

# Neues Verfahren: Echtzeitmessung der Stromdichte im Galvanikbad

<sup>1</sup>Dr. Hooshiar Mahdjour, <sup>2</sup>Peter Schwanzer und Klaus Schmid

<sup>1</sup>Ing.-Büro PhysiTronik, Berlin; <sup>2</sup>Fraunhofer IPA, Stuttgart

*In der zweihundertjährigen Geschichte der Galvanotechnik ist bis jetzt keine ultimative Lösung für die Bestimmung der Stromdichteverteilung vorgeschlagen worden. Der Grund für das Fehlen eines effizienten Messsystems könnte die starke Trennung zwischen diesem Gebiet und den Bereichen der Elektro- und Messtechnik gewesen sein. Den Fachleuten der Elektro- und Messtechnik war das Problem der präzisen Bestimmung bzw. totalen Beherrschung der gleichmäßigen Stromdichteverteilung unbekannt. Auf der anderen Seite haben die Galvanotechniker sich damit abgefunden, dass das o. g. Problem unlösbar sei.*

*In the 200 year long history of electroplating, there has never been a definitive method for measuring current distribution in a plating tank. An explanation for this lack of an efficient measurement method can be attributed to a gulf between the disciplines of metal finishing on the one hand and electronics and measurement, on the other. Experts in the latter fields were unaware of the requirement for a technique capable of measuring current density in situ and the desirability of achieving uniform current density distribution. For their part, Metal Finishers had long concluded that these were insoluble problems.*

## 1 Einleitung

Für den Anwender wesentlich sind über Chargen und die dreidimensionale Bauteiloberfläche konstante und einstellbare Eigenschaften. Dies bezieht sich einerseits auf werkstofftechnische Eigenschaften wie Härte, Porosität, Eigenspannung und Korrosionsbeständigkeit, andererseits auf geometrische Eigenschaften wie Schichtdicke, d. h. gleichmäßige Schichtverteilung. Neben den chemischen Parametern (Elektrolytzusammensetzung) ist die entscheidende Stellgröße dabei die Stromdichte. Diese bestimmt den Faradayschen Gesetzen folgend die Schichtdicke, zudem verändern sich auch die werkstofftechnischen Eigenschaften mit wechselnder Stromdichte. Das Ideal für konstante Eigenschaften ist daher eine über die gesamte zu beschichtende Oberfläche konstante Stromdichte. Dies ist aber auf dreidimensionalen Bauteilen nicht der Fall. Der Grund dafür ist, dass die örtliche Stromdichte ihrerseits abhängig von den Feldlinien ist, die sich zwischen Anode und Kathode bilden. Diese Feldlinien konzentrieren sich an Spitzen, Ecken und Kanten eines Bauteils, während sie sich in Hohlräumen und Vertiefungen vermindern. Da nun eine hohe Feldliniendichte eine hohe Kathodenstromdichte zur Folge hat, herrscht zwar an den Spitzen und Erhebungen eine große Niederschlagsdicke, in den Hohlräumen und Vertiefungen tritt dagegen nur eine geringe oder überhaupt keine Metallabscheidung auf. Diese ört-

lichen Schichtdickenunterschiede können beträchtlich sein und sind umso ausgeprägter, je stärker profiliert die Bauteile sind. Neben einzelnen Bauteilen tritt derselbe Effekt auch über Chargen auf: Bei der galvanischen Beschichtung ist eine übliche Vorgehensweise das Beschichten auf Gestellen. Dabei werden Bauteile neben- und übereinander auf Rahmen (Gestelle) aufgesteckt, die mittels eines Fahrwagens von Elektrolyt zu Elektrolyt transportiert werden. Auch für gleichartige Bauteile auf verschiedenen Positionen eines Gestells gelten die Effekte der inhomogenen feldlinienverursachten Stromdichte- und damit Schichtdickenverteilung.

In der Praxis wird oft versucht, eine inhomogene Stromdichteverteilung durch langjährige Erfahrung der Galvaniseure qualitativ vorherzusagen, um notwendige Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Wenn beispielsweise Blenden eingesetzt werden, wird deren Anordnung näherungsweise empirisch ermittelt. Diese erfahrungsabhängige Methode ist jedoch als nichtquantitativ und schwer reproduzierbar zu bewerten. Eine weitere Methode ist der Einsatz von Computern und Simulationsprogrammen. Hierbei werden der Simulationssoftware verschiedene notwendige Daten und Parameter, wie die Dimensionen der Elektroden, deren Abstände zueinander sowie die Elektrolyteigenschaften, zur Berechnung der Stromdichteverteilung eingegeben. Beiden Methoden fehlt die experimentelle und quantitative Ermittlung der

Stromdichteverteilung in Echtzeit, damit gezielte, im ganzen Herstellungsprozess reproduzierbare und zu verallgemeinernde Maßnahmen zur Homogenisierung der Stromverteilung ergriffen werden können.

Zwar wurden auf der Suche einer praktikablen und wirtschaftlichen Lösung zur quantitativen Messung der Stromdichte im Galvanikbad bis jetzt einige Versuche gestartet, welche jedoch, wie unten beschrieben, aufgrund messtechnischer Schwierigkeiten nicht anwendbar sind.

In der Apparatur eines US-Patents von 1957 [1] wird das Prinzip des Anlegewandlers oder der Stromzange genutzt, die als Messinstrument in das Elektrolytbad eintauchen. Um den magnetisierbaren Ring der Stromzange ist eine Spule gewickelt. Hierbei wird die konstante Spannung zwischen der Anode und Kathode des Elektrolytbads mit einem bekannten sinusförmigen Signal moduliert. Die Wechselspannung wird benötigt, damit eine elektromagnetische Induktion ermöglicht wird. Fließt ein sinusförmiger Ionenstrom durch den Ring, wird eine Spannung in der Ringspule induziert, welche der Summe der Amplituden aller Ionenströme proportional ist, die durch das Loch des Rings (kurz: Ringloch) fließen. Bei vielen Anwendungen sind die Verwendung einer Wechselspannung und/oder die Modulation der gängigen Gleichspannung des Galvanikbads nicht erwünscht. Das größere Hauptproblem ist aber die starke Dämpfung des Modulationssignals durch die Ausgangskondensatoren der Gleichspannungsversorger des Elektrolytbads. Diese Kondensatoren „saugen“ den ganzen Wechselstrom ein, so dass praktisch kein Messsignal ins Bad fließt. Ein Einsatz dieser Technik ist derzeit nicht bekannt.

In der deutschen Offenlegungsschrift von 1987 [2] wird die Idee der Stromdichtenmessung über eine Magnetfeldmessung vorgeschlagen. Es handelt sich um eine ringförmige Sonde, die einen Ferritring, mit einem integrierten Magnetfeldsensor (z. B. einem Hallsensor), enthält. Die Apparatur soll, wie bei [1], empfindlich gegenüber nur der durch das Loch der Sonde fließenden Ionenströme sein. Dort ist jedoch die Problematik der Unterdrückung vieler Arten von Rauschsignalen und thermischen Instabilitäten nicht behandelt. Die dort erwarteten Empfindlichkeiten sind im Bereich von  $50 \text{ A/dm}^2$  und damit mindestens um Faktor 100 zu ungenau. Zudem bietet ein Verfahren mit einem Magnetfeldsensor in einem Ferritring, wie in [2], keine homogene örtliche Empfindlichkeit. Mit anderen Worten, die Messempfindlichkeit ist abhängig von dem Abstand der örtlichen Ströme zum

Magnetfeldsensor. Zudem, wegen des Luftspalts für den Magnetfeldsensor im Ferritring, wird eine vollständige Abschirmung gegenüber den Ionenströmen außerhalb des Lochs der Sonde nicht garantiert<sup>1</sup>. Des Weiteren ist eine Messtechnik auf dieser Basis, wegen der Temperaturabhängigkeit des Magnetfeldsensors, thermisch stark instabil. Ein Einsatz des Konzepts von [2] ist auch hier nicht bekannt.

Möglichkeiten zur Stromdichtemessung wurden am Fraunhofer IPA bereits früher bearbeitet, mit dem Aufkommen von Halbleiterbausteinen wurden Untersuchungen zur Verwendung von ionensensitiven Feldeffekttransistoren (ISFET) durchgeführt. [3a–c] Hierbei wurden in Grundlagenuntersuchungen viele Einflussfaktoren auf das ISFET-Sensorpotential untersucht, es wurde jedoch kein breit einsetzbares System entwickelt.

Unter Nutzung dieser ionensensitiven Feldeffekttransistoren wird von anderer Stelle im deutschen Gebrauchsmuster von 1998 [4] zur Messung lokaler Stromdichten eine stabförmige Sonde vorgeschlagen. In ihre Spitze sind zwei parallel zueinander angeordnete ISFETs integriert, mit deren Hilfe der elektrische Strom zwischen den beiden ISFETs gemessen werden soll. Da den Ionen prinzipiell alle beliebigen Stromlinien zu den ISFETs zur Verfügung stehen, ist eine Messung der Stromdichteverteilung in ausreichender Güte nicht realistisch. Es sind deshalb für diese Methode auch keine industriellen Einsätze bekannt.

Ein neues Verfahren wurde 2007 in einem deutschen Gebrauchsmuster [5] vom Gründer des späteren Ing.-Büro PhysiTronik vorgeschlagen und umgesetzt (*Abb. 1*). Dabei wird ein kommerzieller Stromsensor zur Messung der Ionenströme verwendet, in dem ein Magnetfeldsensor integriert ist. Zur Reduzierung der Rauschsignale und der thermischen Instabilitäten wird die konstante Spannung des Galvanikbads mit einem bekannten sinusförmigen Signal moduliert, was, aus ähnlichen Gründen wie bei [1] eine industrielle Anwendung verhindert. Trotzdem konnte mit dessen Hilfe die Stromdichteverteilung im Labormaßstab unter eingeschränkten Bedingungen ermittelt werden. Die prinzipielle Funktionalität konnte unter Beweis gestellt werden, für den industriellen Einsatz waren jedoch umfangreiche Entwicklungsarbeiten notwendig.

<sup>1</sup> Siehe dazu Kap. 3

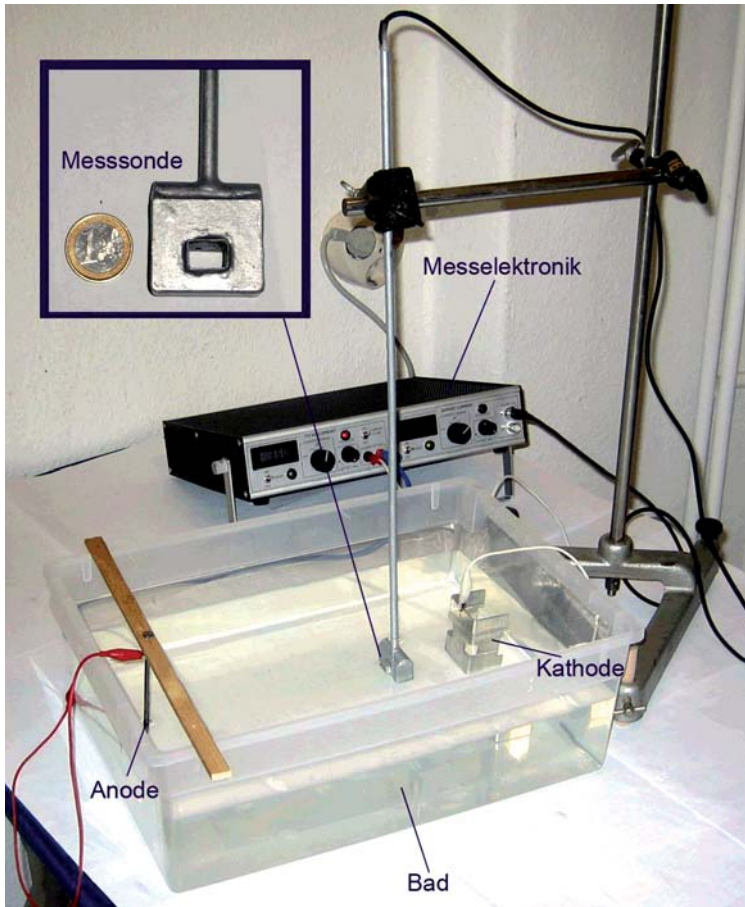


Abb. 1: Aufbau zur Messung der Stromdichteverteilung. Das Teilbild zeigt die vergrößerte Frontsicht der Messsonde. Nur der durch das Messloch fließende Ionenstrom wird gemessen: Die Genauigkeit ist  $1 \text{ mA/dm}^2$ , die Querschnittsfläche des Messlochs etwa  $1 \text{ cm}^2$ . Die oszillierende Spannung des Bads wird von der Messelektronik geliefert. Als Elektrolyt wurde Natriumchlorid-Lösung (Salzwasser) verwendet

## 2 Projekt EmSig

Zwischen 01.09.2009 bis 31.08.2011 wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes KMU-innovativ „Echtzeitmessung der Stromdichte zur Steigerung der Ressourceneffizienz in galvanotechnischen Produktionen“ (kurz: EmSiG) intensive und systematische Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Entwicklung eines Messsystems zur Echtzeitmessung der Stromdichte in Galvanikbädern unternommen. Bei diesem Verbundprojekt wurde schließlich aus einer Kooperation zwischen dem Fraunhofer- Institut für Produktionstechnik und

Automatisierung IPA, der Dialog GmbH und dem Ing.-Büro PhysiTronik zum ersten Mal das Messsystem GalvanoScanner geschaffen, mit dessen Hilfe die Stromdichtemessung im Galvanikbad ermöglicht wurde.

Der Erfolg des Projektes EmSig ist u. a. in dem breiten Spektrum der Expertise der Kooperationspartner zu begründen. Zwar sind industriell und kommerziell bereits seit mehreren Jahrzehnten verschiedenartige Stromsensoren im Einsatz, welche mehrheitlich im Bereich der Starkstromtechnik und vor allem zur Messung der elektrischen Stromstärke in Kabelleitungen infrage kommen. Die niedrige Empfindlich-

keiten dieser Stromsensoren sind nicht für Einsätze in Galvanotechnik geeignet, wo hohe Auflösungen von  $< 0,5 \text{ A/dm}^2$  erforderlich sind. Verglichen mit den herkömmlichen Stromsensoren entspricht dies bei einem Kabelquerschnitt von  $1 \text{ mm}^2$  einer Auflösung von  $< 50 \mu\text{A}$ . Zudem muss die Technologie bei Einsätzen in der Galvanotechnik so ausgelegt sein, dass die Messsonde den teilweise sehr aggressiven galvanischen Elektrolyten standhält. Die Elektronik muss so gestaltet sein, dass sie vom Anwender einfach zu bedienen ist und klare, robuste Messsignale ausgibt.

### 3 Zur Grundlage der berührungslosen Strommessung

Laut des Ampèreschen Gesetzes, ist das Wegintegral der von einer Kabelleitung erzeugten magnetischen Induktion  $B$  längs einer beliebigen geschlossenen Kurve  $S$  gleich dem von der Kurve eingeschlossenen Gesamtstrom  $I$ :

$$\oint_S B \cdot ds = \mu I \quad \text{<Gl. 1>}$$

Dabei ist  $\mu$  die Permeabilität des umgebenden Mediums der Kabelleitung. Wenn Kurve  $S$  ein Kreis mit dem Radius  $r$  um die Kabelleitung (Abb. 2) ist, dann ist  $|B|$  konstant und das o. g. Wegintegral wird gleich

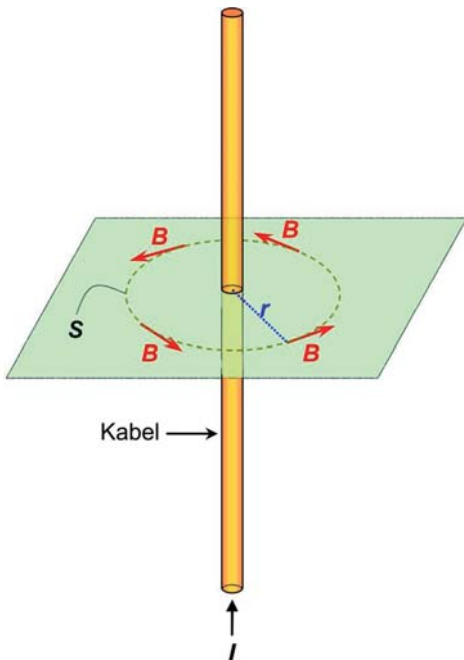


Abb. 2: Unendliches geradliniges zylindrisches stromdurchflossenes Kabel und das von ihm erzeugte Magnetfeld. Die Vektoren  $B$  und  $I$  sind aufeinander senkrecht.

$2\pi r B$ . Daraus wird ersichtlich, dass es eine feste Beziehung zwischen dem Induktionsbetrag  $|B|$  als Funktion von  $r$  und dem Gesamtstrom  $I$  gibt:

$$B(r) = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad \text{<Gl. 2>}$$

Die Permeabilität  $\mu$  ist ein Maß dafür, wie stark sich die magnetischen Dipolmomente (falls vorhanden) eines Materials von einem äußeren Magnetfeld beeinflussen bzw. orientieren lassen. Magnetisierbare Stoffe, wie z. B. Ferrit, weisen eine hohe Permeabilität auf, die bei niedrigen Magnetfeldstärken konstant und bei hohen Magnetfeldstärken sehr klein wird. Aus Gleichung 2 folgt dann, dass  $|B|$  bei hohen Werten von  $I$  Sättigung erreicht, weil in Gleichung 2 die Permeabilität  $\mu$ , wie oben beschrieben, sehr klein wird. Im Prinzip erwartet man für  $|B|$  als Funktion von  $I$  einen Verlauf, wie in Abbildung 3 dargestellt.

Die Strommessung kann sodann durch die Magnetfeldmessung ersetzt werden. Die Aufgabe der berührungslosen oder potenzialfreien Strommessung<sup>2</sup> wird so auf die Messung des Magnetfelds verlagert. Allerdings ist daran zu erinnern (s. o.), dass  $B$  und  $I$  zueinander zwangsläufig kein lineares Verhältnis haben müssen (Abb. 3). Nichtsdestotrotz lässt sich die Stromstärke, dank verschiedener Messtechniken, wie die von Projekt-EmSig, durch die Messung des Magnetfelds bestimmen.

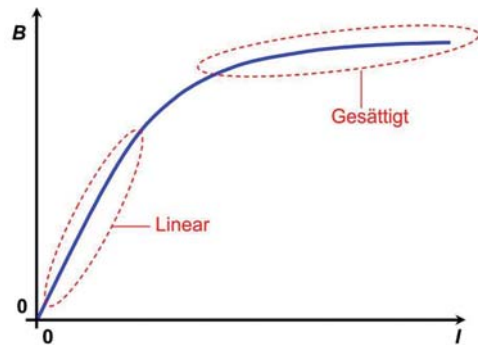


Abb. 3: Prinzipieller Verlauf des Betrags der magnetischen Induktion  $B$  als Funktion der Stromstärke  $I$ . Der Kurvenverlauf ist bei niedrigen Strömen linear. Bei hohen Strömen im Sättigungsbereich ändert sich  $|B|$  kaum

<sup>2</sup>Unter potenzialfreier oder berührungsloser bzw. galvanisch getrennter Strommessung versteht es sich, dass die Messeinrichtung keinen elektrisch leitfähigen Kontakt mit der stromführenden Kabelleitung aufweist.

Eine potenzialfreie Messung des elektrischen Stroms ist notwendig, wenn sich die stromführenden Leiter auf einem Hochspannungspotenzial befinden, z.B. bei Kathoden- und Anodenzuleitungen von Röntgenröhren. Ein anderer Anwendungsfall ist die Ionenstrommessung in flüssigen Elektrolyten, wie in Galvanikbädern, in denen eine Strommessung durch Eintauchen der Messkontakte (z.B. die von einem kommerziellen Amperemeter) in den Elektrolyt einerseits zu deren Beschädigung durch die chemisch aggressive Umgebung führt. Andererseits wird in Galvanikbädern oft die Bestimmung der Stromdichteverteilung gefordert. Durch das Eintauchen der Messkontakte in den Elektrolyt werden deren Eintauchstellen praktisch elektrisch niederohmig geschlossen, wodurch die elektrischen Eigenschaften des Messobjekts bzw. des Elektrolyts stark beeinflusst werden und der normale Prozess der Elektrolyse beeinträchtigt wird. Drittens, wie in *Kapitel 1* zu den Mängeln von Ref. [4] geäußert, werden in dem Fall den Ionen praktisch alle beliebigen Stromlinien zu den Messkontakten frei, wodurch eine Messung der Stromdichteverteilung in ausreichender Güte nicht möglich wird.

Das Ampèresche Gesetz lässt sich zur berührungslosen Messung der elektrischen Stromstärke  $I$  nützlich machen, in dem ein Teil des stromleitenden Mediums mit einem Ring aus weichmagnetisierbarem hochpermeablem Stoff (z.B. aus Ferrit) eingeschlossen wird. Dadurch wird das Magnetfeld mithilfe des Ferritings zusammengebündelt bzw. konzentriert. Eine andere Funktion des vollständig eingeschlossenen Ferritings ist, dass nur die Ströme nachweisbar sind, die durch das Loch des Ferritings fließen; außerhalb des Lochs strömende Ladungen haben keinen Einfluss auf die Orientierung der magnetischen Domäne des Ferritings.

Zur Messung der Magnetfeldstärke sind unterschiedliche Methoden anwendbar, verbreitet ist die Anwendung von Magnetfeldsensoren. Diese Sensoren benötigen in der Regel zwei Leitungen für eigene Spannungsversorgung und zwei Leitungen zur Ausgabe des der Magnetfeldstärke proportionalen Signals.

*Abbildung 4* zeigt eine Anordnung zur Strommessung mithilfe eines Magnetfeldsensors. Durch den Strom  $I$  wird ein Magnetfeld, entlang des hochpermeablen Jochs, senkrecht auf der Sensorfläche

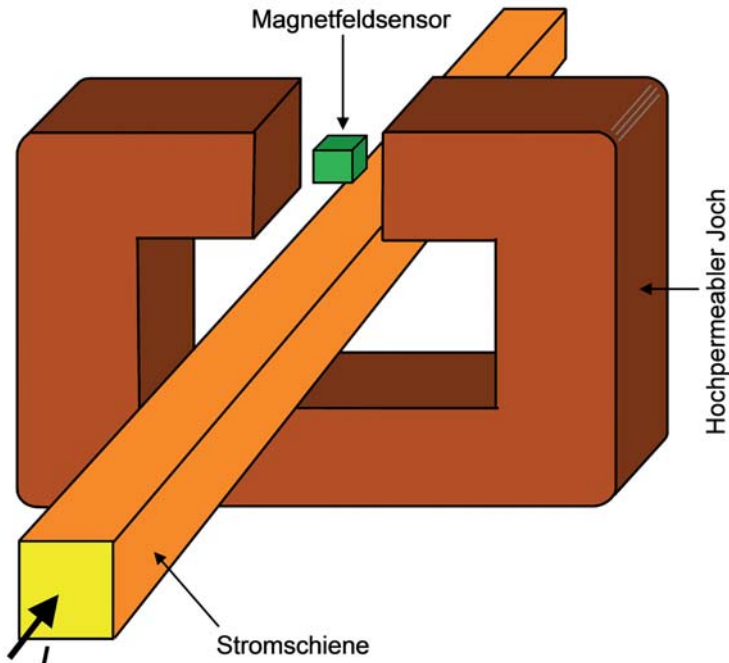


Abb. 4: Der Magnetfeldsensor ist so im Arm des hochpermeablen Jochs platziert, dass er der höchstmöglichen Magnetfeldstärke ausgesetzt ist und folglich in der Lage ist mit hoher Präzision die Magnetfeldstärke zu messen

che erzeugt. Der Übersichtlichkeit halber sind die Zuführungskabel des Magnetfeldsensors nicht eingezeichnet. Der durch die Stromschiene fließende Strom lässt sich nach einer Magnetfeldmessung, wie oben beschrieben, bestimmen. Die Anwendung von Magnetfeldsensoren hat den Nachteil, dass die Notwendigkeit des Luftspalts für den Sensor zur Verstreuung des Magnetfeldes und zur Störanfälligkeit der Feldmessung führt. Referenz [6] enthält einen kurzen Überblick über die Strommessung mithilfe von Magnetfeldsensoren.

Eine variierende Magnetfeldstärke lässt sich auch mithilfe der Induktionsmethoden, z. B. mit Rogowski-Spule [7], ermitteln, was zur Messung von Gleichströmen, wie von Ionenströmen im Galvanikbad ungeeignet ist.

Es gibt andere Messverfahren ohne Magnetfeldsensoren, wie das im Projekt EmSig, welches in Absatz 4.1 beschrieben wird.

Im Elektrolytbad hat man als Strommedium kein Stromkabel oder keine Stromschiene, wie in *Abbil-*

*dung 2 und 3, sondern eine Elektrolytlösung. Die elektrische Leitfähigkeit der flüssigen Elektrolyte beruht, im Gegensatz zu Elektronen in leitenden Metallen, auf der Bewegung der Ionen. Da *Gleichung 1* keine prinzipielle Einschränkung zu der Art oder Beschaffenheit des leitenden Mediums enthält, kann sie auch für das flüssige leitende Medium der Elektrolytlösung herangezogen werden.*

## 4 GalvanoScanner

### 4.1. Messprinzip

*Abbildung 5* stellt die Messarchitektur des GalvanoScanners dar. Der Messkopf – das Herzstück des Messsystems – besteht aus einem Ferritring, der mit einer Spule (Toroidspule) umgewickelt ist. Das symmetrische Rechtecksignal  $U_{Osz}$  des Oszillators wird über den Widerstand  $R$  der Spule weitergeleitet. Die Windungszahl der Spule muss so ausgewählt werden, dass der Hochpegel der Oberwellen und der Tiefpegel der Unterwellen des Signals  $U_{Osz}$  die magnetische

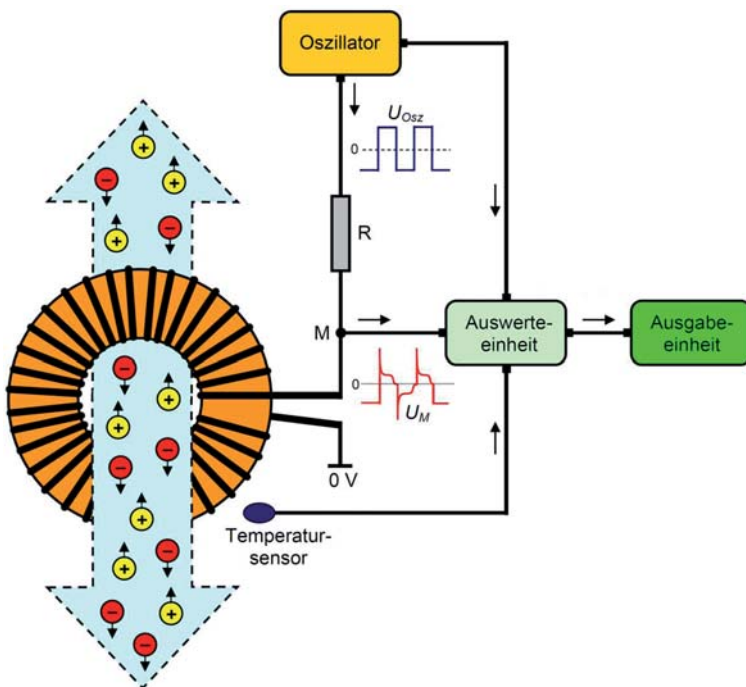


Abb. 5: Die Messarchitektur umfassend den Messkopf mit der Spule um den Ferritring, die Auswerteeinheit und Erfassungseinheit sowie die Messsignale. Der Ionenstrom, aus der Summe der positiven und negativen Ionen, fließt durch das Ringloch

Induktion  $B$  im Ferrit jeweils wechselhaft in die Sättigung treiben können (Abb. 3). Dadurch weist das Signal  $U_M$  am Mittelabgriffpunkt  $M$  nicht die rechteckige Form vom Oszillatorsignal  $U_{Osz}$  auf und wird verzerrt (Abb. 5). Taucht der isolierte Messkopf in ein Elektrolytbad, dessen Elektroden mit Spannung beaufschlagt worden sind, fließen Teile der Ionen (beider Ladungen) durch das Loch des Messkopfs (kurz: Messloch). Dies führt dazu, dass die Ober- und Unterwellen von  $U_M$  nicht mehr symmetrisch sind. Hier ist die Aufgabe bzw. die Herausforderung aus dem Asymmetriegrad von  $U_M$  den Ionenstrom mit akzeptabler Auflösung zu ermitteln.

Tatsächlich wird diese Technik seit Jahrzehnten, v. a. in der Starkstromtechnik, zur galvanisch getrennten Strommessung eingesetzt. Die unterschiedlichen Anforderungen bei diversen Anwendungen und Einsätzen haben dazu geführt, dass inzwischen verschiedene Varianten dieser Technik zustande gekommen sind. Es werden in der Regel zwei Grundkonzepte verwendet.

Beim ersten kostengünstigeren Konzept (z. B. in [8] und [9]) wird die Änderung der Magnetisierung des Ringkerns durch eine Schaltanordnung registriert und als Maß für die Stärke des zu messenden Stroms (kurz: Messstrom), der durch das Ringloch fließt, verwendet. Dies wird u. a. mithilfe eines Tastsignals ermöglicht, das die Ringspule beaufschlagt. Da die magnetischen Eigenschaften des Ferritmaterials von der Umgebungstemperatur und den äußeren (Stör-)Magnetfeldern abhängen, sollte jedes Messsystem separat kalibriert werden, sofern eine hohe Genauigkeit verlangt wird. Außerdem ist die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur ein Problem, das entweder durch eine aufwendig konstant zu haltende Umgebungstemperatur oder durch eine Kalibrierung gelöst wird. Der Einfluss der äußeren Magnetfelder hingegen ist vernachlässigbar klein, bzw. stellt ein geringeres Problem dar als die Umgebungstemperatur, weil die äußeren Magnetfelder (z. B. Erdmagnetfeld) meist sehr klein oder fast konstant sind.

Beim zweiten Konzept (z. B. in [10] und [11]) wird – zusätzlich zur ersten Ringspule und dessen Tastsignal – ein sogenannter Pumpstrom, mittels einer komplexen Schaltanordnung durch eine zweite Spule um den Ferritring geleitet und solange verändert bis er die Wirkung des Messstroms kompensiert. Über den Messwert des Pumpstroms lässt sich der Messstrom ermitteln.

Die gemeinsame Aufgabe der beiden o. g. Methoden ist die Registrierung der Symmetrieabweichung

der Magnetisierungskennlinie des Ferrittrings. Im GalvanoScanner erfolgt die Erkennung dieser Symmetrieabweichung, im Gegensatz der häufigen Verfahren, über die Messung des Abtastsignals im Zeitraum. Dies ermöglicht mithilfe spezieller Algorithmen und innovativer Hardware sowohl eine enorme Messauflösung als auch Kompaktheit für den Messkopf.

#### 4.2 Messsystem und technische Daten

Der GalvanoScanner GS01 (Abb. 6) ist ein Messgerät, mit dessen Hilfe in Echtzeit eine genaue und quantitative Information über die Stromdichteverteilung in einem Elektrolytbad ermittelt werden kann. Die Messsonde des GalvanoScanners kann vom Anwender per Hand im Elektrolytbad geführt und beliebig in verschiedene Richtungen bewegt werden. Die lokale Ionenstromdichte wird von der Sensorik



Abb. 6: Messsonde, Messkopf, Steuer- und Messeinheit vom GalvanoScanner GS01

der Messsonde erfasst und zur weiteren Verarbeitung sowie zum Anzeigen auf die Messelektronik weitergeleitet.

Der GalvanoScanner GS01 hat einen Messbereich von 0 bis 100 A/dm<sup>2</sup> mit einer Messauflösung von 0,5 A/dm<sup>2</sup>. Die örtliche Auflösung, d. h. die Querschnittfläche des Lochs der Messsonde (kurz: Messloch) beträgt 50 mm<sup>2</sup>.

In Abbildung 7 ist eine sehr gute Linearität des Ausgangssignals der Messelektronik als Funktion der Dichte des durch das Messloch fließenden Messstroms deutlich zu erkennen<sup>3</sup>. Diese ausgezeichnete Linearität bietet den Vorteil, dass prinzipiell zwei Messpunkte zur Kalibrierung des Ausgangssignals ausreichen könnten.

<sup>3</sup>Die Stromdichte ist gleich Messstrom dividiert durch die Querschnittfläche des Lochs der Messsonde.

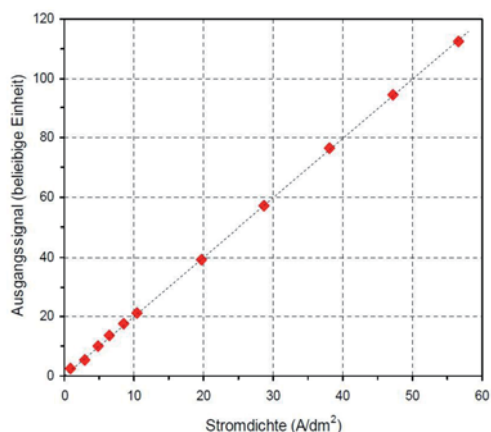


Abb. 7: Das beliebig skalierte Ausgangssignal des Messsystems als Funktion der Dichte des durch das Messloch fließenden Messstroms. Bei diesen Messungen fließt der Messstrom durch einen Draht, welcher durch das Messloch geleitet ist (Trockenmessung)

#### 4.3 Mechanischer Sondaufbau

Die Sonde wurde mit dem Ziel einer Einsatzmöglichkeit in allen gängigen galvanischen Elektrolyten entwickelt, was die Anforderungen an die Temperatur- und Chemiebeständigkeit definiert hat. Im Detail ist daher eine gleichzeitige Beständigkeit gegen starke Mineralsäuren, starke organische und oxidierende Säuren sowie auch starke Laugen berücksichtigt, der Temperaturbereich liegt zwischen  $+10^{\circ}\text{C}$  und  $+70^{\circ}\text{C}$ . Die Funktion bei niedrigeren Temperaturen bis  $-10^{\circ}\text{C}$  würde auch den Einsatz in Eloxalprozessen erlauben und ist realistisch, wurde aber noch nicht getestet.

Um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen und parallel eine gute mechanische Stabilität zu erreichen kommt als Grundwerkstoff das aus dem Anlagenbau bekannte PVC-C zum Einsatz, durch die Klebemöglichkeit dieses Werkstoffs ließ sich auch ein einfacher Aufbau erzielen. Der Grundaufbau der Prototypsonde besteht aus einem Messkopf und einem daran angeschraubten Verlängerungsrohr, im Messkopf ist der Ferritring (mit Wicklung) untergebracht, im Schaft wird zusätzlich ein Temperaturfühler befestigt (Abb. 8). Zur Anbindung des Verlängerungsrohrs kam eine handelsübliche Rohrverschraubung mit Überwurfmutter und Einlegeteil zum Einsatz, das Gewinde ist direkt auf den Messkopf geschritten.



Abb. 8: 3D-Modell des Messkopfprototyps (Teilschnitt) mit Ringkern und Temperaturfühler

Für die erste Serie wird das Verlängerungsrohr fest und verdrehsicher mit dem Sondenkopf verbunden, wodurch die verhältnismäßig große Verschraubung entfällt und ein schlanker Aufbau möglich ist.

#### 5 Messergebnisse im Galvanikbad

Um für die Entwicklung der Sonde und der realitätsnahen Untersuchung der Messelektronik und des Messsignals kontrollierbare und reproduzierbare Rahmenbedingungen zu schaffen, wurde am IPA ein spezielles Galvanikbad entworfen, welches in einem geschlossenen System eine detaillierte Prüfung der Messtechnik erlaubt. Anhand der hiermit durchgeführten Versuche konnte eine exakte Beurteilung von Messsignalqualität und Einflussfaktoren erfolgen, welches die Richtungen für die stetige Weiterentwicklung der Elektronik lieferte.

### 5.1 Prüfaufbau

Ziel des Prüfaufbaus war die Bereitstellung von steuerbaren Parametern wie Temperatur, Stromdichte, Hydrodynamik und konstante geometrische Verhältnisse zwischen Anode, Kathode und Messsonde. Gleichzeitige war eine Dokumentation der Messwerte erforderlich, anhand derer eine detaillierte Auswertung erfolgen konnte.

Der realisierte Prüfstand besteht daher aus einem Behälter mit zwei Abteilen und einem Gesamtvolumen von ca. 10 ltr., wie in *Abbildung 9* dargestellt. Im größeren Messabteil finden die Prüfungen der Messsonde statt, hier sind Anode, Kathode und eine beliebig ausrichtbare Einströmung des Elektrolyten untergebracht. Als Kathodengeometrie wurden für Grundlagenversuche ein ebenes Blech verwendet (Fläche

2 dm<sup>2</sup>), für erste Stromdichte-Verlaufskurven eine gebogene Form, ähnlich den in der Galvanotechnik bekannten Winkelblechen (Fläche ca. 2,3 dm<sup>2</sup>). Die Messsonde wird von oben in das Bad eingebracht und kann über seitlich angebrachte Linearantriebe in X- und Y-Richtung bewegt und genau positioniert werden. Die Eintauchtiefe und Rotation der Sonde werden manuell eingestellt, sind durch angebrachte Skalen und fest verbunden Halterungen jedoch eindeutig reproduzierbar.

Zwischen dem Messabteil und dem zweiten Hilfsabteil befindet sich eine Überlaufkante, diese sorgt für einen klar definierten Füllstand und den Elektrolytaustausch zwischen den Abteilen. Im Hilfsbereich sind alle zur Parameterkontrolle notwendigen Einbauten wie Heizung, Temperaturfühler, Schwimm-

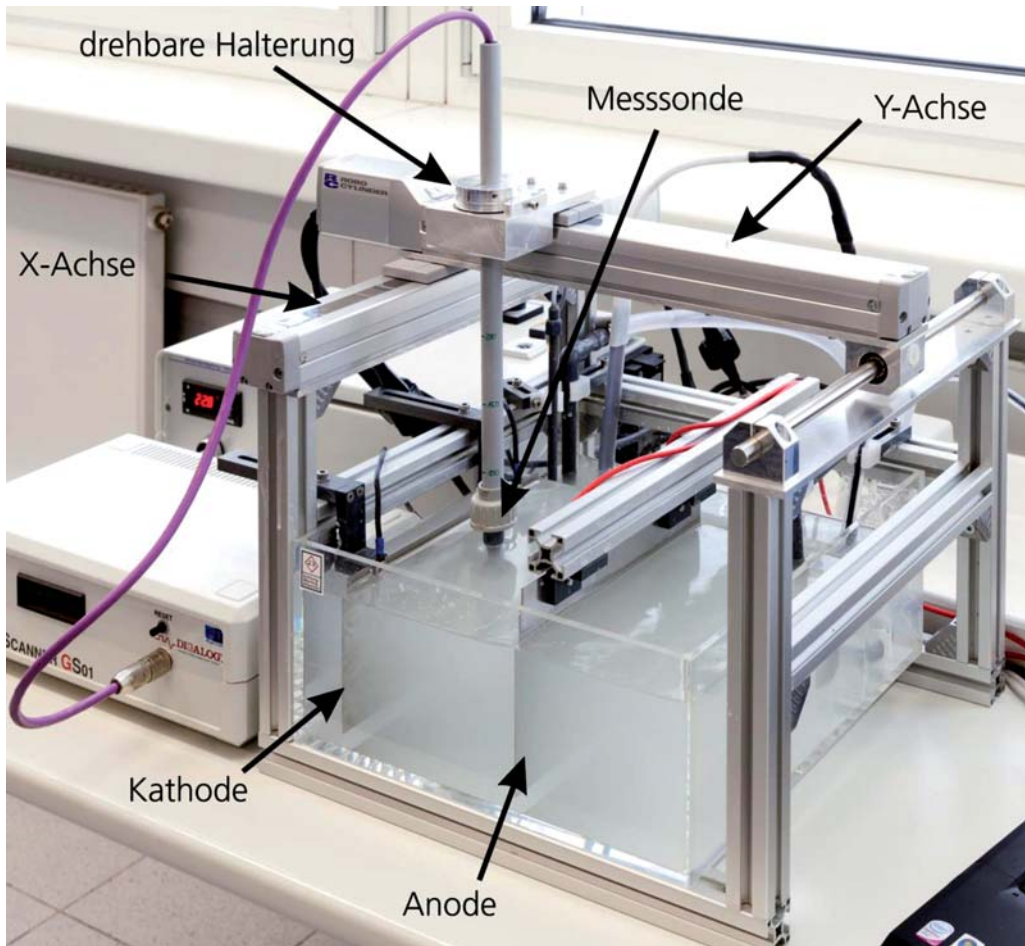


Abb. 9: IPA-Prüfaufbau mit XY-Achsen während einer Messung

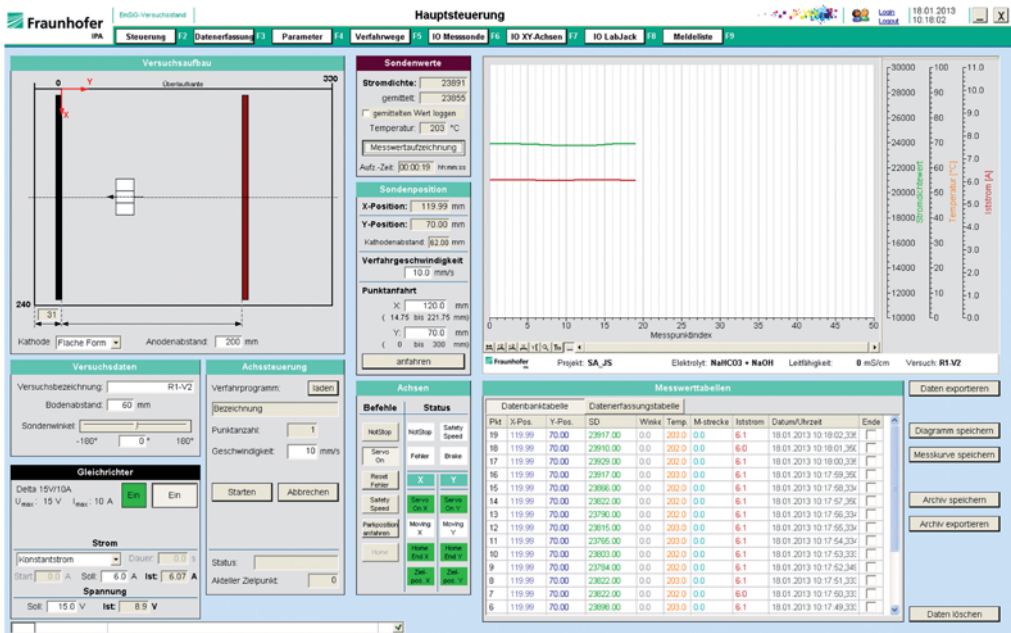


Abb. 10: Screenshot der Benutzeroberfläche der PC-basierten Steuerung des Prüfaufbaus

mer bzw. Trockenheizschutz und Saugstutzen für die Umwälzung. Durch die Trennung des Behälters in zwei Bereiche konnten alle für die Stromdichteverteilung nicht notwendigen Einbauten außerhalb des elektrischen Feldes zwischen Anode und Kathode untergebracht werden, was eine Störung bzw. Beeinflussung des Ionenstroms ausschließt.

Für die Steuerung der Linearzylinder, des Gleichrichters und die Aufzeichnung der Messwerte wurde eine PC-basierte Steuerung inkl. graphischer Benutzeroberfläche erstellt (Abb. 10). Die Steuerung erlaubt eine genaue Dokumentation von Stromdichte-Messwert, Temperatur der Sonde, Strom und Spannung des Gleichrichters sowie die XY-Koordinate und Verdrehwinkel. Ebenso kann ein Bewegungsprogramm erstellt und abgefahren werden, während dessen die Stromdichte entlang einer Geometrie erfasst werden kann.

## 5.2 Theoretische Vorbetrachtungen

Der Messkopf verursacht im Elektrolytbad eine Veränderung der elektrischen Feldverteilung. Diese Veränderung findet hauptsächlich direkt an der Sonde statt, da sich die Feldlinien um die nichtleitenden Bereiche herum ausbilden. Dies ändert auch die Stromdichteverteilung und damit den gemessenen

Ionenstrom, zur Untersuchung dieser Effekte wurde das Bad des Prüfaufbaus mittels FEM-Simulation nachgerechnet und die Stromdichteverläufe an mehreren Stellen ermittelt. Eine schematische Darstellung der gerechneten Geometrie ist in *Abbildung 11* zu sehen, es handelt sich dabei um einen Schnitt durch die Mitte des Messlochs, dessen Achse senkrecht zu den Elektroden ausgerichtet ist. Bei Anode und Kathode handelt es sich um ebene Bleche, welche zum Behälterrand beidseitig einen Abstand von 10 mm haben.

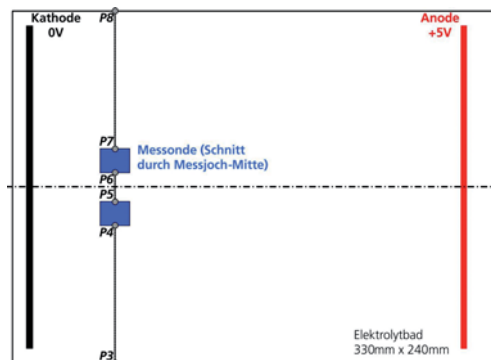


Abb. 11: Berechnungsschema für die Stromdichtesimulation des XY-Prüfstands 30

Durch den nicht leitenden Ring werden die Feldlinien zum einen um die Sonde herum geleitet, zum anderen aber durch das Messloch gezwungen. Es entsteht um den Messkopf herum und in der für die Messung relevanten Bohrung eine Konzentration der Feldlinien und damit auch eine Zunahme des Ionenstroms im Elektrolyten. Bei der simulierten Geometrie (senkrechten Achse zur Elektrode, Abstand der Sonde 40 mm) beträgt die gemessene Stromdichte daher etwa das Doppelte der mittleren Stromdichte, welche sich ohne die Präsenz der Sonde einstellen würde (Abb. 12).

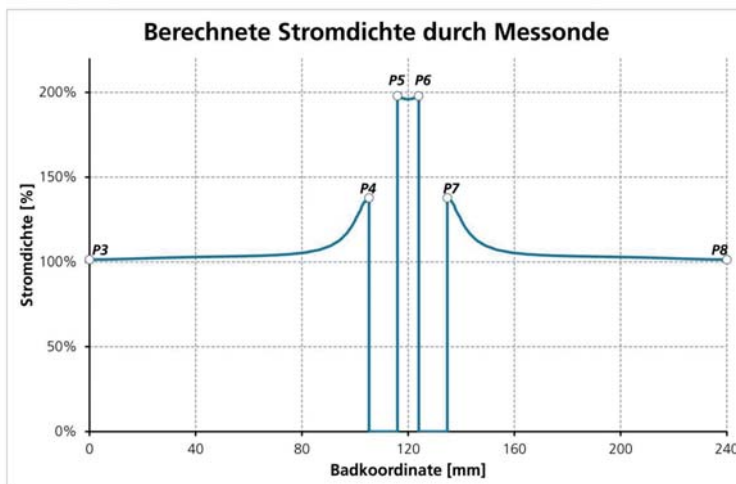


Abb. 12: Berechneter Stromdichteverlauf durch den Messkopf bei ebener Anode und Kathode durch die in *Abbildung 11* bezeichneten Punkte

Die Erhöhung der Stromdichte im Messloch ist dabei jedoch von der Position abhängig, da sich z. B. bei der Verdrehung des Messkopfs auch der Querschnitt ändert, was wiederum den Verlauf der Feldlinien beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass kein allgemein gültiger, präziser Multiplikator zur Kompensation dieses Effekts ermittelt werden kann, die errechnete Verdopplung bietet jedoch einen Anhaltspunkt zur Bewertung des möglichen Bereichs, in dem sich diese Feldlinienänderungen abbilden.

Die Sonde hat durch die Beeinflussung des elektrischen Feldes auch auf die Stromdichteverteilung an Anode und Kathode Auswirkungen, diese sind stark von der Distanz abhängig. Noch nicht detailliert untersucht wurden die Effekte an komplexeren Bauteilen, welche Bohrungen, Nuten oder scharfe Absätze aufweisen.

### 5.3 Labormessungen im Prüfaufbau

Da es sich bei der entwickelten Elektronik um ein komplett neu entwickeltes System handelt, wurden zu Beginn grundlegende Untersuchungen des Messsignals durchgeführt. Hier wurden systematisch verschiedene Parameter variiert, so z. B. die Stromdichte zur Ermittlung der Linearität, die Temperatur des Elektrolyten und auch die Orientierung der Sonde. Ebenfalls wurden die ausgegebenen Messwerte analysiert und die erreichte Qualität und Auflösung ermittelt, im Laufe des geförderten Projekts und nachfolgend wurde das Messgerät kontinuierlich

weiter entwickelt, so konnte beispielsweise ein veräusertes Signal durch Änderungen an der Elektronik in späteren Systemversionen deutlich verbessert werden.

Im ersten Schritt wurden die Linearität und die Temperaturabhängigkeit des Messsystems unter realitätsnahen Bedingungen im Medium geprüft. Hier konnte das aus den Trockenmessungen (Abb. 7) bekannte gute Linearitätsverhalten verifiziert und ein leichter Temperatureinfluss festgestellt werden (Abb. 13), welcher sich bei zunehmendem Strom bzw. höherer Stromdichte in einem sinkenden Messwertausschlag niederschlägt.

Gleichzeitig wurde festgestellt, dass eine um 180° gedrehte Ausrichtung der Sonde den Messwert-Nullpunkt im stromlosen Zustand leicht verschiebt. Bei genauerer Betrachtung wies der Messwert sowohl

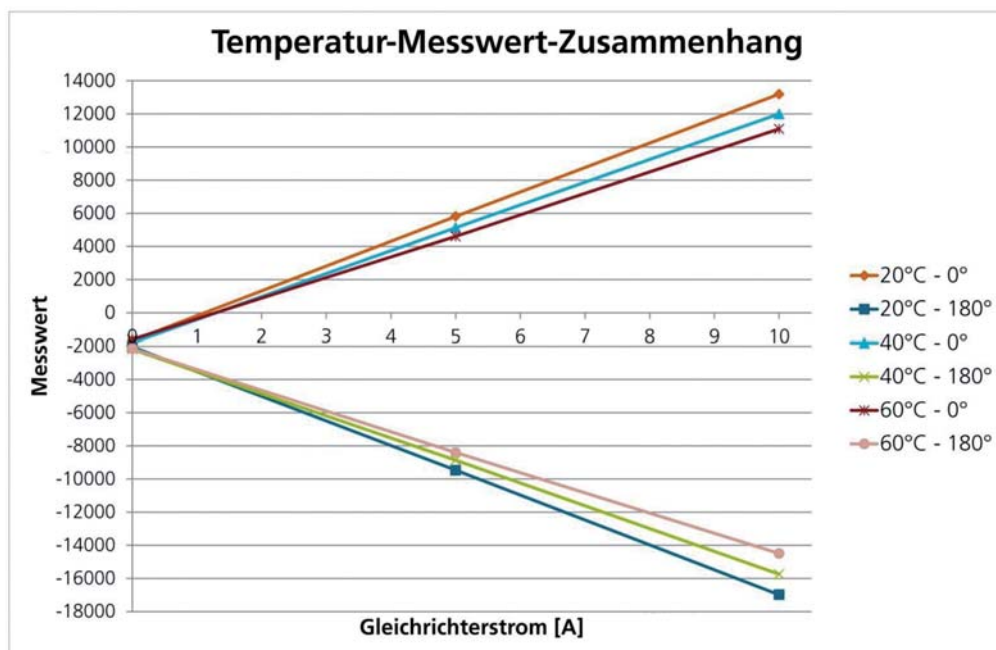


Abb. 13: Messwertverlauf bei unterschiedlichen Temperaturen (20 °C bis 60 °C), Sondenbohrung senkrecht zur Kathode (Winkel 0°) und um 180° gedreht

innerhalb als auch außerhalb des Elektrolytbades eine Ausrichtungsabhängigkeit auf, bei einer vollständigen Drehung um 360° in einer Ebene ist ein sinusähnlicher Verlauf nachzuvollziehen. Die Ursache dieses Effekts sind die in *Abschnitt 4.1* schon erwähnten äußeren (Stör-) Magnetfelder, welche bei elektrischen Geräten in der Umgebung unweigerlich auftreten und durch die hohe Empfindlichkeit der Sonde erfasst werden. Bei einer Messung in einem durch  $\mu$ -Metall geschirmten Bereich konnten folgerichtig keine bzw. nur noch minimale Winkelabhängigkeiten nachgewiesen werden, da eine solche störungsfreie Umgebung jedoch realitätsfern ist, musste das Messsystem diesbezüglich toleranter werden, ohne an Genauigkeit einzubüßen. Durch diverse Maßnahmen wie z.B. eine verbesserte Schirmung der Leitungen konnte der Effekt minimiert werden, in den zukünftigen Ausführungen des Messkopfs wird zur vollständigen Behebung ebenfalls eine Abschirmung integriert.

Im Zuge der Messreihen konnte der GalvanoScanner GS01 intensiv getestet und weiterentwickelt werden, so dass sowohl die Auflösung von  $0,5\text{A}/\text{dm}^2$  als auch der Messbereich bis  $100\text{A}/\text{dm}^2$  in einem für die Galvanotechnik relevanten Bereich realisiert werden

können. Für den Bereich niedriger Stromdichten besteht bei der erzielten Auflösung noch Optimierungsbedarf, für mittlere bis hohe Stromdichten wie z.B. Hartchromprozesse ist der Einsatz uneingeschränkt möglich.

Neben den Untersuchungen zum direkten Verhalten des Messsignals wurden auch erste Stromdichteverlaufsmessungen durchgeführt, um die Stromdichteverteilung im Bad zu ermitteln. Hierbei kam die gebogene Kathodenform zum Einsatz, durch diese Geometrie ist eine zur Mitte bzw. der Winkelspitze hin ansteigende Stromdichte gegeben. Diese Verteilung konnte anhand der Messwerte auch nachvollzogen werden, in *Abbildung 14* ist der Verlauf gut zu erkennen. Wie anhand der Theorie zu erwarten, konnte auch in unterschiedlichen Abständen zur Kathode ein sich verändernder Verlauf nachgewiesen werden, mit zunehmendem Abstand zur Dreiecksspitze ist die Stromdichteerhöhung weniger ausgeprägt.

#### 5.4 Manuelle Messungen im Elektrolytbad

Da in der Praxis im Normalfall keine Einrichtungen zum gezielten Verfahren der Sonde zur Verfügung stehen, ist auch eine manuelle Nutzung der Mess-

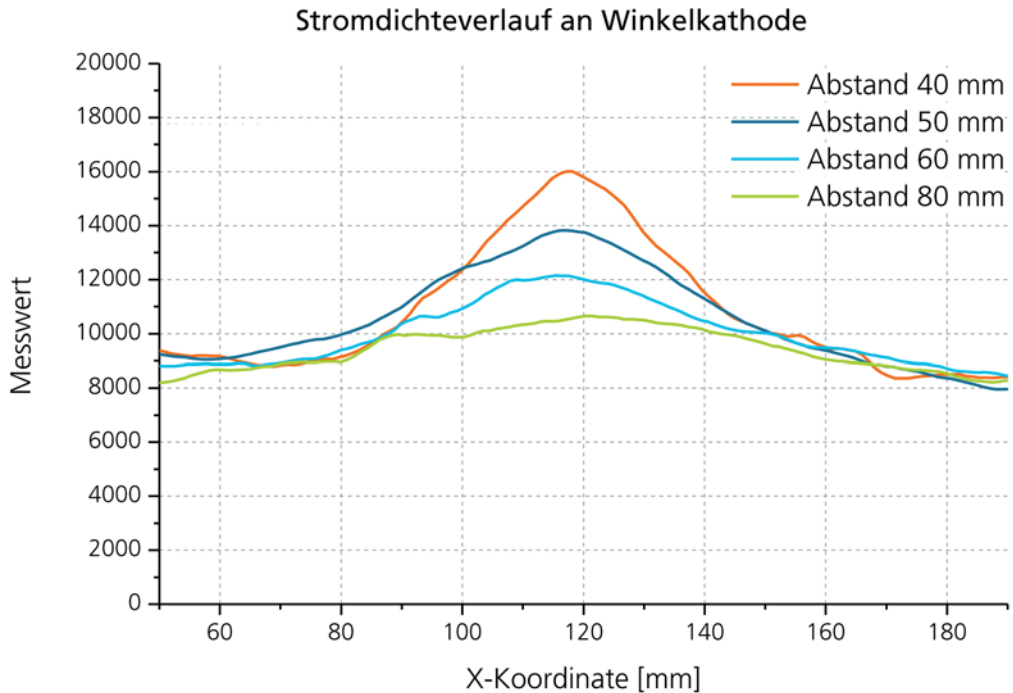


Abb. 14: Messwertverlauf (geglättet) beim Verfahren der Sonde vor einer Konturkathode (gebogenes Blech mit dreieckigem, hervorstehendem Absatz). Die Messungen wurden mit unterschiedlichen Abständen zur Kathode durchgeführt

sonde vorgesehen. Daher wurde im Technikum in einem 60-l-Behälter eine von Hand bewegte Messung ohne PC-basierte Datenerfassung durchgeführt. Im Vergleich zur kontrollierten Umgebung im XY-Prüfstand sind hier einige Abstriche zu machen, ein Hauptunterschied ist eine ungenauere Zuordnung der Sondenposition zum Bauteil und der Anode im Bad, insbesondere in undurchsichtigen Elektrolyten. Durch die händische Führung ist die exakte Position nur durch den Benutzer abzuschätzen, es sind keine konkreten Koordinaten vorhanden, denen ein Messwert zugeordnet werden kann.

Dennoch ist es bei den durchgeführten Messungen gelungen die Kontur des Bauteils, welche als bekannt vorausgesetzt werden kann, anhand der erfassten Messwerte nachzuvollziehen und Bereiche mit höheren oder niedrigeren Stromdichten zu identifizieren.

## 6 Potenziale und Einsatzmöglichkeiten

Mit dem GalvanoScanner steht ein Messsystem zur Verfügung, mit dem in einem realen galvanischen

Elektrolyten die Stromdichte an einem bestimmten Punkt gemessen werden kann. Dadurch lassen sich direkte Rückschlüsse auf die Stromdichteverteilung und damit die Schichtdickenverteilung an einem Bauteil ableiten, mittels eines geeigneten Bewegungssystems lässt sich auch ein kompletter Behälter präzise abtasten.

Die Verwendung des Geräts bietet daher für die praktische Anwendung in Beschichtungsbetrieben verschiedene Nutzwerte sowohl auf Anoden- als auch auf Kathodenseite. So lässt sich über Messungen entlang eines Bauteils direkt die Stromdichte bestimmen, was z. B. bei der Positionierung des Gestells/Bauteils oder dem Setzen von Blenden und Stromfängern ein direktes Feedback erlaubt. Mittels dieser Rückmeldung sind kürzere Einstellzeiten bzw. weniger Einstellteile möglich, wenn eine genaue Schichtdickenverteilung benötigt wird. Die Positionierung von zu beschichteten Teilen und Badeinbauten muss daher nicht mehr nur auf Basis von Erfahrungen oder Simulationsrechnungen mit kostenintensiven Spezialprogrammen erfolgen, sondern werden durch die quantifizierbaren Messungen deutlich erleichtert.

Auf Anodenseite können beispielsweise inaktive Bereiche identifiziert werden, welche durch Kontaktierungsfehler (welche auch bei einer Gestellbelegung möglich sind), passiven Anodenteilen oder ungleichmäßigen Korbfüllungen auftreten können. Dies erleichtert sowohl eine Fehlersuche als auch die routinemäßige Wartung, was eine höhere Verfügbarkeit der Anlage bedeutet.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist auch ein direkter Vergleich von ermittelten Messergebnissen mit der bereits möglichen Simulation der Stromdichte in der Galvanotechnik interessant. Durch das Messsystem können den theoretischen Berechnungen nun reale Messergebnisse gegenüber gestellt werden, eine Verifizierung ist über die indirekte Auswertung der Schichtdicke am Bauteil hinaus möglich.

## 7 Fazit

Mit dem GalvanoScanner ist es gelungen, die Stromdichte in einem galvanischen Elektrolyten bei guter Auflösung messbar zu machen. Durch die Verwendung von chemiebeständigen, in der Galvanotechnik üblichen Werkstoffen ist ein Einsatz in verschiedensten Prozessmedien möglich. Das Gerät ist leicht transportierbar und kann dadurch problemlos in verschiedenen Anlagen oder Anlagenteilen einer Fertigung verwendet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Stromdichte zuverlässig bestimmt werden kann, insbesondere können quantitative Unterschiede entlang eines Bauteils oder einer Anode sichtbar gemacht werden. Um das Potenzial des GalvanoScanners vollumfänglich auszuschöpfen, sind noch weitere detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen notwendig, aber bereits jetzt ist ein praktischer Einsatz z. B. bei der Optimierung einer Stromdichteverteilung mittels Positionierung von Blenden/Stromfängern oder als Hilfsmittel bei der Anlagenwartung und Fehlersuche (z. B. in Bezug auf passive Anoden) möglich.

## 8 Ausblick

Um das Messsystem GalvanoScanner GS01 auch der Allgemeinheit zugänglich zu machen, erfolgt die Fertigung einer ersten Serie für eine manuelle Hand-

habung. Parallel sind weitere Arbeiten zur Untersuchung des Messverhaltens geplant, speziell des Verhaltens an kleineren, komplexen Geometrieformen. Durch die gewünschte enge Zusammenarbeit mit den Anwendern und den dadurch erfolgenden weiteren Erfahrungsaufbau können sicher vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der Galvanikindustrie umgesetzt werden.

Zur Weiterentwicklung des Messsystems ist in der Zukunft ein Anschlussprojekt geplant, hier sollen u. a. weitere Verbesserungen zur Messsignalauflösung und ein kleinerer Messkopfaufbau realisiert werden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R043 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Literatur

- [1] Schutzrecht US 2,802,182 (6.8.1957). Fox Products Company. Current Density Responsive Apparatus
- [2] Schutzrecht DE 3631 476 A1 (22.10.1987). Siemens AG. Vorrichtung zur Bestimmung der Ionen-Stromdichte in elektrolytischen Bädern.
- [3a] Gemmler, A.; Bui-Brackmann, L.; Bolch, T.; Mertz, K.: Halbleitersensor zur Messung von örtlichen Stromdichten, Teil 1. In: Metalloberfläche 42 (1988), Nr. 1, S. 23-25
- [3b] Gemmler, A.; Bui-Brackmann, L.; Bolch, T.; Mertz, K.: Halbleitersensor zur Messung von örtlichen Stromdichten, Teil 2. In: Metalloberfläche 42 (1988), Nr. 3, S. 121-126
- [3c] Gemmler, A.; Bui-Brackmann, L.; Bolch, T.; Mertz, K.: Halbleitersensor zur Messung von örtlichen Stromdichten, Teil 3. In: Metalloberfläche 42 (1988), Nr. 4, S. 205-207
- [4] Schutzrecht DE 298 17 052 U1 (4.2.1999). Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V. Meinsberg. Vorrichtung zur Bestimmung der lokalen Stromdichte in Elektrolytlösungen.
- [5] Schutzrecht DE 20 2007 025 737 U1 (27.03.2008). Mahdjour, Dr. Hooshiar. Anordnung zur Echtzeitmessung der Stromdichte in einem Elektrolytbad
- [6] Rogowski, W.; Steinhaus, W.: Die Messung der magnetischen Spannung. In: Archiv für Elektrotechnik 1 (1912), Nr. 4, S. 141–150 DOI 10.1007/BF01656479
- [7] Lemme, H.: Sensoren in der Praxis. München: Franzis, 1990, Kap. 6.5.
- [8] Schutzrecht DE 36 13 991 A1 (11.09.1986). Zeller, Karl-Heinz. Gleichstrommesswandler insbesondere für kleine Messströme.
- [9] Schutzrecht WO 2007/005578 A1 (11.01.2007). Honeywell International Inc. Current Sensor with Magnetic Toroid Single Frequency Detection Scheme.
- [10] Schutzrecht DE 198 44 729 A1 (16.12.1999). Vacuumschmelze GmbH. Stromsensor.
- [11] Schutzrecht WO 2006/093724 A1 (8.9.2006). Honeywell International Inc. Current Sensor with Magnetic Toroid.