

Optimierung von Sensoren auf Basis von Permanentmagneten

N. Surkova, B. Wolter, G. Dobmann, IZFP, Saarbrücken

S. Chachlov, TPU, Tomsk

Kurzfassung

Der Beitrag soll einen Überblick über die Optimierung von NMR-Sensoren auf Basis eines Permanentmagnetsystems geben (NMR = Nuclear Magnetic Resonance). An einigen Beispielen werden die Effektivität der Optimierung dargestellt und die Möglichkeiten der Miniaturisierung von NMR-Messsonden bei der Aufsatz- und Bohrlochmesstechnik erörtert.

1. Einleitung

Wasserstoff-Kernresonanz (¹H-NMR) ist eine vielseitige Methode für die Charakterisierung nichtmetallischer Werkstoffe, die sich durch eine direkte Empfindlichkeit gegenüber dem Wasserstoff auszeichnet und mit der u. a. die Feststofffeuchte hochpräzise und dennoch schnell gemessen werden kann. Die in Qualitätsprüflabors eingesetzten Messgeräte der konventionellen NMR erlauben aber nur die Untersuchung von Kleinstproben, da diese in die umschließende Messapparatur eingeführt werden müssen. Die NMR-Aufsatztechnik erzeugt dagegen einen messempfindlichen Bereich (sensitives Volumen) im Außenraum der Apparatur. Hiermit können beliebig große Prüfobjekte untersucht werden, auch wenn sie nur einseitig zugänglich sind. Das sensitive Volumen wird durch die Streufelder eines Permanentmagnetsystems (H_0) und einer Aufsatzspule (H_1) außerhalb des NMR-Sensors erzeugt.

Abb. 1 zeigt "NMR-INSPECT - ein am IZFP entwickeltes, tragbares NMR-Messsystem". Die wichtigsten Anwendungsbereiche der NMR-Messtechnik sind

- die zerstörungsfreie Prüfung der Funktionseigenschaften und der Alterungsbeständigkeit von Elastomeren, z.B. die Bestimmung des Alterungszustands in elastomeren Korrosionsschutzschichten,
- die Messung des Feuchtetiefenprofils und des Feuchtetransports in porösen Baustoffen,
- die Untersuchung der Aushärtung und der Alterung von Klebstoffen,
- die Bestimmung der Feuchte- und Dichteverteilung, sowie der inneren Struktur in Holzwerkstoffen (Spanholzplatten),
- die Bestimmung des Fettgehaltes in Lebensmitteln und

• die hydrogeologische Erkundung in Bohrlöchern

Bei diesem breiten Anwendungsspektrum muss die Sensorik häufig auf die jeweilige Prüfaufgabe angepasst werden.





Abb. 1. Ein am IZFP entwickeltes, tragbares NMR-Meßsystem "NMR-INSPECT"

Abb. 2. NMR-Aufsatzsensor

2. Beschreibung der Optimierungs-Software

Zur Optimierung des Sensordesigns wurde im IZFP ein Computerprogramm für die Berechnung und die Visualisierung der Verteilung der Empfindlichkeit des Sensors, der Magnetfelder des Permanentmagnetsystems und der Sensorspule entwickelt. Das Programm ermöglicht eine Adaptierung des NMR-Verfahrens für verschiedene Prüfaufgaben. Das Optimierungsprogramm funktioniert unter Windows 95, NT, 2000, XP und realisiert die "global search"-Methode für eine vorgewählte Zielfunktion auf Grund von 3D-Inhomogenitätsberechnungen. Magnetfeldund Verschiedene Magnetgeometrien (rechteckige, kreis- und ringförmige) können analysiert werden. Die Berechnung des Spulenfeldes erfolgt auf Basis des Biot-Savart'schen Gesetzes und die der NMR-Empfindlichkeitsverteilung auf Basis der exakten Lösung der Bloch'schen Gleichungen in inhomogenen Feldern.



Abb. 3. Das Optimierungsprogramm: ein Aufsatzsensor (links) und ein Bohrlochsensor (rechts)

3. Beispiele

3.1. Aufsatzsensor (NMR-INSPECT)

Bei der Auslegung des NMR-Aufsatzensors (Abb. 2) besteht das Optimierungsziel in der Reduzierung des Gewichts des Sensors und der Minimierung der Messzeit bei einer möglichst großen Maximal-Messtiefe. Die Reduktion der Messzeit wird durch eine Erhöhung des Signal-zu-Rauschverhältnisses der Einzelmessung, *SNR* erreicht. Dies wird durch die Erhöhung der Beträge H_0 und H_1 , sowie die Verbesserung der Homogenität von H_0 ermöglicht. Die Vergrößerung des sensitiven Volumens *V* kann bei gleich bleibendem auflösbaren Tiefeninkrement nur durch Erweiterung der lateralen Abmessungen des sensitiven Volumens *V* realisiert werden. Dies erfordert ebenfalls die Homogenisierung von H_0 in der *y*,*z*-Ebene, die offensichtlich durch Vergrößerung der Abmessungen (und entsprechend des Gewichts) des Magnetsystem erreicht werden kann. Bei diesen sich widersprechenden Anforderungen kann die Lösung nur durch eine Fokussierung der Empfindlichkeit auf eine einzelne Messtiefe erreicht werden.

Optimierungsziel

Miniaturisierung des Sensors.

Gleichzeitig soll die Signalamplitude (und entsprechend das Signal-zu-Rauschverhältnis) bei einer maximalen Messtiefe von 25 mm nicht geringer sein als bei dem ursprünglichen Modell des Sensors.

Optimierungsergebnisse

Durch Optimierung der Auslegung des Prüfkopfs mit Hilfe von Modellrechnungen wurde das Gewicht des NMR-INSPECT-Prüfkopfs auf etwa ein Fünftel des ursprünglichen Modells verringert und die Tiefenauflösung der Messungen deutlich verbessert. Tab. 1 und Abb. 5 zeigen die Ergebnisse dieser Optimierungsrechnungen.



Abb. 5. Die Verteilung der H_0 -Inhomogenität des SWRI- Sensors (links) und des NMR-INSPECT- Sensors (rechts) in der YZ-Ebene bei der 25mm- Entfernung von der Sensoroberfläche



Abb. 6. Die Verteilung der H_0 -Inhomogenität des SWRI- Sensors (links) und des NMR-INSPECT- Sensors (rechts) in der XZ-Ebene. Der Referenzpunkt bei beiden Fällen entspricht der 25mm- Entfernung von der Sensoroberfläche



Abb. 7. Die berechnete Empfindlichkeitsverteilung des ursprünglichen NMR-Sensors (links) und des optimierten NMR-Sensors in einer Entfernung von 25 mm von der Sensoroberfläche

Tab.1. Die Optimierungsergebnisse

Parameter (gemessen)	Ursprüngliches	Optimiertes	
	Sensormodell	Sensormodell	
Gewicht des Sensors	36 kg	7 kg	
Tiefenauflösung	2.5 mm	1,2 mm	
Messtiefe bei einer Signalamplitude von 0,3 V	27 mm	29 mm	

3.2. Sensor für die Feuchteprofilmessungen in Gummierungen auf Stahl

Gummierungen werden für den großflächigen Korrosionsschutz von Stahl in Behältern, Druckkesseln und Wannen z.B. in der chemischen Industrie und in Kraftwerken (Nassentschwefelungsanlagen) eingesetzt. Verständlicherweise unterliegt die Gummierung in diesen Fällen starken chemischen, thermischen und teilweise auch mechanischen Beanspruchungen. Dies führt oftmals zu einer beschleunigten Alterung der eingesetzten Werkstoffe. Letztendlich wird die Gummierung porös und nimmt Wasser auf. Je weiter das Wasser in die Gummierung vordringt, desto größer wird die Gefahr einer großflächigen Korrosion des metallischen Trägermaterials mit katastrophalen Folgen. Daher ist es sinnvoll, die Eindringtiefe der Feuchte in den Gummi bzw. deren Feuchtedurchlässigkeit (Permeabilität) regelmäßig zu überprüfen.

NMR-Aufsatzsensoren herkömmlicher Bauart zeigen ein sehr niedriges Signal-zu-Rauschverhältnis bei den Messungen in den Bereichen des Gummis, die sich in der Nähe von leitfähigen, ferromagnetischen Bauteilkomponenten befinden. Bei Anwesenheit einer Stahlplatte werden die Magnetfelder der Spule und des Magnetsystems im empfindlichen Bereich stark inhomogen und geschwächt. Die Abmessungen des sensitiven Volumens werden entsprechend verändert. Eine Vergrößerung der Abmessungen des Magnetsystems führt zur Erhöhung der Anziehungskraft zwischen den Prüfobjekt und den Sensor, was die Durchführung der Prüfung stört.

Optimierungsziel

Ein Sensordesign, das bei möglichst kleinen Sensorabmessungen Messungen in Abständen zur Stahlplatte zwischen 1 und 10 mm ermöglicht.

Optimierungsergebnisse

Ein Sensorkonzept mit ausgetauschten Richtungen der Magnetfelder der Spule und des Permanentmagnetsystems im sensitiven Volumen (Vektor des Spulenfeldes H_1 ist parallel und Vektor des Permanentmagnetfeldes H_0 ist senkrecht zur Sensoroberfläche) zeigt ein hohes Signal-zu-Rauschverhältnis bei Messungen in der Gummischicht auf der Stahlplatte. Die Abbildungen 8 bis 9 zeigen die berechneten Empfindlichkeitsverteilung in einer Entfernung von 2mm zu der Stahlplatte bei verschiedenen Sensorausführungen (Grün entspricht einer höheren Empfindlichkeit auf der Farbskala). In Tab.2 sind zum Vergleich Feld- und Empfindlichkeitsmerkmale der ursprünglichen und der optimierten Variante des Sensors aufgeführt.



Abb. 8. Die Empfindlichkeitverteilung des SWRI-Sensors ohne (links) und mit der Stahlplatte (rechts)



Abb. 9. Die Empfindlichkeitsverteilung der optimierten Sensoren ohne (links) und mit der Stahlplatte (rechts)

Tab. 2. Die Optimierungsergebnisse des NMR-Sensors für Gummirungen auf Stahl

	Der					
Sensor	Abstand	B0, mT	Die	B0-	Das	Das
	Sensor-	(In einer	Empfindlichkeit	Gradient in	Magnet-	Mess-
	Stahlplatte	Entfernung		der X-	volumen,	volumen
	(mm)	von 2mm		Richtung,	ст³	cm³
	. ,	von der		%/mm		
		Stahlplatte)				
SWRI	Ohne der	153,4	492	1,65	1226	4,2
	Stahlplatte					
SWRI	14	134,7	176	2.05	1226	3,19
8M	15	188	499	1,57	160	3,37

3.3. NMR-Bohrlochsensor

Abb.3 und Abb.11 zeigen die Verteilung des statischen Magnetfeldes der Bohrlochsonde. Die Magnetfeldstärke in der gleichen Entfernung von der Bohrlochachse hat unterschiedliche Werte, die vom Winkel abhängig sind. Das heißt, bei einer runden Form des Magnetsystems hat das Sensitive Volumen eine elliptische Form.

Optimierungsziel

Der empfindliche Bereich bei der Entfernung von etwa 120 mm von Sensorachse muss in *y*,*z*-Ebene kreisförmig sein.

Optimierungsergebnisse

Das optimierte Magnetsystem zeigt bei einem vorgewählten Abstand von der Sensorachse den gleichen Wert des statischen Magnetfeldes unabhängig vom Winkel (Abb. 12)



Abb. 10. NMR-Bohrlochsonde



Abb. 11. Die Verteilung des statischen Magnetfeldes der Bohrlochsonde



Abb. 12. Die Verteilung des statischen Magnetfeldes der Bohrlochsonde des ursprünglichen Modells (links) und des optimieren Modells (rechts) in einer Entfernung von 115 mm von der Sensorachse