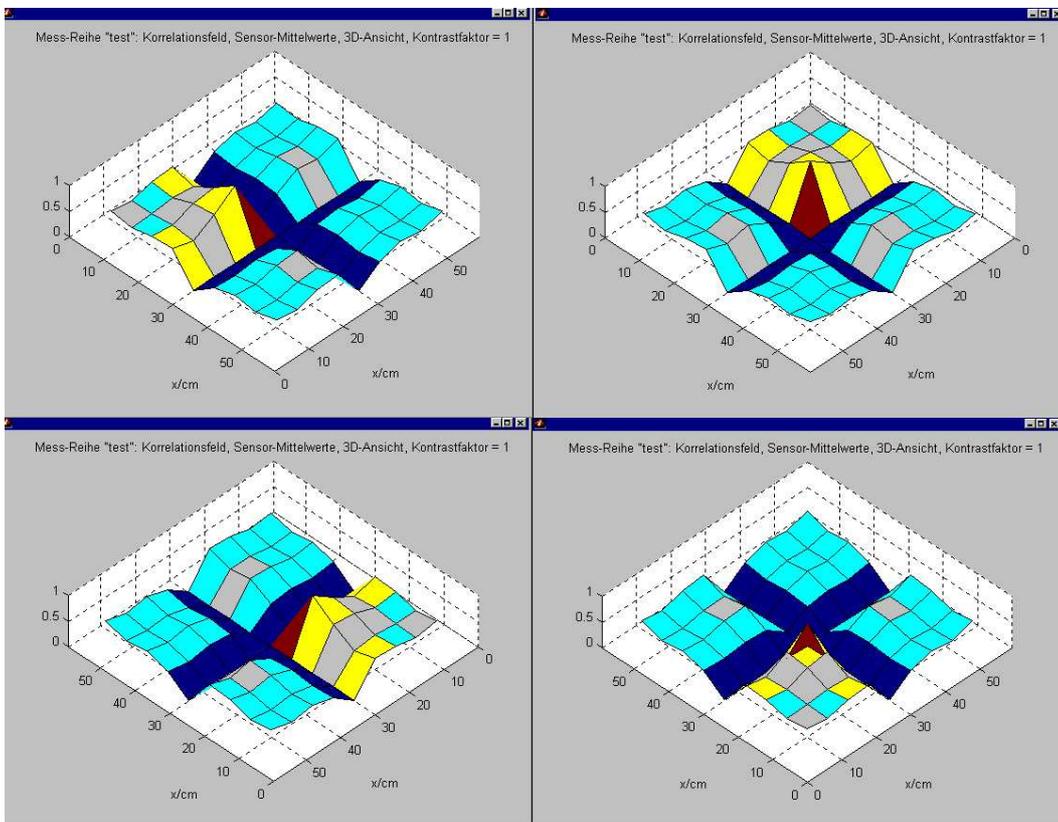


Bild 7.37: Korrelationsfeld, sensorgemittelt, 3D-Ansicht

Es folgt die Draufsicht auf das Korrelationsfeld je Sensor und sensorgemittelt (Bild 7.38).

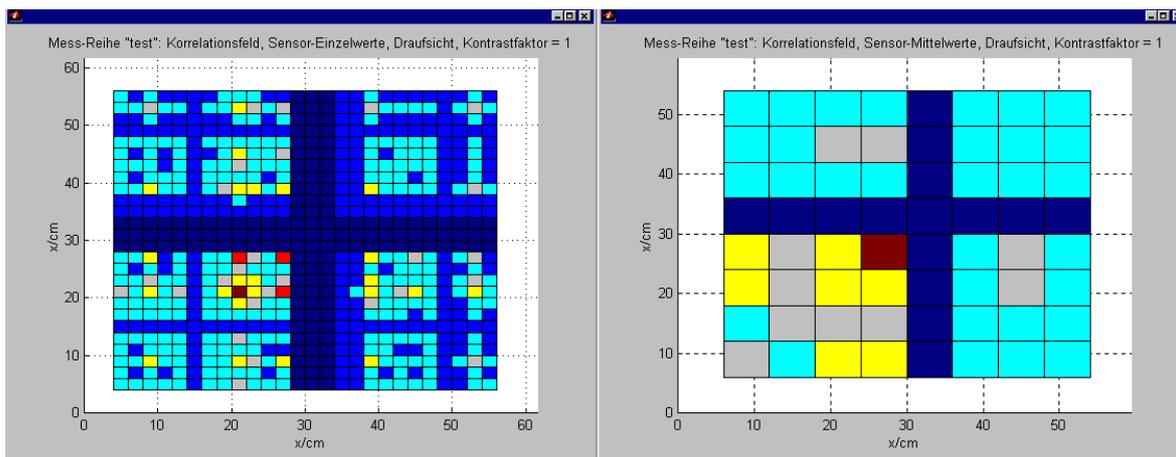


Bild 7.38: Korrelationsfeld je Sensor und sensorgemittelt, Draufsicht

Zwischenzeitlich besteht die Möglichkeit, den Kontrast bei der Darstellung des Korrelationsfeldes zu verändern (Bild 7.39)

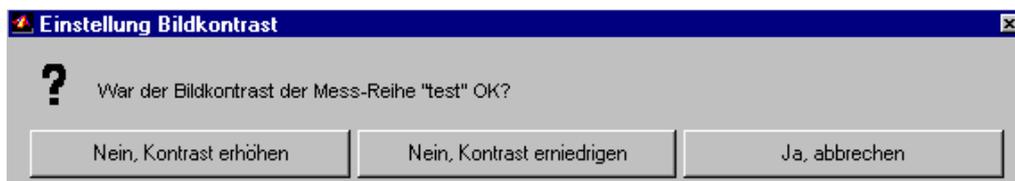


Bild 7.39: Kontraständerung beim Korrelationsfeld

Der Menüpunkt „Ergebnisdarstellung einer berechneten Messreihe“ wird mit einer Mitteilung über das Vorhandensein eines Defektes beendet (Bild 7.40)

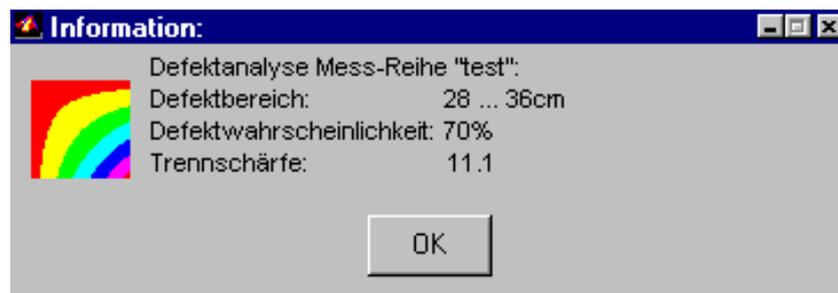


Bild 7.40: Abschlussmeldung für Messreihe mit vermutetem Defekt

Eine Messreihe, die entweder keinen Defekt aufweist oder bei der kein Defekt diagnostiziert werden kann, würde so beendet werden (Bild 7.41).



Bild 7.41: Abschlussmeldung für Messreihe ohne diagnostizierbaren Defekt

7.4.11 Menüpunkt „Entfernen eines einzelnen Signals“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes erscheint zunächst die Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe (Bild 7.20), anschließend die Dialogliste zur Auswahl des Abstandes x (Bild 7.21). Das zum Abstand x gehörige Signal kann zu diesem Zeitpunkt entfernt werden, wobei noch eine Sicherheitsabfrage („Soll ... wirklich ... ?“) erfolgt.

Die Entfernung eines einzelnen Signals ist dann notwendig, wenn dieses nicht nur inhaltlich fehlerhaft ist (das könnte wie in 7.4.3 beschrieben durch wiederholte Messung korrigiert werden), sondern wenn beispielsweise für den Abstand x versehentlich ein unsinnig hoher oder niedriger Wert eingegeben worden war.

7.4.12 Menüpunkt „Umbenennen/Entfernen einer kompletten Messreihe“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes erscheint zunächst die Abfrage Bild 7.42:



Bild 7.42: Abfrage Umbenennen oder Entfernen einer Messreihe

Nach Klicken auf Schaltfläche „Umbenennen“ oder „Entfernen“ erscheint zunächst die Dialogliste zur Auswahl einer Messreihe (Bild 7.20). Durch Klicken auf die Messreihe „test“ wird diese vorgewählt. Nach Klicken auf die Schaltfläche „Auswählen“ erscheint im Fall der Umbenennung die Abfrage nach der neuen Bezeichnung (Bild 7.43).



Bild 7.43: Abfrage Neue Bezeichnung für bisherige Messreihe

Nach Eingabe der neuen Bezeichnung und Klicken auf die Schaltfläche „OK“ erfolgt nach einer Sicherheitsabfrage („Soll ... wirklich ... ?“) die Umbenennung bzw. Entfernung.

7.4.13 Menüpunkt „DEFA-Spezialauswertungsroutinen“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes erscheint das Untermenü für die DEFA-Spezialauswertungsroutinen (Bild 7.44). Hier sind sämtliche MATLAB-Routinen zusammengefasst, die zwar für die direkte Durchführung der Defektanalyse nicht relevant sind, die aber während der Bearbeitung des Themas oder für den vorgelegten Abschlussbericht benötigt wurden. Auf diese Weise konnte vermieden werden, dass die Namen irgendwelcher MAT-Files gemerkt werden müssen. Aus den genannten Gründen werden die DEFA-Spezialauswertungsroutinen auch nicht näher erläutert. Mit dem Untermenüpunkt „DEFA-Spezialauswertungsroutinen beenden“ erfolgt die Rückkehr in das DEFA-Grundmenü (Bild 7.1).

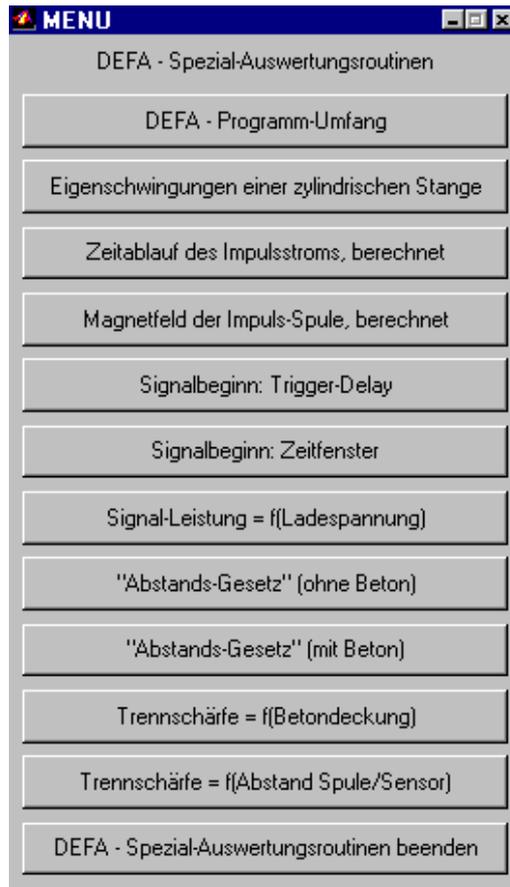


Bild 7.44: DEFA-Spezialauswertungsroutinen

7.4.13 Menüpunkt „DEFA beenden“

Bei Aufruf dieses Menüpunktes wird in das MATLAB-Kommandofenster zurückgekehrt. Durch Eingabe „defa“ kann das Grundmenü (Bild 7.1) erneut aufgerufen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] **Klaus Plötner & Peter Hoffmann GbR**
Impulsmagnetisator Typ 142/30.1
Bedienungsanleitung und Gerätebeschreibung

- [2] **Christoph, V.; Töpfer, J.:** „Modified BEM calculations on magnetic systems“;
Proc. of the 15th International Workshop on Rare-Earth-Magnets,
Dresden 1998; Werkstoff-Informationsgesellschaft Frankfurt

- [3] **Heino Henke**
Elektromagnetische Felder
Theorie und Anwendung
Springer 2001

- [4] **Küpfmüller und Kohn**
Theoretische Elektrotechnik und Elektronik, 14. Auflage
Springer 1993

- [5] **P. Rennert**
Kleine Enzyklopädie Physik, S. 535
VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1988

- [6] **Michailowski u. a.**
MAGNET-TECHNIK Grundlagen und Anwendungen, S. 38
Fachbuchverlag Leipzig und Köln

- [7] **Hahn/Munke**
Werkstoffkunde für die Elektrotechnik und Elektronik, S. 220
VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

- [8] **MATLAB select 1/01**
Das Kundenmagazin von The MathWorks, S. 12

- [9] **LeCroyTM**
Digital Oscilloscopes
Remote Control Manual, S. 4-4 ff.