

F/E-Projekt zur Entwicklung einer industriefesten, modularen Prozess- Mikrowellenscannerbaureihe

Inhaltsverzeichnis
Verzeichnis von Bildern und Tabellen
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen
Zusammenfassung

Einleitung
Hauptteil
Fazit

Literaturverzeichnis
Anhänge
Rückendeckel

Einleitung

Ziel des beantragten Projektes war die anwendungsbezogene Entwicklung und praktische Erprobung von stationären Prozess-Mikrowellenscannern und leistungsverbesserten Scannermodulen für die kontinuierliche, zerstörungsfreie und berührungslose Überwachung physikalischer Materialeigenschaften in unterschiedlichen material- und energieintensiven Produktionsprozessen. Vorteile der Mikrowellen bei der Feuchtemessung gegenüber herkömmlichen Verfahren liegen in der Vergleichbarkeit der Feuchteverteilung an Oberfläche und Volumen und der hohen Messgenauigkeit in Echtzeit. Risiken der Entwicklung lagen in der Einkopplung der Mikrowellen ins Material.

In einer ersten Phase wurde die technologische Basisplattform von Scannermodulen für unterschiedliche Anforderungsprofile im Labormaßstab entwickelt. Mit einer Reihe von Scannerkonfigurationen wurden Untersuchungen zur prinzipiellen Lösbarkeit konkreter Aufgabenstellungen durchgeführt. Erste Prototypen wurden in ihrer technischen Funktionsfähigkeit erprobt.

Mit dem in verschiedenen Ansätzen entwickelten Mikrowellenscanner-Baukastensystem wird die Präzision und Standardisierbarkeit der Messungen für Prozessanwendungen erhöht. Neue Anwendungsfelder des physikalischen Mikrowellen-Messprinzips in vielen Branchen werden möglich. Besonders in energieintensiven Trocknungsprozessen lassen sich Trocknungsverläufe über die Zeit kontinuierlich erfassen. Daraus resultiert erhebliches Optimierungspotenzial für die Produktqualität bei gleichzeitig verringertem spezifischen Energieverbrauch in industriellen Prozessen.

Mikrowellen durchdringen nicht leitende Materialien und sind damit prinzipiell für deren zerstörungsfreie Prüfung und die Messung von Stoffeigenschaften gut geeignet. Durch die Wechselwirkung mit den magnetischen und elektrischen Eigenschaften der durchstrahlten Materialien lassen sich unterschiedliche dielektrische Parameter der Festkörper detektieren. Mikrowellensensoren können mit diesem dielektrischen Messprinzip zerstörungsfrei physikalische Eigenschaften wie Feuchte, Dichte oder Materialstruktur erfassen. Bisher werden Mikrowellensonden zur Feuchtemessung hauptsächlich als portable Rasterfeuchtemessgeräte sowie als einfache wie auch komplexe Prozessmessgeräte für punktweise Messungen oder als schnelle Tischgeräte eingesetzt.

Mikrowellenscanner sind hingegen scannende Mehrsondensysteme, die nach dem Prinzip von Sensorzeilen oder Sensorarrays auch berührungslos arbeiten können.

Im Vergleich zu anderen Messverfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfung (optische, infraroptische, Ultraschall-, Röntgen-, radiologische, NMR- und Radarverfahren) haben scannende Mikrowellen-Messverfahren viele technische Vorteile. Vor Beginn des Entwicklungsprojekts wies diese Technologie wegen ihrer Neuheit aber generell noch einen niedrigeren technischen Entwicklungsstand auf. Dieser wurde durch die Ergebnisse des Entwicklungsprojekts deutlich angehoben.

Für die kontinuierliche flächenhafte Überwachung von Materialkenngrößen in laufenden Produktionsprozessen, z. B. die Erfassung der Materialfeuchteverteilung, von Materialinhomogenitäten oder von Leckagen in geschlossenen Verpackungen konnten für eine Reihe von Anwendungen im Rahmen des durchgeführten Entwicklungsprojekts bessere technische und wirtschaftliche Lösungen gefunden werden. Der angestrebte Preiskorridor für die Realisierung derartiger Scanneranordnungen in einer Größenordnung von 15 bis 50 T€ je nach Anwendung und Messaufgabe kann als realistisch betrachtet werden.

Gegenüber den vor dem Projekt verfügbaren Mikrowellen-Messsystemen konnten für den neuen Ansatz eines Baukastens zur Realisierung von Mikrowellenscannern eine Reihe technisch vorteilhafter Eigenschaften realisiert werden:

- Hohe Abtastraten für den Einsatz in schnell laufenden Prozessen
- Hohe Ortsauflösung für die Detektion kleiner Störungen
- Einkopplung in nicht planare Geometrien möglich
- Messung gegen metallische Reflektoren oder Transportbänder möglich
- Geringe Nachbarkanalstörung bei geometrisch dichten Anordnungen
- Hohe Schutzgrade möglich, dadurch gute Umweltbeständigkeit
- Nutzung komplexer statistischer Auswertalgorithmen
- Einsatz einfacher Bildverarbeitungsoperationen möglich
- Feuchtemessung mit hoher Genauigkeit ist je nach Anwendung möglich
- Rückführung auf standardisierte Kalibriernormale
- Vergrößerter Temperaturbereich von 0 – 70 °C Umgebungstemperatur im Betrieb
- Integrierte Temperaturkompensation ist verfügbar.

Während des Entwicklungsprojekts waren folgende wesentliche technische Probleme und Aufgabenstellungen zu lösen:

- Einkopplung der Mikrowellen ins Material in unterschiedlichen Geometrien
- Erhöhung der Mess- und Abtastraten für den Einsatz in schnelleren Prozessen
- Erhöhung der Ortsauflösung durch schnellere Messungen
- Erhöhung der Ortsauflösung durch verbesserte Ausprägung des Mikrowellenfeldes
- Rückführung der Kalibrierung auf langzeitstabile Standards
- Möglichst echtzeitfähige Auswertung der im Prozess gewonnenen Scandaten

Die Zielstellung des durchgeführten Projekts war die anwendungsbezogene Entwicklung und praktische Erprobung von stationären Prozess-Mikrowellenscannern und leistungsverbesserten Scannermodulen für die kontinuierliche, zerstörungsfreie und berührungslose Überwachung physikalischer Materialeigenschaften, in material- und energieintensiven Produktionsprozessen.

Im Projekt sollten prozesstaugliche Mikrowellenscanner-Module mit größerer geometrischer Flexibilität entwickelt werden, die als Baukastensystem für vielfältige standardisierte Anwendungen einsetzbar sind.

Die neuen Mikrowellenscanner-Module sollten auf Feuchte kalibrierbar sein. Sie sollten größeren Temperaturbereichen und chemisch aggressiven Atmosphären ausgesetzt werden können. Die Abtastrate sollte gegenüber dem Stand der Technik deutlich erhöht werden. Weiter sollten Maßnahmen zur Vermeidung von Interferenzen zwischen einzelnen Sensoren realisiert werden. Für die Auswertung der Scandaten sollten Methoden der Bildverarbeitung genutzt werden. Die geplanten Scannermodule und –Lösungen weisen ein wesentlich höheres Integrationsniveau auf als alle bisherigen Entwicklungen und Produkte der hf sensor GmbH.

Diese neue Familie von prozesstauglichen Mikrowellen-Scannermodulen sollte im Vergleich zu bisherigen Produktentwicklungen die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten generellen technischen Eigenschaften und Parameter aufweisen:

	Prozessscanner Insellösung IST	Prozessscanner Baukasten PLAN
Abtastrate Einzelsensor	10 msec	< 1 msec
Abtastrate frame	96 msec	< 10 msec
Einkopplung	<ul style="list-style-type: none"> - nur einfache planare Geometrien - keine metallischen Reflektoren 	<ul style="list-style-type: none"> - Einkopplung gegen metallische Transportbänder - komplexere Geometrien mit welligen / gewölbten / unregelmäßigen Oberflächen
Ortsauflösung	8 cm	< 1 cm
Nachbarkanalstörung	hoch	gering (< - 26 dB)
Integrationsgrad	<ul style="list-style-type: none"> - manuelle Lösungen - einfache automatische Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> - automatisierte Systeme, vor allem in Bezug auf Kalibration - Flexible Zeilengeometrie - Sensoren verschiedenen Typs für unterschiedliche Eindringtiefen in einer Zeile
Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> - einfache Schwellwertdetektion 	<ul style="list-style-type: none"> - komplexe Auswertealgorithmen der Mikrowellenparameter - Statistische Methoden als Echtzeit-Filter - Einfache Bildverarbeitungsoperationen
Feuchtemessung	<ul style="list-style-type: none"> - nicht möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - mit hoher Genauigkeit, diese ist material- und anwendungsabhängig, daher keine allgemeine Angabe möglich (Gleichlauf Sensoren muss hierfür sehr gut sein, Abweichung untereinander < 0,2 % angestrebt)
Temperaturbereich	<ul style="list-style-type: none"> - niedrig (15°C – 40°C) - hoher Temperatureinfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - hoch (0°C – 70°C) - niedriger Temperatureinfluss
Schutzgrad / Robustheit	<ul style="list-style-type: none"> - niedrig (< IP40) 	<ul style="list-style-type: none"> - hoch (IP 67)
Bildauswertung / Lage + Position von Störungen	<ul style="list-style-type: none"> - nicht möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - 2D-Zuordnung / Lokalisierung - Zuordnung zu Tiefenzonen

Tab. 1 Mikrowellenscanner-Baukasten - Vergleich Ist-Stand mit geplanten Eigenschaften

Eine Quantifizierung der angestrebten Zielparameter war noch nicht für alle Parameter möglich, da es sich bei den geplanten Mikrowellenscanner-Modulen um eine insgesamt neue Gerätekategorie handelt. Aussagen zum Integrationsgrad und zur Komplexität ergeben sich

aus der Konzeptionsphase für den jeweiligen Modultyp. Auswahl und Umsetzung verschiedener Auswertelgorithmen hängen stark von den jeweiligen Anwendungen ab. Im Projekt ist vorgesehen, für die beschriebenen Anwendungen einen Grundstock an prozesstauglichen Algorithmen zu entwickeln.

Zur Erreichung der technischen Zielstellungen war vorgesehen, die vorhandene technologische Basis-Plattform deutlich zu erweitern, die bisher nur für einen speziellen Einsatzfall in planaren Mineralwollbahnen bestimmter Dicke ausgelegt ist.

Für die Erweiterung der technologischen Basis-Plattform der Prozess-Mikrowellenscanner waren zunächst Vorbetrachtungen zur Erarbeitung von Detailkonzepten für verschiedene Bauformen und die Ermittlung notwendiger Bauteile, Komponenten und Zukaufteile notwendig. Ein weiterer Projektbestandteil war die mechanische Konstruktion und anschließende Realisierung der verschiedenen Scannergeometrien. Zu den konstruktiven Arbeiten gehört die Auslegung für höhere Temperaturen und aggressive Umgebungsbedingungen.

Entwicklungsarbeiten zur Scannerelektronik, zur Erhöhung der Abtastraten und zur Reduzierung der Störungen einzelner Kanäle untereinander waren durchzuführen. Eine Reduzierung der Nachbarkanalstörung auf < -26 dB sollte durch eine starke Erhöhung der Messgeschwindigkeit und abschaltbare Sensoren erreicht werden. Hierfür war eine Neuentwicklung der digitalen Hardwareplattform sowie der entsprechenden firmware notwendig. Dazu gehörte der Austausch der bisherigen Mikrocontroller gegen schnellere Typen mit umfangreicheren Ressourcen. Ebenso werden an die Verarbeitung der aufzunehmenden Echtzeitdaten und die Schnittstellen deutlich höhere Anforderungen gestellt als bisher. Dies musste Berücksichtigung in der Hardware wie auch in der firmware finden. Es waren genügend Reserven für Nachfolgeentwicklungen vorzusehen. Für die einzelnen Anwendungen sollten feldtaugliche Aufbauten entwickelt und realisiert werden.

Bei der Software zur Auswertung und Verarbeitung der Scandaten von kontinuierlich aufgenommenen Mikrowellenscans existierten nur rudimentäre Ansätze, die außerdem auch nur offline funktionieren. Diese waren im Rahmen des Vorhabens auf die geplanten höheren Abtastraten anzupassen. Falls möglich, sollten Auswertelgorithmen für eine Online-Auswertung entwickelt werden. Weiter war vorgesehen, Algorithmen und Methoden aus der Bildverarbeitung zu integrieren. Aus den aufgenommenen Scandaten sollen auch determinierte Parameter wie der Feuchtegehalt entnommen werden können.

Ein weiterer wesentlicher Arbeitsschritt beinhaltete die Kalibration der Mikrowellenscanner und die Erarbeitung entsprechender Kalibrierroutinen und -abläufe sowie einer entsprechenden Kalibriersoftware, die diese Vorgänge abbildet. Dabei waren auch die Auswirkungen technologischer Schwankungen z. B. bei einzelnen Sensoren und deren Eindämmung zu berücksichtigen.

Umfangreiche applikative Untersuchungen zu den einzelnen geplanten Anwendungen umfassten die Einkopplung und Wellenausbreitung in verschiedenen Messanordnungen und Geometrien von Messobjekten. Falls möglich, sollten in Rückkopplung mit der Softwareentwicklung auch Lösungen zur Detektion von Stoffeigenschaften in unregelmäßigen Geometrien angestrebt werden.

In der ersten Phase sollte die technologische Basisplattform von Scannermodulen für unterschiedliche Anforderungsprofile im Labormaßstab entwickelt und erprobt werden.

Hauptteil

A) Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Im Projektverlauf wurden folgende Arbeitsschritte umgesetzt

1 Voruntersuchungen / Konzeptionelle Arbeiten

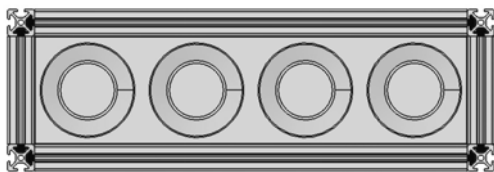
Zur Erweiterung der technologischen Basis-Plattform von Prozess-Mikrowellenscannern wurden Vorbetrachtungen angestellt, die die Erarbeitung von Detailkonzepten für verschiedene Bauformen und die Ermittlung notwendiger Bauteile, Komponenten und Zukaufteile umfassten.

1.1 Erarbeitung von Basiskonzepten für verschiedene Modulgeometrien

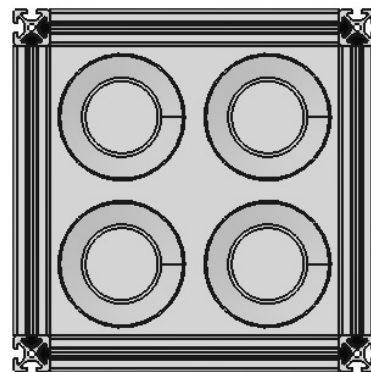
In diesem Arbeitsschritt wurden verschiedene Basiskonzepte zur Realisierung unterschiedlicher Geometrien von Scannermodulen wie

- Planare Kompaktmodule mit verschiedenen Sensoranordnungen
- Scanneranordnungen aus verteilten Sensoren
- Scannermodule für runde Geometrien

erarbeitet. Eine grobe Einschätzung möglicher Aufbauten und dafür notwendiger Komponenten und Bestandteile wurde vorgenommen. Dabei wurden die vorgesehenen höheren Abstraten und die erhöhte Stabilität und Robustheit gegenüber Umgebungseinflüssen berücksichtigt.



Kompaktmodul in Zeilenanordnung 1 x 4



Kompaktmodul als Array 2 x 2

Abb. 1 Beispiele für Konzepte planarer Kompaktmodule mit verschiedenen Sensoranordnungen

1.2 Konzeptionelle Vorbetrachtungen zur Datenauswertung

Für die geplanten Bauweisen von Scannermodulen wurden grundlegende Konzepte der Datenauswertung erarbeitet. Die Auswertung von an nicht ebenen Geometrien

aufgenommenen Scandaten folgt dabei einem gegenüber planaren Geometrien anderen Ansatz und benötigt andere Voraussetzungen. Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden auch konzeptionelle Arbeiten zur Erhöhung der Abtastrate und zur Einbeziehung von Algorithmen aus der Bildverarbeitung durchgeführt.

1.3 Hardwarekonzept für höhere Abtastraten

Um höhere Abtastraten zu erreichen, wurde ein neues Konzept der digitalen Hardware erarbeitet, das den neuen Anforderungen Rechnung trägt. Dieses ist bereits für noch schnellere Scanvorgänge ausgelegt. Es erfolgte die Erhöhung der Abtastrate der Einzelsensoren durch neue Hardwarelösungen. Im schnellsten Messmodus haben die Sensoren eine Abtastrate von 0,2 ms und erfüllen damit die geplante Vorgabe. Auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Steuereinheit wurde erhöht. Sie passt sich der erhöhten Messrate der Sensoren an.

2 Mechanische Konstruktion und Realisierung verschiedener Scannergeometrien

Ausgehend von den Basiskonzepten wurden Scanneranordnungen bzw. Scannermodule für verschiedene Anwendungsbereiche entworfen und realisiert. Dazu gehören

- Planare Kompaktmodule mit verschiedenen Sensoranordnungen
- Scanneranordnungen aus verteilten Sensoren
- Scannermodule für runde Geometrien

Diese wurden für den Einsatz im industriellen Umfeld ausgelegt. In die Konzeptionen und deren Umsetzung wurden die dort stehenden Anforderungen in Bezug auf robuste Ausführung, Schutz vor Staub und Flüssigkeiten sowie gute Handhabbarkeit und Wartbarkeit einzubezogen. Zu den konstruktiven Arbeiten gehört auch die Auslegung für höhere Temperaturen und aggressivere Umgebungsbedingungen bzw. für den Außeneinsatz.

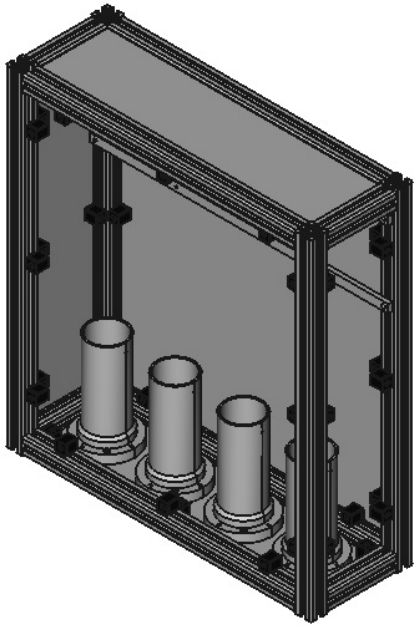
Im Ergebnis stehen Einzelsensoren und Scannermodule zur Verfügung, die Anforderungen bis zu Schutzgrad IP68 erfüllen und im Temperaturbereich 0 – 70 °C betrieben werden können.

2.1 Design, Konstruktion und Realisierung von planaren Kompaktmodulen

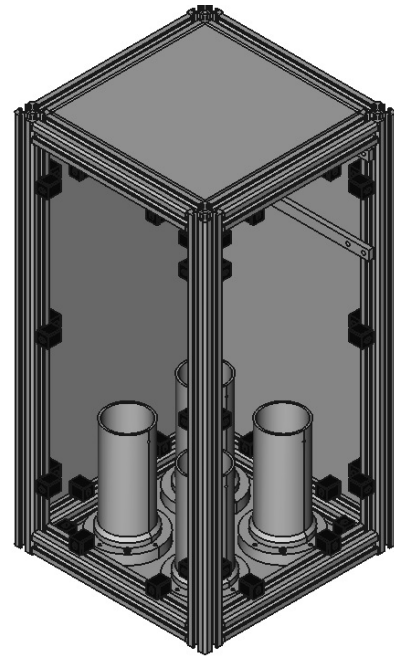
Ausgehend von den konzeptionellen Betrachtungen wurden planare Kompaktmodule konstruiert, die verschiedene Sensoranordnungen aufnehmen können:

- i. eine Anordnung mehrerer Sensoren gleichen Typs in einer Zeile (skalierbar)
- ii. eine Anordnung mehrerer Sensoren von bis zu 3 verschiedenen Typen in bis zu 3 Zeilen
- iii. Anordnungen mehrerer Sensoren gleichen Typs in einem Array

Neben den bereits genannten allgemeinen Anforderungen bezüglich mechanischer Robustheit und möglichst hoher Schutzgrade wurden die Kompaktmodule so ausgelegt, dass sie auch im Temperaturbereich 0 – 70°C eingesetzt werden können.



Kompaktmodul in Zeilenanordnung 1 x 4



Kompaktmodul als Array 2 x 2

Abb. 2 Konstruktion planarer Kompaktmodule mit verschiedenen Sensoranordnungen

2.2 Design, Konstruktion und Realisierung von Scannern aus Einzelsensoren

Kompakte Scannermodule enthalten im Modulgehäuse bereits auch eine Datenvorverarbeitung über eine geeignete Steuereinheit sowie die Stromversorgung und notwendige periphere Elektrik. Der Einsatz solcher Kompaktmodule ist aber in Anwendungen mit größeren geometrischen Dimensionen nicht sinnvoll oder nicht möglich. Dazu zählen z.B. Bandtrockner mit Querabmessungen von mehreren Metern. In derartigen Anwendungen werden außerdem nicht so viele Einzelsensoren benötigt wie z.B. für die Untersuchung laufender Materialbahnen auf Störstellen.

Daher unterscheidet sich die Einsatzgeometrie für Anwendungen in Trocknern von der für Untersuchungen auf Störstellen. Die Einzelsensoren haben einen größeren Abstand untereinander, müssen aber so ausgeführt werden, dass sie gegenüber den oftmals harten Umgebungsbedingungen in Trocknern gut geschützt sind. Wichtig ist auch ein exakter Gleichlauf der Sensoren, eine Eigenschaft, die sich aufgrund von Fertigungstoleranzen bisher nicht ohne Weiteres sicherstellen lässt.

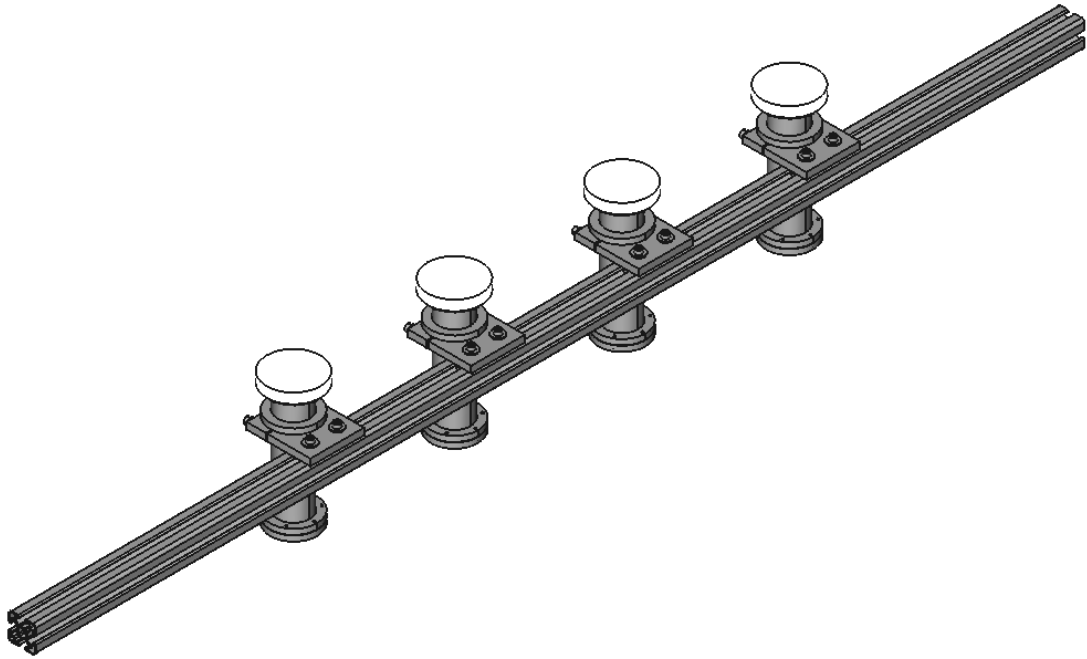


Abb. 3 Konzept eines Zeilenscanners aus Einzelsensoren für den Einsatz an einem Bandrockner

Dabei waren auch Reinigungs- und Spülprozesse zu berücksichtigen. Weiter war zu beachten, dass man im laufenden Betrieb des Trockners nicht mehr an die Sensoren herankommt und daher Nachjustierungen z.B. der Sensorposition nicht mehr möglich sind. Daher mussten für die Befestigung der Sensoren geeignete Träger- und Befestigungselemente vorgesehen werden, die alle Verkabelungen und Schutzvorrichtungen aufnehmen können.

Scanneranordnungen aus verteilten Sensoren (4 Sensoren, Mittelwertbildung, Kompensation von Abstands, und Temperatureinflüssen) für den Einsatz in Bandrocknern in der chemischen Industrie wurden prototypisch realisiert. Die Ausführung der Sensoren erfolgte komplett in Edelstahl mit Schutzgrad IP68, im Temperaturbereich 0 – 70°C und mit Auslegung für den Ex-Bereich. Im folgenden wird diese Scanneranordnung beispielhaft beschrieben:

Die Scanneranordnung erfasst die Feuchteverteilung im oder am Messobjekt auf einer vorher zu definierenden Fläche bzw. in einer zeilenähnlichen Anordnung, über die das Messobjekt bewegt wird. Zur möglichst einfachen Einbringung in den Trockner sowie zur Erleichterung der Wartung wurden daher die Sensoren an einem Querträger montiert, der auch die Verkabelung aufnimmt. Sämtliche Anschlüsse wurden nach außen gezogen und in einem für Ex-Anwendungen geeigneten Schaltschrank untergebracht.

Die Messaufgabe der Feuchtebestimmung im Produktkuchen auf dem Bandrockner wird konzeptionell wie folgt gelöst: Das Mikrowellenscannermodul nimmt die Feuchte in mehreren Spuren auf und liefert diese entweder als Einzelwerte oder als Mittelwert an die übergeordnete Steuerung (z.B. SPS). Auf Wunsch kann ein Industrie-PC hinzugefügt werden, auf dem Anzeige und Aufzeichnung erfolgen. Der Einfluss der Temperatur des Produkts wird mit einem Infrarot-Temperatursensor kompensiert. Ein Abstandssensor dient der Kompensation der Produkthöhe bzw. -beladung auf dem Band. Die Feuchtesignale sowie ggf. das Temperatur- und das Abstandssignal können über Stromschnittstellen (4 – 20 mA) oder über ProfibusDP in die übergeordnete Steuerung eingespeist werden.

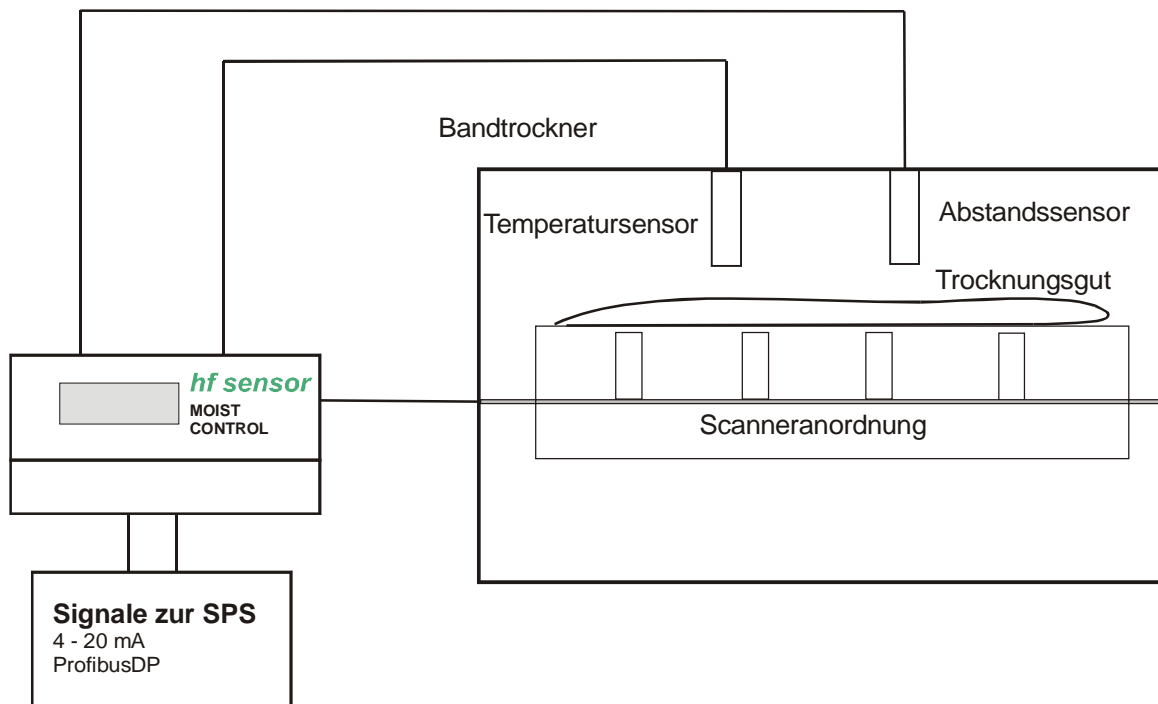


Abb. 4 Konzept eines Zeilenscanners aus Einzelsensoren für den Einsatz an einem Bandrockner

Weitere Konzepte für den Einsatz in Bandrocknern – hier zur Messung gegen metallische Bänder und gegen darunter befindliche Reflektoren – wurden erarbeitet und werden in der Arbeitsetappe 5 beschrieben.

2.3 Design, Konstruktion und Realisierung von hochauflösenden Scanneranordnungen

Der Arbeitsschritt beinhaltet Design und Konstruktion von hochauflösenden Scanneranordnungen z.B. für die Detektion von Flüssigkeitsleckagen in Umverpackungen aus Karton sowie in Paketen. Hierfür wurden Anordnungen von Mikrowellensensoren zu Zeilen oder Arrays untersucht.

Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf möglichst hoher Abtastrate, hoher Ortsauflösung und möglichst niedrigen Interferenzen zwischen benachbarten Sensoren.

Die prinzipielle Scanneranordnung ist in den nachfolgenden Bildern dargestellt.

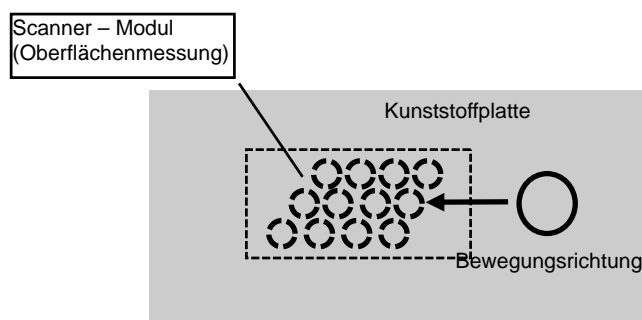


Abb. 5 Mikrowellenscannermodul mit Oberflächensensoren – Draufsicht auf Bahn

Alle 12 Sensoren werden in ein gemeinsames Gehäuse eingebracht. Dieses Gehäuse hat Maße von rund 500 mm × 150 mm × 200 mm und enthält neben der Mikrowellen-Elektronik und der Steuerung für die einzelnen Messeinheiten eine zentrale Steuereinheit für die Datenakquisition und die Stromversorgung.

Die Daten der einzelnen Sensoren werden von der im Gehäuse integrierten Steuereinheit aufgenommen und z.B. an einen Industrie-PC übergeben. Diese Baugruppe sorgt auch für den Ablauf eines bestimmten Messregimes wie z.B. der Erkennung und Ausblendung gefüllter Flaschen, die nicht detektiert werden sollen.

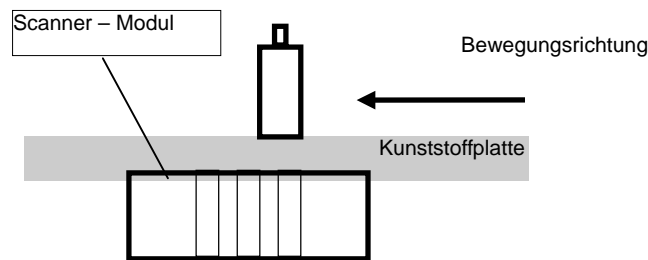


Abb. 6 Anordnung Scannermodul – Seitenansicht

Die Erkennung von Leckagen kann z.B. über die Auswertung statistischer Parameter wie der Standardabweichung der Scanbilder erfolgen: Die normale Verteilung der Messwerte einer Umverpackung ohne Karton liefert eine durchschnittliche Standardabweichung als „Gut“-Wert. Eine höhere Standardabweichung – entsprechend einer höheren Schwankung der Messerte im Scan-Image – weist auf eine Verunreinigung oder Leckage hin.

3 Digitalelektronik und feldtauglicher Aufbau

Die angestrebten Zielparameter der Mikrowellenscanner wie höhere Abtastraten und Verarbeitungsgeschwindigkeiten sind nur mit einer deutlich leistungsfähigeren Scannerelektronik möglich. Daher mussten Entwicklungsarbeiten zur Scannerelektronik, zur Erhöhung der Abtastraten und zur Reduzierung der Störungen einzelner Kanäle untereinander durchgeführt werden. Weiter war eine Neuentwicklung der digitalen Hardwareplattform sowie der entsprechenden firmware notwendig. Hierzu gehört der Austausch der bisherigen Mikrocontroller gegen schnellere Typen mit umfangreicheren Ressourcen. Die neue Hardwareplattform erfüllt deutlich höhere Anforderungen an die Verarbeitung der aufzunehmenden Echtzeitdaten und die Schnittstellen gestellt als vorherige Gerätegenerationen.

Ebenfalls Bestandteil dieses Arbeitspakets war die Konstruktion und Umsetzung eines feldtauglichen Aufbaus. Dabei wurden Anforderungen wie Temperaturbeständigkeit, Resistenz gegen chemische Einflüsse, Explosionsschutz und Selbstdiagnose berücksichtigt.

3.1 Digitale Hardware-Plattform zur schnelleren Signalverarbeitung

Zur Erreichung höherer Abtastraten wurde eine neue Steuereinheit entwickelt, die vor allem der Forderung nach schnellerer Signalverarbeitung genügt. Hierfür wurden die bisher genutzten 16-Bit Prozessoren durch eine 32-Bit-ARM-Architektur mit mind. 50 MHz ersetzt. Auf einen DSP wurde verzichtet. Weiter wurden digitale Schnittstellen wie Profibus DP und Profinet implementiert, die den Anforderungen im industriellen Umfeld genügen.

Dazu wurde zunächst ein neues Platinenlayout entworfen, das die Anbindung der verschiedenen Komponenten zum Test ermöglicht. Es umfasst weiter eine 1,8 V-Schiene für den ARM-Prozessor, schnellere und industriekonforme Schnittstellen-Bausteine sowie auch die Stromversorgung.

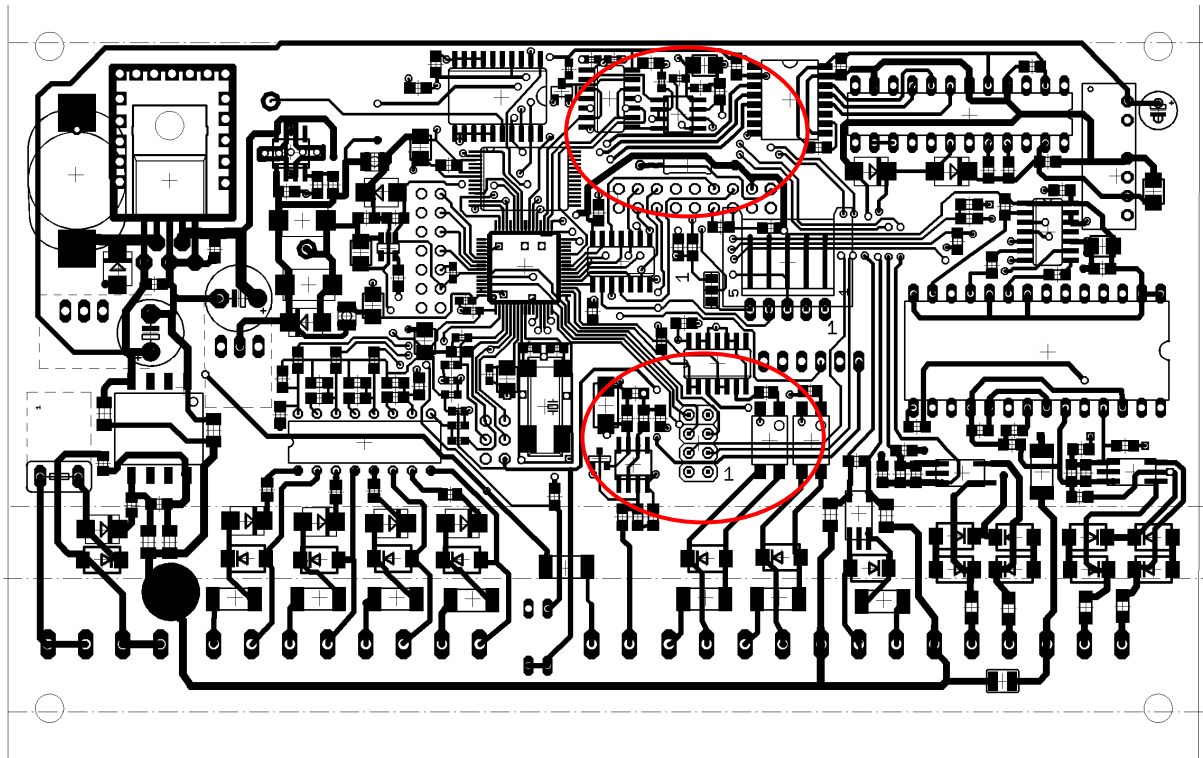


Abb. 7 Hardwareerweiterungen an der Steuereinheit

Die Baugruppe wurde um ein serielles FIFO-SRAM erweitert, um die benötigten schnellen Datenraten in Form eines Messbursts zu gewähren. Der IPC fordert eine Messung an, die Steuereinheit triggert abwechselnd die Sensoren und speichert die gemessenen Werte im SRAM. Nach Abschluss des Messbursts werden die Daten an den IPC geliefert..

3.2 Firmware

Die Auswertung der Messdaten der einzelnen Sensoren erfolgt in einer Vorverarbeitungsstufe in der Steuereinheit. Diese liefert der jeweiligen Scannergeometrie angepasste Datenformate in einem normierten und protokollierten Datenstrom. Zur Erhöhung der Scangeschwindigkeit werden dabei möglichst viele Vorverarbeitungsstufen schon in einer oder mehreren gestaffelten Steuereinheiten realisiert.

Dieses neue Konzept der Signalauswertung machte es notwendig, auch die firmware zum Betrieb der Scanneranordnungen erheblichen Veränderungen zu unterziehen bzw. in weiten Teilen neu zu entwickeln. Dabei wurden auch Schnittstellen zu in der Industrie üblichen Feldbussystemen wie Profibus DP oder Profinet implementiert.

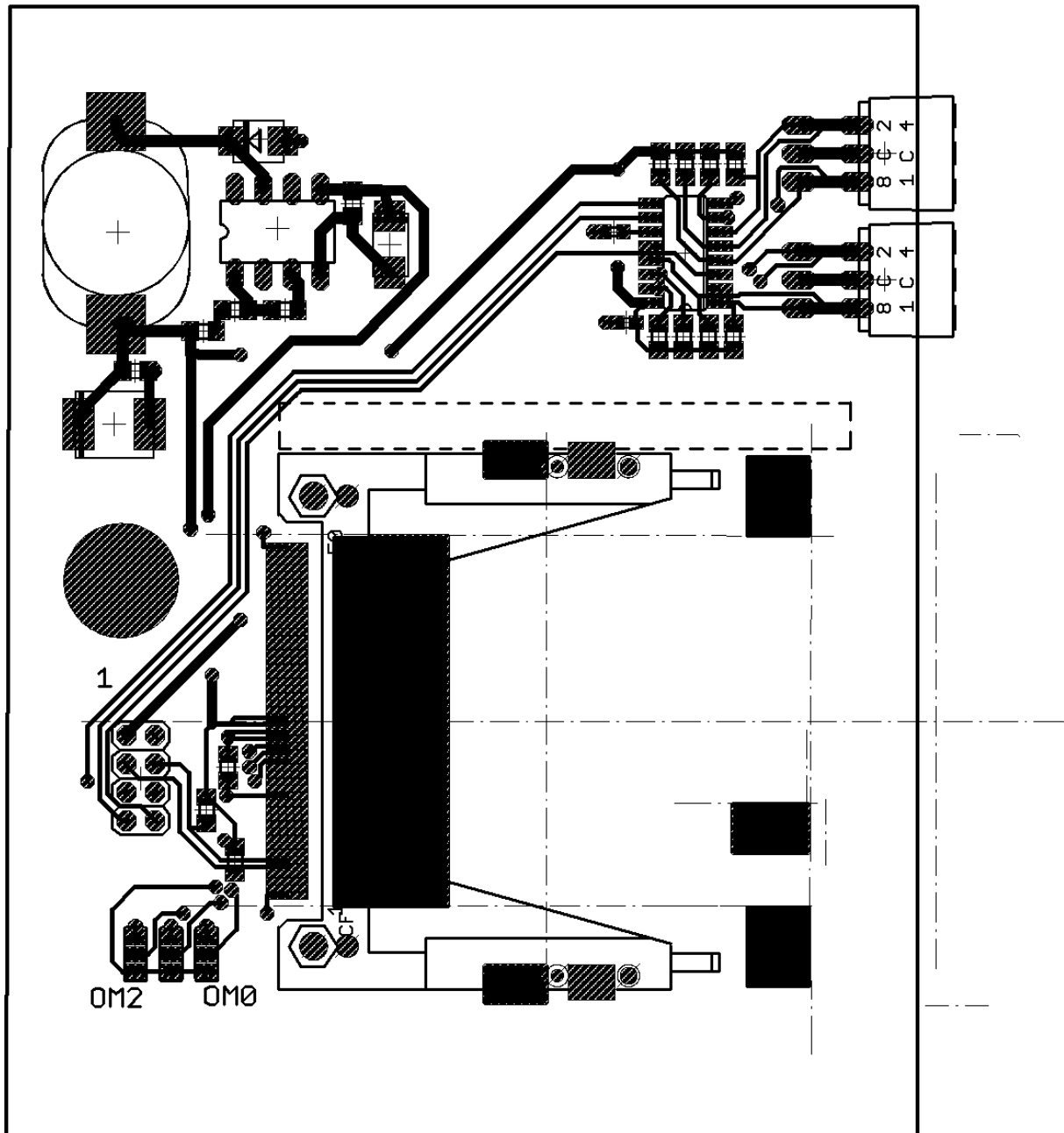


Abb. 8 Platine zum Einschub des Profibus-Moduls

Die Hauptplatine der Steuereinheit wurde um eine universelle Schnittstelle zur Anbindung von Profibus- bzw. Profinet-Modulen der Firma Anybus erweitert. Abbildung 7 zeigt in den umrandeten Feldern die zusätzliche Ansteuerlogik und den Pfostenstecker zum Anschluss der in Abbildung 8 gezeigten Platine zur Aufnahme der Profibus-Module.

Die Module an sich befinden sich mit deren Stromversorgung und der Einstellung für die Adresse auf einer gesonderten Platine, die mit der Hauptplatine über ein Flachbandkabel verbunden wird. Auf dieser Platine können über einen Compact-Flash-Stecker die verschiedenen Module von Anybus eingeschoben werden. Somit ist ohne spätere Hardwareänderung eine Anpassung an die verschiedensten Industriestandards wie Profibus, Profinet, Modbus, CAN o. ä. möglich. Im verwendeten Gehäuse werden beide Platinen in unterschiedlicher Einschubhöhe montiert. Der Anschluß für das jeweilige Modul befindet sich auf der Gehäuseseite.

Zum Austausch mit der SPS über den Profibus wurde ein noch vorläufiges und ggf. zu erweiterndes Protokoll erdacht und in Form einer Befehlsliste in eine Gerätestammdatei codiert. Somit kann ohne großen Aufwand die Steuerung in die Simatic-S7-Anlage übernommen werden. Die Tabelle zeigt die bisher implementierten Speicherzellen und Befehle.

Befehl	Datenrichtung	Format		Erläuterung
Reserve1	Hfs->SPS (Profibus_A)	Uint16	0-65535	
Reserve2	Hfs->SPS	Uint16	0-65535	
Reserve3	Hfs->SPS	Uint16	0-65535	
Fehler Moist Control ID 0x01	Hfs-SPS	Uint16	0...255	Fehlercode lt. Anhang für das Steuergerät
Fehler Sensor ID 0x10	Hfs->SPS	Uint16	0...255	Fehlercode lt. Anhang für den Sensor
Fehler Sensor ID 0x11	Hfs->SPS	Uint16	0...255	Fehlercode lt. Anhang für den Sensor
Wassergehalt	Hfs->SPS	Uint16	0...10000	In 0,01%
Materialtemperatur	Hfs->SPS	Uint16	0...100	In 0,1°C
Reserve1	SPS->hfs (Profibus_E)	Uint16	0-65535	
Reserve2	SPS->hfs	Uint16	0-65535	
Reserve3	SPS->hfs	Uint16	0-65535	
Stoffindex	SPS->hfs	Uint16	0...255 (default 0)	In Ziffer kodiertes Material, 0 ist immer FI
Fehlerquittierung	SPS->hfs	Uint16	0 oder 1 (default 0)	1= Quittung

Tab. 1 Befehlsliste für GSD-Datei

3.3 Feldtauglicher Aufbau

Die neu entwickelten Scanneranordnungen werden in verschiedenen Umgebungen im industriellen Umfeld zum Einsatz kommen. Daher standen für den praktischen Einsatz Aspekte wie Robustheit, Temperaturbeständigkeit, Schutz vor Staub und Spritzwasser, chemische Beständigkeit usw. im Vordergrund.

Daneben waren wichtige normative Forderungen für elektronische Geräte wie die EMV-Sicherheit und eventuelle Auslegung für explosionsgeschützte Bereiche (Ex-Schutz) zu berücksichtigen. Diese fanden ihren Niederschlag in entsprechender Konstruktion der Scanneranordnungen, verschiedenen EMV-Tests, geeigneten Maßnahmen in der Stromversorgung sowie der Realisierung einer Ex-Ausführung für Zone 2 bzw. 22.

4 Software für Mikrowellen-Prozessscanner

Das Arbeitspaket Software baute auf dem vorhandenen Kenntnisstand der Aufnahme und Visualisierung von Mikrowellenscans auf. Für die Realisierung schnell aufzunehmender Scans gab es aber zusätzliche Anforderungen wie Echtzeitfähigkeit einzelner Softwarekomponenten, die Ressourcenoptimierung oder die Anwendung neuer Modelle und Algorithmen.

Innerhalb dieses Arbeitspakets wurden in Form von Software-Modulen verschiedene Algorithmen erarbeitet, die es ermöglichen, eine schnellere und höher aufgelöste Abtastung von Objekten zu realisieren. Für verschiedene Scangeometrien wurden in Teilen unterschiedliche Softwarekomponenten erstellt.

Zusätzlich zur Erhöhung der Scangeschwindigkeit wurden in die Software-Module auch Elemente und Algorithmen aus der Bildverarbeitung eingebracht. Allerdings konnte die Entwicklung auf Grund der realen Aufgabenstellungen nicht soweit vorangetrieben werden, dass eine Realisierung in Echtzeitanwendungen möglich ist.

Weiter musste das Software-Konzept auch Aussagen zur Realisierung der Kalibration der Scannermodule auf physikalische Größen, vorrangig auf die Materialfeuchte, beinhalten. Dazu gehörte die Implementierung von dynamischen und variablen Kalibrierkurven-Strukturen, die die Einbeziehung mehrerer Parameter ermöglicht.

4.1 Software-Konzept für Prozess-Mikrowellen-Scanner

Zur Realisierung von höheren Abtastraten wurde ein grundlegend neues Konzept der Scan-Software entwickelt, das den neuen Anforderungen Rechnung trägt.

Dabei besteht eine enge Verknüpfung mit den Entwicklungen bei der digitalen Hardware und den entsprechenden Schnittstellen. Für höhere Abtastraten sind auch in der Scannersoftware konzeptionell neue Ansätze zu suchen.

Das Software-Konzept wurde so ausgelegt, dass die Einbeziehung von Elementen der Bildverarbeitung ermöglicht. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass dies prinzipiell möglich ist und zu Verbesserungen in der Detektionsschärfe führt. Diese werden schrittweise in die vorhandene Software-Lösung implementiert.

Weiter beinhaltet das Software-Konzept auch Aussagen zur Realisierung der Kalibration der Scannermodule auf physikalische Größen, vorrangig auf die Materialfeuchte. Hierfür wurden dynamische und variable Kalibrierkurven-Strukturen vorgesehen, die die Einbeziehung mehrerer Parameter ermöglichen.

Die Einführung eines solchen Kompensationsmodells spiegelt sich in der Erweiterung des sensorbezogenen Parametersatzes wieder. Zu erwarten ist ein lichtlineares Verhalten (Überlagerung von Drift elektrischer Parameter der Elektronik und temperaturabhängige Materialparameter) welcher durch großdynamische Ausgleichsgeraden kompensiert werden kann. Daraus folgt eine dynamische Größe des Sensorparameterblocks (bisher statische Größe) Daher wurde eine dahingehende Erweiterung des Parametermodells inklusive der korrespondierenden PC-Software konzipiert.

4.2 Normierung und Definition von Klassifikatoren

Die matrizenartig aus Einzelmessungen zusammengesetzten Scanbilder wurden mit verschiedenen Ansätzen aus der Bildverarbeitung klassifiziert und nach Merkmalen untersucht. Dafür wurden folgende Ansätze bewertet:

- i. bekannte Bildverarbeitungsoperationen wie Kanten- und Strukturfilter, Rangordnungsfilter, verschiedene Transformationen
- ii. die Auswertung geometrischer Parameter wie Größe, Ausdehnung, Achsenverhältnisse an durch Filterung abgegrenzten Objekten
- iii. die Beschreibung mit Hilfe statistischer Parameter als Summenparameter wie Standardabweichung, Median, Häufigkeitsverteilungen usw.

- iv. die Anwendung analytischer Parameter und Transformationen als Summenoperationen auf komplette Bilder und Teilbilder wie Gradientenbildung, FFT oder Korrelations-
transformationen

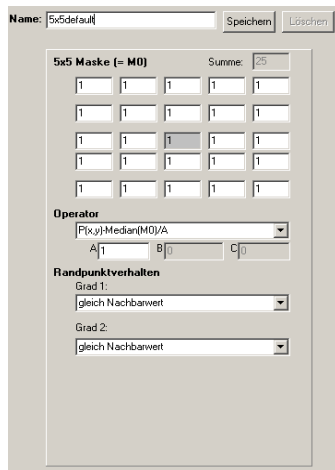
Anhand der Merkmalsbildung wurden Klassifikatoren gefunden, die die Entscheidungsfindung über die Eigenschaften zu identifizierender Strukturen ermöglichen. Die Anwendbarkeit der Klassifikatoren nach i. bis iv. auf die Lösung verschiedener Aufgabenstellungen für den Einsatz von Mikrowellen-Prozessscannern ist dabei problemabhängig. Sie muss für jede neue Anwendung neu untersucht werden.

Für viele Anwendungen von Mikrowellen-Prozessscannern kommen zunächst die einfacheren Klassifikatoren nach i. und iii. in Frage. Daher wurden nachfolgende Untersuchungen vorrangig mit diesen Klassifikatoren durchgeführt.

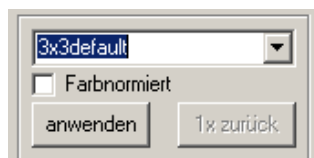
4.3 Implementierung und Test von Algorithmen aus der Bildverarbeitung

Für ausgewählte Anwendungen von Mikrowellen-Scannermodulen für unterschiedliche Geometrien wurden einige Algorithmen aus der Bildverarbeitung implementiert. Im Rahmen einzelner Testreihen erfolgte die Anwendung auf entsprechende Rohdaten.

Grundlage der Filteralgorithmen ist eine gleitende Wichtungsmaske verschiedener quadratischer Dimension (3x3 und 5x5 derzeit möglich), die mit ihrem Zentrumsfaktor nacheinander über jeden Bildpunkt verschoben wird. Es werden der Wert eines jeden überdeckten Bildpunktes mit dem der Maske multipliziert und zu einer Summe addiert, die dann nach der Anwendung eines wählbaren Operators den neuen Wert des Zentrums des Filterergebnisbildes bildet. Die Filter können frei konfiguriert werden, indem die Elemente der Wichtungsmaske als Wichtungsfaktoren belegt werden. Es ergeben sich also 9 bzw. 25 Freiheitsgrade zuzüglich der Operatorauswahl.



5x5 Filterdefinition



Filterauswahl und Anwendung

Derzeit sind folgende Operatoren implementiert:

- M0/Maskenfeldanzahl
- M0/Summe Wichtungen

Die Implementierung des Anwendens der definierten Filter in der Sequenzberechnung geschah zum einen, indem jedem Sequenzschritt ein Filter nachgeschaltet werden kann. Wenn die mathematische Funktion die des Multiplizierens der Werte mit 1 ist, kommt dementsprechend der Filter in Reinform zur Anwendung. Neben der Erweiterung der Sequenzberechnung um die Filteranwendung können einzelne Filter auch direkt als Einzelschritt angewendet werden.

Filterdefinition

In der nebenstehend Grafik ist das Definitionspanel für ein 5x5 Filter dargestellt. Filter können neu erstellt werden, indem sie von schon vorhandenen Filtern abgeleitet werden. Die Speicherung erfolgt in das ini.-File des Programms in Form eines Textstrings. Die Auswahl des gerade angezeigten und zur Anwendung ausgewählten Filters erfolgt mittels des dargestellten Filterauswahlpanels.

- $M0/A$
- Sobeloperator $\sqrt{A \cdot M0^2 + B \cdot M90^2}$
- $\text{Median}(M0)/A$
- $P(x,y)\text{-Median}(M0)/A$
- $\text{abs}(\text{Median}(M0) - \text{Mittelwert}(M0))$
- $A \cdot |\text{Korr}(M0)| + B \cdot |\text{Korr}(M90)|$

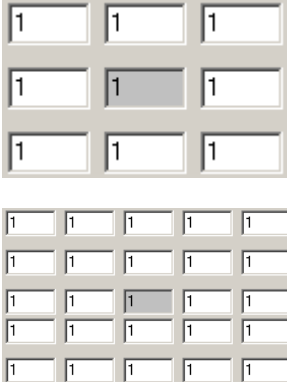
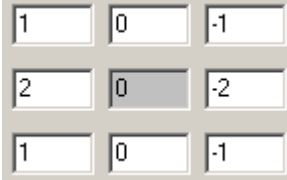
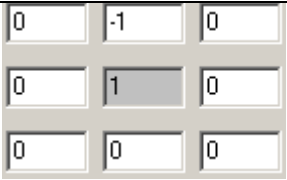
Name	Wichtungsmatrix M0 und Faktoren	Operator und Beschreibung
3x3default 5x5default		$M0/\text{Maskefeldanzahl}$ Wirkt als Tiefpass und berechnet den Mittelwert des betrachteten Bildausschnittes (aus 9 oder 25 Werten)
Sobel_normal Sobel_2x Sobel_2y	 <p>normal; A=1;B=1 2x:A=1 B=2 2y: A=2 B=1</p>	$\sqrt{A \cdot M0^2 + B \cdot M90^2}$ Wirkt als Hochpass, also richtungsunabhängiger Kantenfilter; Die beiden Gradienten in x und y Richtung werden über M0 und M90 getrennt berechnet und der Gesamtgradient über die Wurzel der Summe der Richtungsgradientenquadrate ermittelt. Über 2x bzw. 2y wird entweder der x oder y Gradient höher bewertet
abs(Anstieg_xy) abs(Anstieg_x) abs(Anstieg_y)	 <p>xy: a=1 B=1 x:A=1 B=0 y: A=0 B=1</p>	$\sqrt{A \cdot M0^2 + B \cdot M90^2}$ Es wird der Anstieg berechnet. Die beiden Gradienten in x und y Richtung werden über M0 und M90 getrennt berechnet und der Gesamtgradient über die Wurzel der Summe der Richtungsgradientenquadrate ermittelt. Durch Variation der Faktoren A und B kann somit eine Höherbewertung der Anstiege in x oder y Richtung bewirkt werden

Tabelle 2 Beispiele für Filterausprägungen

4.4 Gerätespezifische Kalibration

Wegen fertigungstechnischer Toleranzen ist das Mikrowellenverhalten der verschiedenen Applikatoren bzw. der Mikrowellensensoren nicht immer gleich. Dieser Arbeitsschritt sah daher die Erfassung und Kompensation aller gerätetechnischen Toleranzen auf der höher integrierten Ebene der Scannermodule vor. Dieser Abgleich ist nicht direkt vergleichbar mit der Kalibration der Sensoren und soll im Scanner automatisiert durchgeführt werden können.

Darin eingeschlossen war besonders auch die Beseitigung der Abhängigkeit von Umgebungs- und Störeinflüssen wie z.B. Temperaturdriften.

Der Kalibriervorgang soll idealerweise nur einmal oder in möglichst langen zeitlichen Abständen erfolgen. Dafür ist die Definition und Realisierung geeigneter und standardisierbarer Kalibriernormale notwendig.

Die Realisierung erfolgte im .NET –Framework 3.0/3.5 für Windows-PC [Win7 / Win10 (32 und 64bit)]. Die Kalibrieralgorithmen wurden zunächst auf Scanneranordnungen beschränkt, die mit einem COM-Port auskommen. Hierzu gehörte die Implementierung von dynamischen und variablen Kalibrierkurven-Strukturen zur Einbeziehung mehrerer Parameter.

Durch die Einführung eines Kompensationsmodells, welches stoffspezifisch ausgelegt ist, stößt das bisherige Parametermodell an Grenzen, da die stoffspezifischen Parameter zwar eine Umdeutung des Parameterinhaltes (über die Parametersatzversion 1.x) zulässt nicht aber deren Erweiterung oder Strukturänderung [Revisionsnummer = 1].

Eine Verlagerung der Erweiterungen in den schon dynamisch angelegten projektspezifischen Parameterteil wäre zwar möglich, doch schränkt die damit einhergehende a priori festzulegende maximale Stoffanzahl sowie die Beschränkung auf Einzelwerte die Umsetzbarkeit von lichtlinearen Verläufen mittels Ausgleichsgeraden maßgeblich ein.

Mit der Softwareversion MoistTools 3.30 wurde die Entflechtung von funktionalem Code und Daten weitgehend umgesetzt, so dass es durch Nachladen und Einbauen von XML-basierten Daten zur Laufzeit (überschreiben/erweitern/löschen) eine Neukompilierung der Software unnötig wird, um neue Objekte gleicher Struktur zu erzeugen.

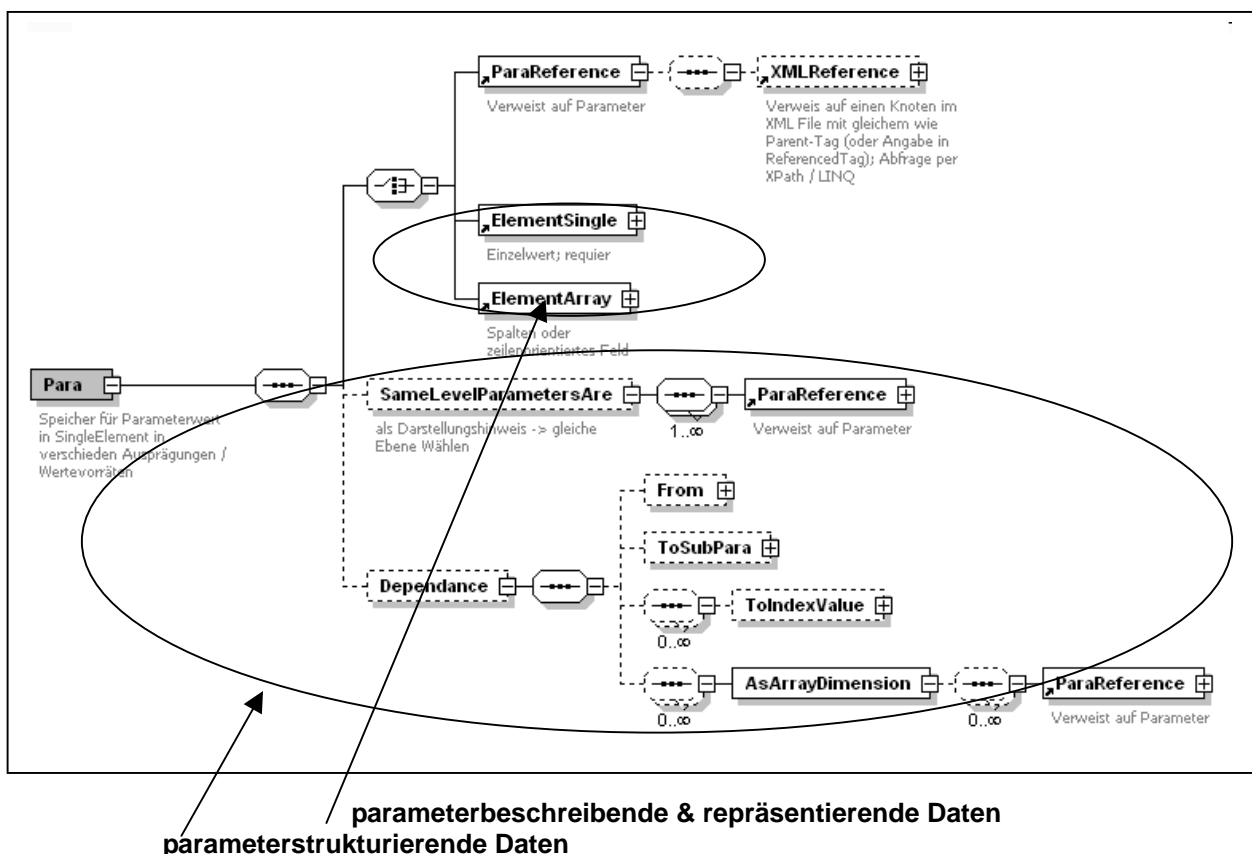


Abb. 9 Datenstruktur für dynamische und variable Kalibrierkurvenstrukturen

Diese Möglichkeit wurde auf Parameter-Objekte ausgeweitet. Grundlage ist eine Parameter definierende Datenstruktur im XML-Stil, die über einen eindeutigen Index [nachfolgend Paraldx genannt] unterscheidbar ist. Neben der Ablage von Metadaten wie Name,

Zusatzinfos usw.. soll auch die Repräsentation des Parameters im Speicher des Gerätes, innerhalb der Software, der Datenablage sowie auch im Human-Device-Interface [HDI z.B. Bildschirm] abgelegt sein. Zudem sind Abhängigkeiten/Strukturen von Parametern und deren Werte-Sets darzustellen, d.h. abhängig vom Wert eines Hauptparameters [z.B. Filtermethode] ist ein oder mehrere weitere Parameterwerte unterschiedlich zu interpretieren. Die erarbeitete Datenstruktur soll nachfolgende Abbildung wiedergeben.

Die parameterbeschreibende & repräsentierende Daten unterteilen sich grob in Einzelwerte [ElementSingle] und Werte-Felder [N x M] [ElementArray] worin auch Werte-Vektoren als Form [N x 1] eine Submenge bilden. Die Weiterverzweigungen dieser beiden Knoten stellen nachfolgende Grafiken dar.

Ein Modell für den Abgleich der Sensoren auf Prüfnormale (FIV-Kalibrierung) und die anschließende Kalibrierung auf den Trockensubstanzgehalt bei einem 4-er Scannersystem wurde ebenfalls erarbeitet und getestet.

Weiter wurden langzeitstabile Prüfnormale zur Referenzbildung realisiert und in einige gerätetechnische Konzepte eingebunden.

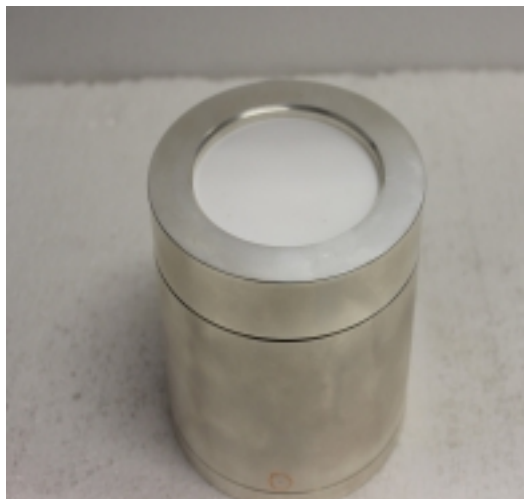


Abb. 10 Prüfnormal als Einzelnormal für Mikrowellensensoren

Diese Prüfnormale dienen der Lösung eines der Hauptprobleme elektronischer Materialfeuchtemesssysteme – es gibt bisher keine langzeitstabilen Prüfstandards, da die Volumenverteilung von Wasser in einer Prüfprobe niemals über einen längeren Zeitraum homogen bleibt. Daher muss der Rückbezug auf ein mikrowellentechnisch gut geeignetes Prüfnormal erfolgen, welches diese Eigenschaften aufweist. Das in Abb. 10 dargestellte Prüfnormal besteht aus einem Kern aus PTFE-Kunststoff und einer zylinderförmigen Ummantelung mit versilberter innerer und äußerer Oberfläche.

4.5 Kalibriersoftware zur Ansteuerung und Verwaltung der Scannermodule

Die neuen Kalibrieralgorithmen wurden auch in die für die Verwaltung und Kalibrierung der Scannermodule verwendeten Software implementiert. Diese stellt auf der PC-Seite das Pendant zur firmware in den Steuereinheiten dar. Im Zusammenhang mit der Entwicklung des Kalibriermodells entstand die neue Kalibriersoftware MOIST TOOLS V3.31.

Diese basiert auf neueren Softwaretechnologien als die bisher verfügbaren Kalibriertools. Dazu erfolgte der Übergang zu HTML-basierten Softwarewerkzeugen und zur Programmiersprache C#, einer der Basissprachen für

- das .NET –Framework 3.0/3.5 für Windows-PC [XP / Win7 (32 und 64bit)]
- das .NET Compact Framework 2.0/3.5 für embedded Systeme mit dem Betriebssystem WINCE 5.0/6.0.

Spezifische Funktionen aus MS Visual Studio 2008 Professional sind übernommen und aus dem .NET-Framework abgeleiteter frameworkspezifischer Code in separaten Klassen gekapselt.

Weiter wurden auf Basis der über die Kalibriersoftware realisierten erweiterten gerätespezifischen Kalibriervorgänge auch die Schnittstellen zur materialspezifischen Kalibration geschaffen. In einigen Fällen reicht es dabei, die materialspezifischen Kalibrierungen nur einmal aufzunehmen und nach dem Einprogrammieren nur noch zu validieren. Diese sehr einfache Vorgehensweise bei der Kalibration funktioniert bisher allerdings nur bei wenigen Anwendungen.

5 *Applikationsuntersuchungen mit Mikrowellen-Prozessscannern*

Zu den verschiedenen geplanten Anwendungen wurden umfangreiche applikative Untersuchungen realisiert. Diese umfassten die Einkopplung und Wellenausbreitung in bzw. an verschiedenen Messanordnungen und Geometrien von Messobjekten. Falls möglich, sollten in Rückkopplung mit der Softwareentwicklung auch Betrachtungen zur Detektion von Stoffeigenschaften in unregelmäßigen Geometrien angestellt werden.

5.1 *Beschreibung der Eigenschaften von Mikrowellenpixeln / –voxeln*

Mikrowellen–Reflexionsmessungen erfassen im Verhältnis zum Objekt andere Wechselwirkungsräume als optische Verfahren. Methoden der Bildverarbeitung beziehen sich jedoch auf digitalisierte Bilder, deren kleinste Elemente Pixel sind. Daher musste zunächst geklärt werden, in welcher Relation der in der Bildverarbeitung übliche Pixelbegriff und Mikrowellen–Bildpunkte zueinander stehen. Die besonderen Eigenschaften von Mikrowellenpixeln wie z.B.

- i) räumliche Ausdehnung und Winkelabhängigkeit der Intensität im Wechselwirkungsraum
- ii) mögliche Anisotropien innerhalb des Pixels
- iii) Reflexionsantwort als echte Integration über den Wechselwirkungsraum
- iv) Faltung mit Antenneneigenschaften

wurden in Bezug auf die geplanten Anwendungen grundlegend anhand von Messungen an gestörten Objekten beschrieben.

Hierzu wurden verschiedene Untersuchungen an Modellobjekten durchgeführt. Diese enthielten künstlich eingebaute Fehlstellen, Feuchteinseln und andere Störstellen in der räumlichen Verteilung ihrer dielektrischen Parameter. Für die Messungen wurden u.a. Betonprüfkörper mit eingebrachter Bewehrung gescannt. Ebenfalls wurden Messungen am Modellmaterial Mineralwolle durchgeführt, da in Mineralwolleplatten leicht gezielt Störungen verschiedener Geometrien eingebracht werden, ohne große Zerstörungen oder Veränderungen der Struktur in Kauf nehmen zu müssen. Hieraus lässt sich z. B. ableiten, dass eine Punktstörung von 10 mm Durchmesser in Oberflächennähe

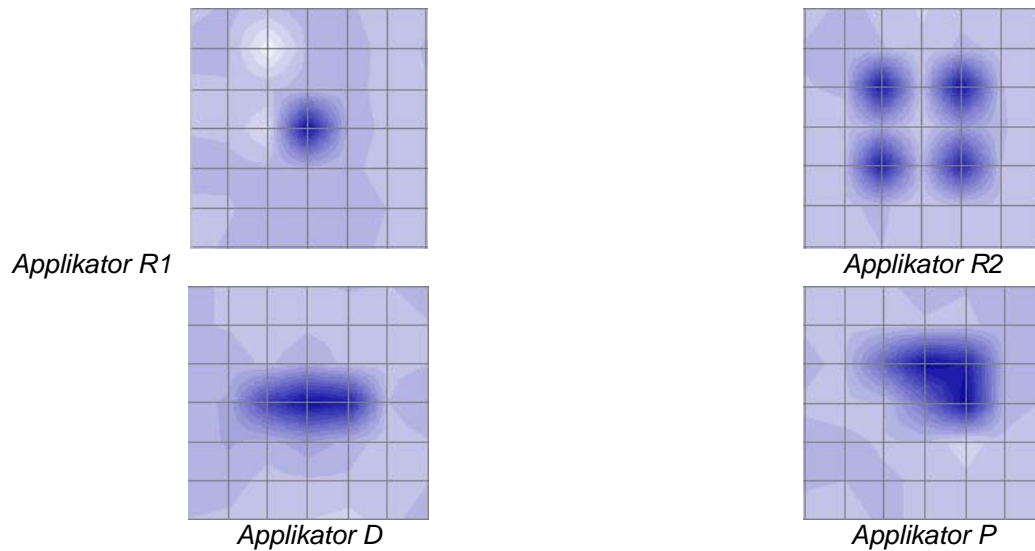


Abb. 11 Scans einer Punktstörung mit verschiedenen Applikatoren

- mit dem Applikator R1 als Punktstörung abgebildet wird
- mit dem Applikator R2 als „Kleeblatt“ abgebildet wird
- mit dem Applikator D als annähernd symmetrische Ellipse abgebildet wird
- mit dem Applikator P als unsymmetrische Ellipse abgebildet wird (die Antenne „schieft“).

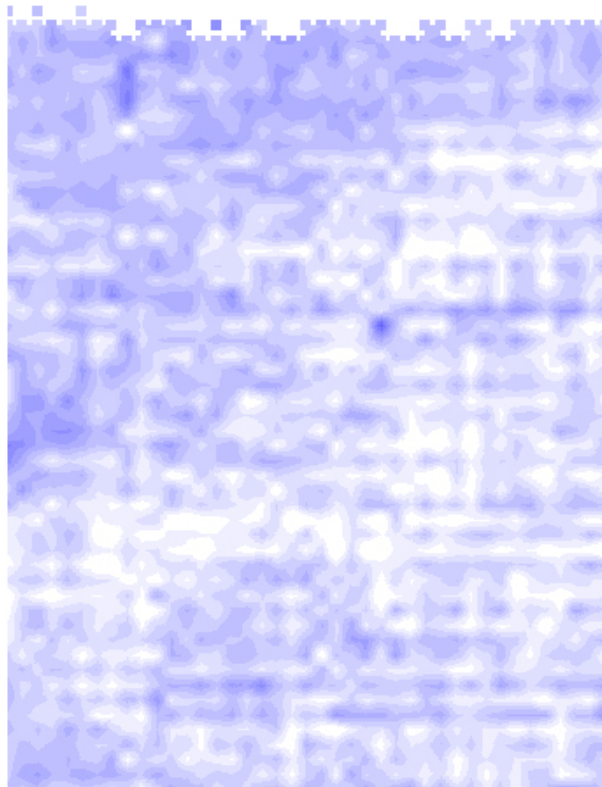


Abb. 11 Scanbild von Linienstörungen – Bewehrungsstähle in Betonprüfkörpern

Diese Arbeiten dienen dazu, grundlegende Möglichkeiten der Unterscheidung zwischen strukturbedingten Einflüssen auf das Scanbild von Feuchteinflüssen zu untersuchen, da sich diese in vielen Anwendungen überlagern.

Im Lauf des Jahres 2015 ergaben sich in diesem Arbeitsschritt neue Erkenntnisse in Bezug auf praxisbezogene Aufgabenstellungen, bei denen einzelne Eigenschaften von Mikrowellenpixeln eine wesentliche Rolle spielten. Daher verlagerte sich der Schwerpunkt in Richtung der einfachen Beschreibungsformen von Mikrowellenpixeln gemäß i) bis iii).

5.2 Untersuchungen zu Einkopplung und Scans an planaren Materialien

Mit den realisierten planaren Scannermodulen wurden Untersuchungen zur Einkopplung an planaren Geometrien durchgeführt. Dabei standen insbesondere die Optimierung des Koppelabstands und die Ermittlung der Eindringtiefen und erfassten Messvolumina im Vordergrund.

Die Arbeiten wurden für die geplanten Kompaktmodule sowie für die für den Einbau in Trockner vorgesehenen Scanneranordnungen aus Einzelsensoren durchgeführt. Während sich die Kompaktmodule meist direkt über oder unter dem Untersuchungsobjekt befinden werden, muss in Trockneranwendungen z.B. von unten durch Kunststoff- oder Textilbänder hindurch gemessen werden. Der Einfluss dieser Zwischenschichten wurde untersucht und bei der Kalibration und Messung berücksichtigt.

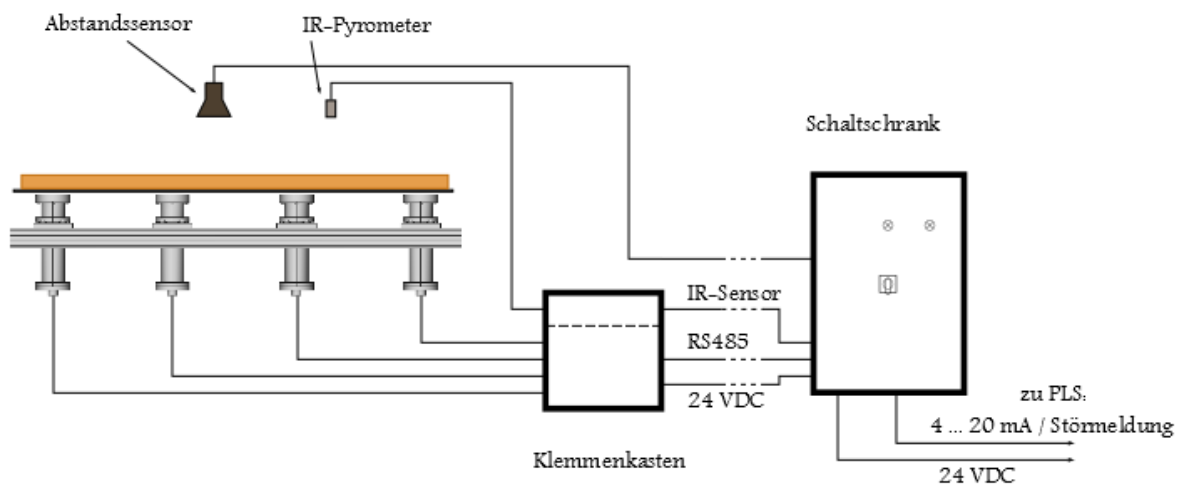


Abb. 13 Verkabelungsschema eines Zeilenscanners aus Einzelsensoren für Bandtrockner

Der in Abb. 14 dargestellte Prototyp eines Zeilenscanners aus Einzelsensoren dient zur Inline – Feuchtemessung in breiten Produktionslinien wie z.B. Bandtrocknern oder an Plattenwerkstoffen. Die vier Mikrowellensensoren dieses Systems können berührungslos oder minimal kontaktierend mit einer Schutzkappe (Verschleißteil) montiert werden. Die Kalibration des Messsystems kann auf Feuchte, Wassergehalt oder Trockengehalt kalibriert werden. Die Feuchtesensoren sind höhenverstellbar an einer Edelstahltraverse unterhalb des Bandes montiert. Die Traverse ist quer zu Bandlaufrichtung montiert. Die Höhe der Sensoren ist so justiert, dass diese mit den Schutzkappen aus PTFE bei beladenem Band dieses leicht berühren, um eine Ablagerung von Schmutz oder Wasser auf der Oberfläche wirksam zu verhindern. Nach dem Einbau werden die Sensoren so abgestimmt, dass sie gleiche Werte anzeigen und die gleiche Empfindlichkeit aufweisen.



Abb. 14 Prototyp eines Zeilenscanners aus Einzelsensoren für den Einsatz an einem Bandtrockner

5.3 Untersuchungen zur Einkopplung gegen wellige Oberflächen

Eine erhöhte Schwierigkeitsstufe stellen Anwendungen dar, bei denen die Scanneranordnungen nicht gegen eine ebene Materialoberfläche messen. In industriellen Trocknungsprozessen ist dies häufig der Fall, z.B. bei der Trocknung von Schüttgütern oder Klärschlamm.

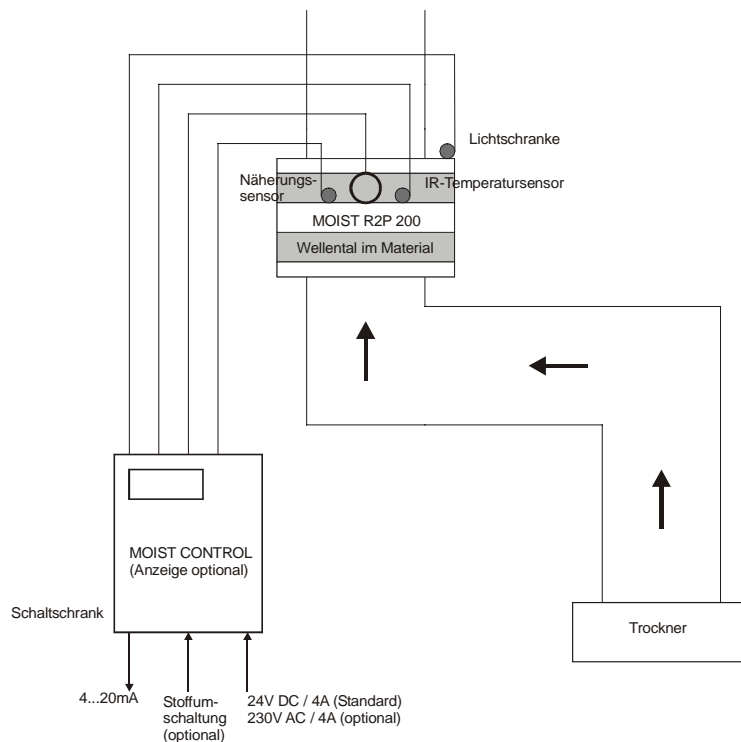


Abb. 15 Konzept für Mikrowellenscans an welligen Oberflächen

Es wurde daher untersucht, ob sich auch in derart schwierigen Einkoppelsituationen mit Hilfe fortgeschrittener Algorithmen in der Scannersoftware determinierte Parameter wie z.B. die

Materialfeuchte mit für Industrieanwendungen hinreichender Genauigkeit messen lassen. Dies kann z.B. durch die Zusammenfassung mehrerer Mikrowellenpixel erfolgen. Weiter konnten Aussagen zur erreichbaren Ortsauflösung und Messgeschwindigkeit ermittelt werden.

Hierzu wurden an ausgewählten Untersuchungsobjekten wie z.B. gewellten Pappen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, bei denen eine Triggerung auf die Wellentäler erfolgte. Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, dass der Feuchtescan nicht an einer durchlaufenden Materialbahn, sondern an einzelnen aufeinander folgenden Platten erfolgen muss. Die Arbeiten hieran lieferten gute Ergebnisse. Mikrowellenscans an welligen oder unebenen Oberflächen sind möglich.

Die Sensoren des Mikrowellenscanners und der kapazitive Näherungssensor werden bei diesem Konzept unter der Materialbahn montiert. Die Anbringung des IR-Temperatursensors erfolgt oberhalb des Materials. Der Einbau der Lichtschranke zur Detektion der einzelnen Platten erfolgt an geeigneter Stelle in der Anlage. Der Einbau der Sensoren erfolgt an einer geeigneten Stelle, an der keine starken Temperaturschwankungen auftreten. Der Näherungssensor dient der Detektion von Wellentälern im Material. Auf diese wird der Feuchtescan getriggert. Die Lichtschranke detektiert Anfang und Ende der einzelnen Platten.

5.4 Untersuchungen zur Einkopplung gegen metallische Reflektoren

In einer Vielzahl von Anwendungen bestehen Transportbänder nicht aus Kunststoffen oder Textilien, sondern aus mehr oder weniger durchgängigen metallischen Flächen. Dies stellt für die Einkopplung von Mikrowellen in darauf befindliche Untersuchungsobjekte ebenfalls eine deutlich erhöhte Schwierigkeitsstufe dar. Auf der Oberfläche der Metallbänder werden ebenfalls Wellenmoden angekoppelt, die die Messergebnisse benachbarter Sensoren stören können. Bisher mussten solche Anwendungen als nicht lösbar angesehen werden..

Es wurden daher Applikationsuntersuchungen zu möglichen Messmodi in derartigen Anordnungen durchgeführt. Hierbei erfolgten umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung des Koppelabstands und der Koppelgeometrie. Die einzelnen Sensoren in den Scanneranordnungen werden sequentiell und bei verschiedenen Frequenzen betrieben.

Testmessungen mit Einzelsensoren gegen metallischen Reflektor im Produktionsprozess (Anwendung Pappenherstellung) wurden durchgeführt. Im Bild ist ein typischer Anwendungsfall dargestellt, bei dem es darum geht, an Pappen sogenannte Spleißstellen zu finden. Diese entstehen beim Herstellungsprozess und bilden die Verbindungsstelle von einzelnen Pappenbahnen zu einem Endlosband. Da an diesen Stellen die Materialdicke größer ist als die der normalen Pappe vorgegebener Flächenmesse, stellen sie Störungen dar und müssen bisher manuell gesucht und entfernt werden. Mit einem Mikrowellenscanner kann dies automatisiert werden. Die unten stehende Abbildung zeigt das typische Aussehen derartiger Spleißstellen.

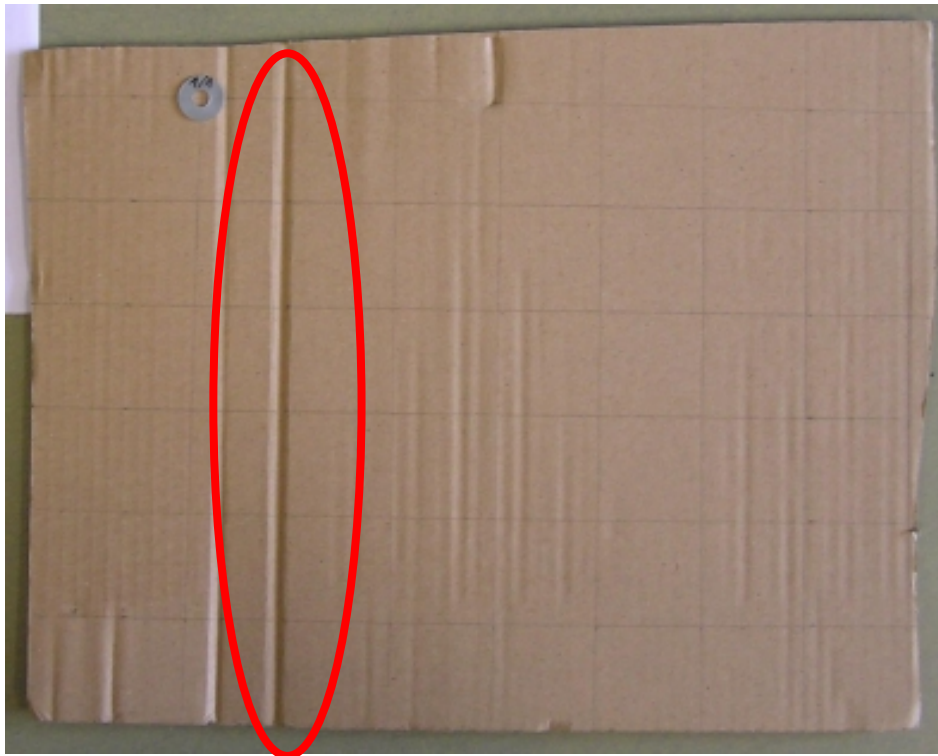


Abb. 16 Spleißstellen an einer Pappe

Nachdem Messungen ohne Reflektoren erfolglos waren, wurden in Versuchsreihen zunächst mit Einzelsensoren verschiedene Anordnungen getestet, die dazu dienen, geeignete Reflektorbauformen zu finden sowie den Abstand und die Einkopplung der Mikrowellen so zu optimieren, dass eine gute Erkennung der Spleißstellen möglich wird. Nachfolgend ist ein typischer Versuchsaufbau dargestellt:

Höhe 20mm_Probenposition mitte_P1

Messkopf:	P 678
Messfrequenz:	Min, 7660
Abstand Reflektor –Antenne:	20mm
Abstand Reflektor – Probe:	10mm

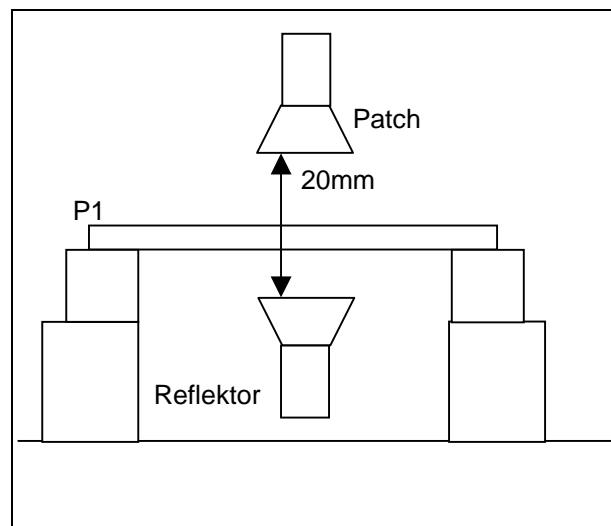


Abb. 17 Versuchsanordnung zur Optimierung der Reflektorgeometrie und des Abstands

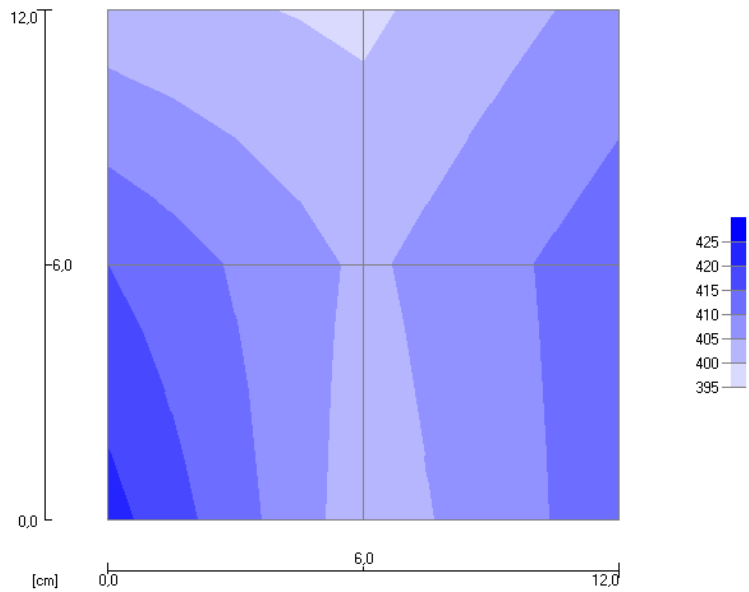


Abb. 18 Typisches Messergebnis einer manuellen Messung

Abb. 17 zeigt ein typisches Messergebnis eines manuell ausgeführten Scans, die Spleißstelle in der Mitte ist wegen der niedrigeren Werte gut erkennbar.

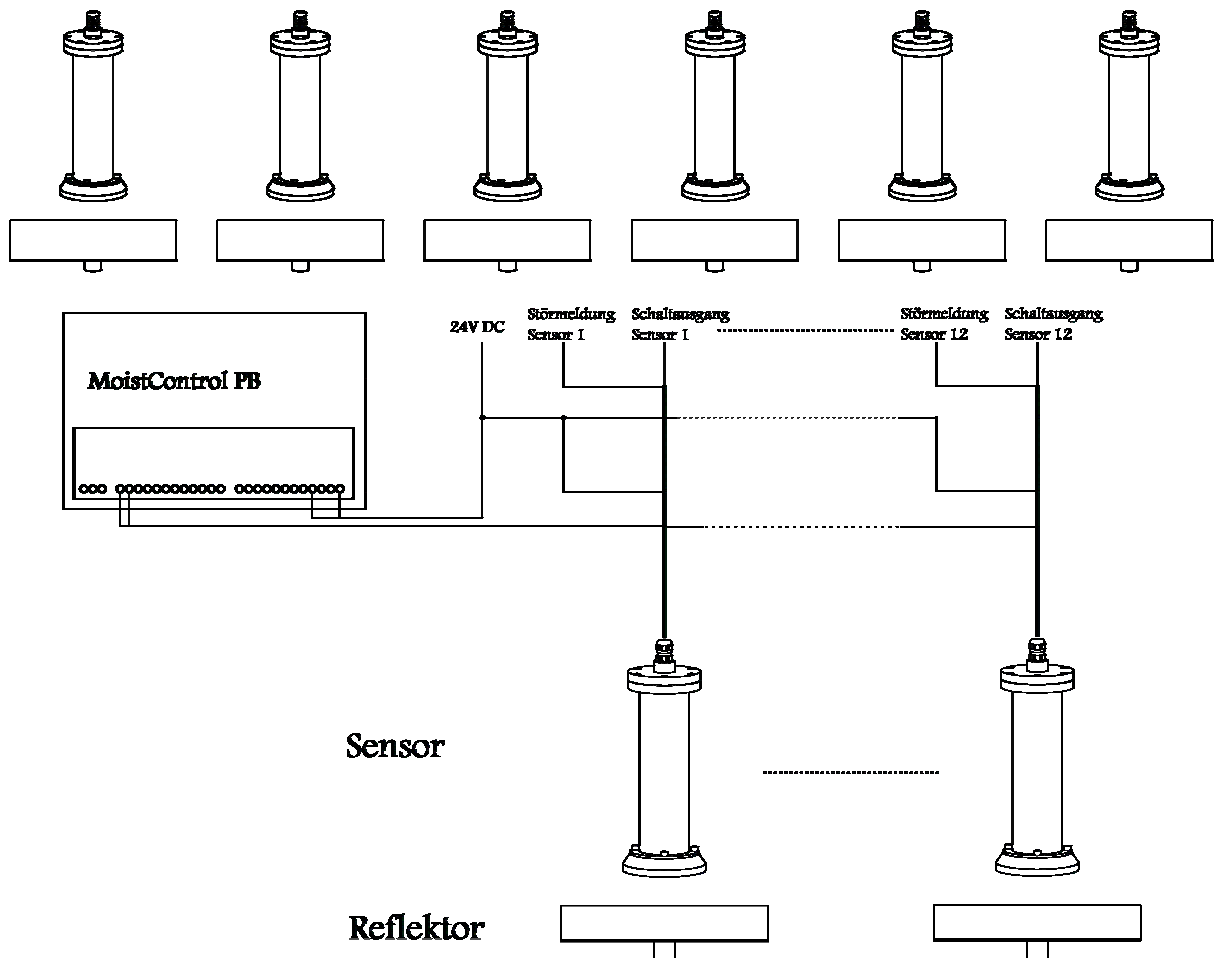


Abb. 19 Systemkonzept eines Mikrowellenscanners zur Detektion von Störstellen

Auf Grundlage der Versuche wurde die Reflektorbauform in mehreren Schritten soweit verbessert, dass ein gutes Detektionsergebnis möglich ist. Darauf aufbauend wurde eine Scanneranordnung mit 11 Sensoren als Zeilenscanner konzipiert und aufgebaut. Das Konzept dieser Anordnung ist im nachfolgenden Bild dargestellt und dient als Prototyp für die Anwendung von Mikrowellenscannern zur Störstellendetektion.

Da sich Messaufgaben des Typs „Messung gegen metallische Reflektoren“ in praktischen Einsatzfällen immer häufiger abzeichnen, wurde hierfür ein eigener Prüfstand konzipiert.

Das Systemkonzept von Mikrowellenscannern für den Einsatz zur Feuchtemessung in Bandtrocknern mit Metallbändern unterscheidet sich von Anordnungen zur Störstellendetektion. Hier kommt es eher darauf an, einen integralen Wert über ein größeres Messvolumen zu erhalten. Ein Beispiel einer industriellen Anwendung ist die Herstellung von Kaolingranulat. Für die Erzielung einer guten Qualität des Endprodukts muss dieses eine Feuchte in einem definierten Bereich aufweisen. Bisher erfolgt die Beprobung mehrfach täglich durch manuelle Probenahme mit nachfolgender thermogravimetrischer Feuchtebestimmung. Eine Regelung des Trockners zur Qualitätsverbesserung und Energieeinsparung ist auf diesem Weg nicht möglich.

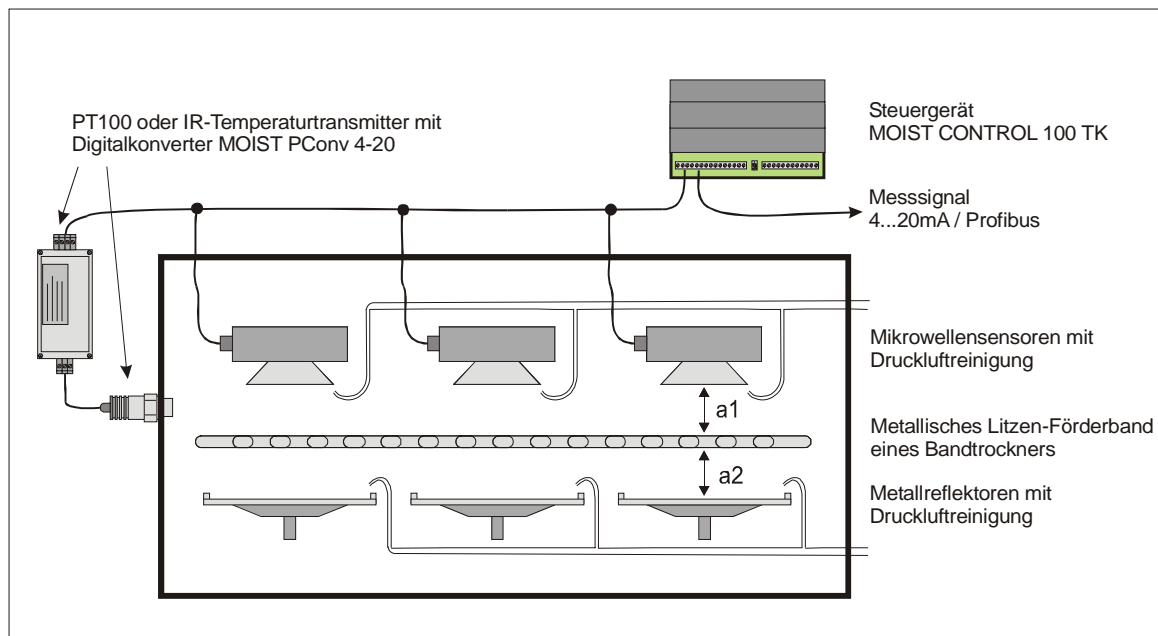


Abb. 20 Systemkonzept eines Mikrowellenscanners zur Feuchtemessung an Pulvern und Granulaten

Daher wurde für diese Anwendung das Konzept eines Mikrowellenscanners entwickelt, der eine Messung gegen das metallische Litzenförderband im Trockner ermöglicht. Das Litzenförderband stellt keinen durchgängigen Reflektor dar, daher sind zusätzliche Reflektoren vorgesehen. Wegen der metallischen Ummantelung des Trockners müssen die Sensoren des Scanners im Trockner untergebracht werden, so dass zusätzlich eine Druckluftreinigung benötigt wird. Die durchgeführten Applikationsuntersuchungen zeigten, dass mit derartigen Anordnungen auch die Feuchtemessung an einem metallischen Förderband möglich ist.

5.5 Untersuchungen zur Einkopplung an Rohrleitungen und in Rundgeometrien

Auch die Einkopplung von Mikrowellen an oder in nichtmetallische Rohrleitungen und in Rundgeometrien ist ein nicht einfach zu lösendes Problem. Aus früheren Untersuchungen zum Einkoppelverhalten von TS-Sensoren in Kunststoffrohrleitungen war bekannt, dass dies

ohne zusätzliche Maßnahmen nicht möglich ist, da auf der Rohrleitung umlaufende Oberflächenwellen angeregt werden.

Als Lösungsansatz wurde die Abschirmung der einzelnen Sensorstrukturen identifiziert. Daher wurden umfangreiche Tests durchgeführt, die zur Optimierung der Wirkung derartiger Abschirmungen genutzt wurden.

Eine mögliche Anwendung besteht in der Keramikindustrie bei Feuchtemessung an Keramikhubeln, d.h. runden Rohlingen der jeweiligen keramischen Massen mit einem Durchmesser zwischen 180 und 400 mm und einer Länge bis zu 5 m. Wegen der hohen Permittivität der Keramik ist die Einkopplung der Mikrowellen sehr schwierig zu realisieren und ohne Koppellemente nahezu aussichtslos. Das nachfolgende Bild zeigt den Prototypen eines Koppeladapters, der für die Einkopplung in derartige Rundgeometrien vorgesehen ist.

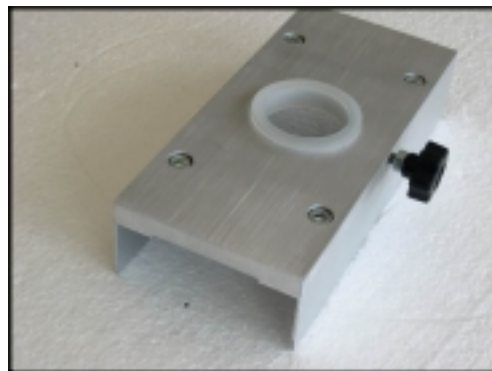


Abb. 21 Prototyp eines Koppeladapters für die Einkopplung an runden Geometrien

Der einzelne Mikrowellensensor wird in der Mitte des Koppeladapters montiert. Durch die metallische Berandung wird der Ausbreitung der Mikrowellen auf dem Umfang der Hubel entgegengewirkt. Die Höhe des eingebauten Sensors kann variiert werden, so dass eine Anpassung an verschiedene Durchmesser möglich ist. In Längsrichtung ist der Koppeladapter lang genug dimensioniert, um einen Feldaustritt zu vermeiden.

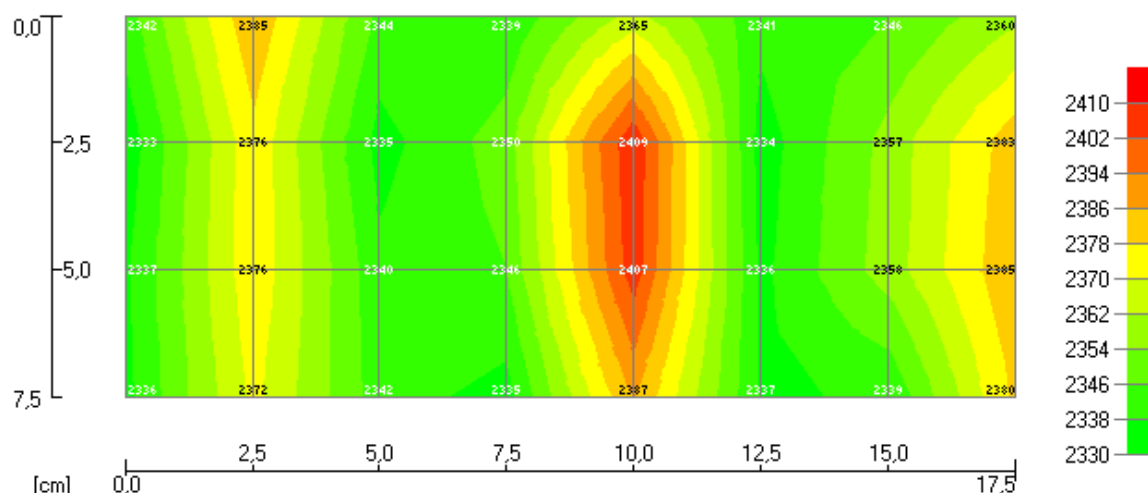


Abb. 21 Beispiel eines manuell durchgeführten Mikrowellenscans an einem Keramikhubel

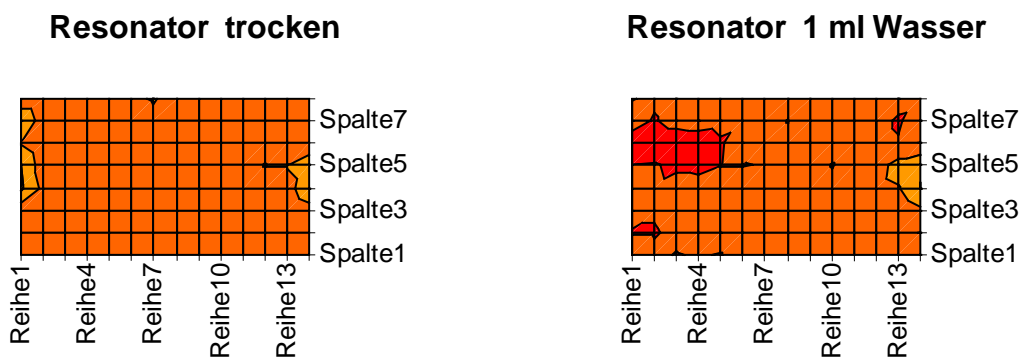
Ebenfalls wurden Betrachtungen zur möglichen bzw. notwendigen Ortsauflösung und zur minimalen Größe der detektierbaren Störungen angestellt. Hierfür wurden umfangreiche Versuche an Objekten mit runden Geometrien durchgeführt, u.a. an Keramikhubeln.

Untenstehende Abbildung zeigt beispielhaft eine mit hoher Ortsauflösung durchgeführte Messung. Deutlich sichtbar wird dabei die Einschnürung in der Mitte, die eine Störstelle im Hubel abbildet. Die erreichbare Ortsauflösung beträgt etwa 1 cm.

In einer zu realisierenden Scanneranordnung für runde Geometrien können je nach Durchmesser vier oder acht Koppeladapter mit eingebauten Einzelsensoren kreisförmig um das Untersuchungsobjekt angeordnet werden. Der elektronische Aufbau entspricht dem von Mikrowellenscannern aus Einzelsensoren.

5.6 Untersuchungen zur hochauflösenden Detektion von Flüssigkeitsleckagen

Für die hochauflösende Detektion von Flüssigkeitsleckagen in Umverpackungen aus Karton sowie in Paketen wurden einige Anwendungsuntersuchungen durchgeführt. Das Ziel war die Optimierung der Anordnung hinsichtlich möglichst hoher Ortsauflösung und möglichst niedrigen Interferenzen zwischen benachbarten Sensoren und nachrangig hinsichtlich möglichst hoher Abstraten.



Leckagedetektion an Infusionsbeuteln – keine Leckage

Leckagedetektion an Infusionsbeuteln – geringe Leckagemenge

Beispielhaft ist in Abb. 22 der Vergleich zwischen zwei Kartons dargestellt, die jeweils mit 4 Beuteln mit je 3 Litern medizinischer Infusionsflüssigkeit gefüllt sind. Das Ziel der Untersuchung bestand darin, durch den geschlossenen Karton hindurch per Mikrowellenscan herauszufinden, ob die Beutel Leckagen aufweisen oder nicht. Eine besondere Schwierigkeit bestand darin, dass der Inhalt der Beutel ebenfalls mit dem Mikrowellensignal wechselwirkt, so dass eine punktuelle Messung mit einem Einzelsensor unmöglich ist. Per Mikrowellenscan ist dies jedoch möglich, es ergibt sich ein Unterschied in der Werteverteilung, der mit einem Klassifikator nach 4.2 weiter bewertet werden kann. Aus den dargestellten Ergebnissen wird erkennbar, dass sich per Mikrowellenscan auch kleine Leckmengen, hier dargestellt für 1 ml, gut detektieren lassen.