

Berührungslose Messung der Stärke von Pappkartons mit einem gepulsten THz-Radarsystem für die automatisierte Perforation

Sebastian HANTSCHER¹, Mathias LANGE¹, Matthias DEMMING²
¹ Hochschule Magdeburg-Stendal (FH), Magdeburg
² Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR

Kurzfassung. In einem Logistikunternehmen werden an den unterschiedlichsten Orten Kartonagen geöffnet oder zur Öffnung vorbereitet (perforiert). Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keine industrietauglichen Verfahren, mit denen die Kartonstärke vorher gemessen wird, um auf Basis dieses Ergebnisses eine automatische Öffnung / Perforation individuell je Kartonnorm und Kartonstärke automatisch vorzunehmen. Dies wäre aber eine Möglichkeit, maximal warenschonend zu arbeiten. In Kooperation mit dem E-Commerce-Dienstleister Hermes Fulfilment GmbH wurde daher an einer Lösung geforscht. Die Herausforderung bestand darin, dort ein Messverfahren für unterschiedlichste Kartonwandstärken (2 bis 12 mm) und Kartonstrukturen (2-bis 4-wandige Wellpappe) zu finden. Zur Lösung wurde ein THz-Radar eingesetzt, das periodisch 3 ps kurze Pulse aussendet. Diese kurzen Pulse bieten aufgrund der hohen Bandbreite den Vorteil einer sehr feinen Entfernungsauflösung von etwa 0,5 mm, so dass die Reflexionen der Kartonvorder- und -rückwand sowie jeder einzelnen Zwischenwand im Empfangssignal sichtbar werden. Die physikalische Ursache dieser Reflexionen liegt in der relativen Permittivität der Pappschichten, so dass an jeder Grenzfläche Luft-Pappe ein Wellenwiderstandssprung auftritt. Wegen der geringen Dicken der Schichten ist die Dämpfung der Pulse selbst im THz-Bereich noch so niedrig, dass genügend Leistung durch die Pappschichten transmittiert wird. Durch eine geeignete Signalverarbeitung ist aus den Einzelreflexionen im Empfangssignal die Wandstärke zu ermitteln. Wegen geringer Signal-Rausch-Abstände, sehr unterschiedlicher Amplituden der Einzelreflexionen sowie aufgrund von Reflexionen der Waren im Karton ist ein direktes Ablesen der Wandstärke aus dem Messsignal unmöglich. Daher wurde nach gleitender Mittelwertbildung zur Rauschverminderung zunächst eine Kategorisierung durchgeführt, so dass aus der Vielzahl von Reflexionen für jeden Karton entschieden werden kann, aus wieviel Pappschichten er besteht. Danach wurde durch eine Vielzahl von Einzelmessungen für jede Kategorie durch geeignete Plausibilitätsabfragen bezüglich der Einzelreflexionen die Wandstärke mit zufriedenstellender Toleranz bestimmt.

1. Einführung

Die Bestimmung der Wandstärke von Paketen findet Anwendung in Logistikunternehmen, die große Warenmengen für ihr Lagersystem warenschonend entpacken müssen. Durch die Vielzahl von Zulieferfirmen ist es solchen Unternehmen nicht möglich, Produkte in Paketen mit einheitlichen Wandstärken für eine warenschonende Perforation oder Öffnung zu erhalten. Bei Beginn der Bearbeitung der Thematik im Jahr 2014 waren keine Produkte oder Lösungsansätze auf dem Markt vorhanden, die eine genaue, berührungslose, zuverlässige und schnelle Bestimmung der Wandstärke ermöglichen, um eine anschließende produktschonende Öffnung der Pakete zu gewährleisten. Schaut man in anderen Bereichen der zerstörungsfreien Prüfung stößt man u. a. auf optische Verfahren, mechanische Verfahren, Röntgenverfahren oder Verfahren auf Ultraschallbasis. Diese Verfahren haben den Nachteil, dass sie die Pappschichten entweder nicht durchdringen, gar nicht registrieren oder nicht berührungslos agieren können. Durch die in der Praxis vorgegebenen Anforderungen wurde ein THz Radarsystem der Fa. ZOMEGA eingesetzt, dessen hohe Bandbreite eine Entfernungsauflösung von etwa 0,5 mm bietet. Mit diesem Radarsystem wurde eine Reflexionsmessung durchgeführt, die Aufschluss über den Ort der einzelnen Kartonwände gibt, so dass nach geeigneter Signalverarbeitung auf die Wandstärke von Paketen geschlossen werden kann.

2. Das Messverfahren - Reflexionsmessung

2.1. Grundlagen

Das Messverfahren beruht auf der Reflexionsmessung von gepulsten Radarsignalen. Die Grundlage für diese Messmethode ist, dass elektromagnetischen Wellen an Grenzflächen von Wellenwiderstandsübergängen reflektiert werden. Der Wellenwiderstand Z ergibt sich

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \stackrel{\mu_r=1}{=} \frac{120\pi \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

mit der Permeabilitätszahl μ_r , der magnetischen Feldkonstante μ_0 , der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der relativen Permittivität ϵ_r . Luft besitzt wegen $\epsilon_r = \mu_r = 1$ den Wellenwiderstand des freien Raumes von $Z_0 = 120\pi \Omega$, Pappe jedoch hat einen Wellenwiderstand $Z_{Pappe} = 120\pi \Omega / \sqrt{\epsilon_r}$, wobei ϵ_r in diesem Fall die relative Permittivität der Pappe ist. Durch den Unterschied der Wellenwiderstände kommt es zu einer Reflexion der elektromagnetischen Welle beim Übergang von Luft nach Pappe. Für den Reflexionsfaktor r ergibt sich dann

$$r = \frac{Z_{Pappe} - Z_0}{Z_{Pappe} + Z_0} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Damit wird der von dem Radar abgestrahlte Puls an jeder Pappschicht reflektiert. Anhand des zeitlichen Auftretens der Reflexionen sowie der Auswertung der Art der Reflexionen können Pappkartons in verschiedene Kategorien (einwandig, zweiwandig, dreiwandig, vierwandig) eingeordnet werden. Im letzten Schritt der Signalverarbeitung kann aus der

Differenz der beiden Laufzeiten ΔT_L zwischen der Rückwand und der vorderen Wand die Wandstärke d der Pappe berechnet werden, wobei c die Lichtgeschwindigkeit angibt:

$$d = \frac{c \cdot \Delta T_L}{2} \quad (3)$$

2.2. Das Messsystem

Für die Versuchsreihen standen das Mini-Z Time Domain Spectrometer mit Reflexionsmodul der Firma ZOMEGA mit einer 120-mm-Linse, ein Femtolite Laser Controller VI der Fa. IMRA, das Dell Notebook Inspiron 1545 mit Steuerungssoftware für das Mini-Z und ein Optical Breadboard (30 cm x 30 cm) mit 2 Motoren der Fa. Thorlabs mit optischem Spiegel (7,5 cm Durchmesser) zur Verfügung.

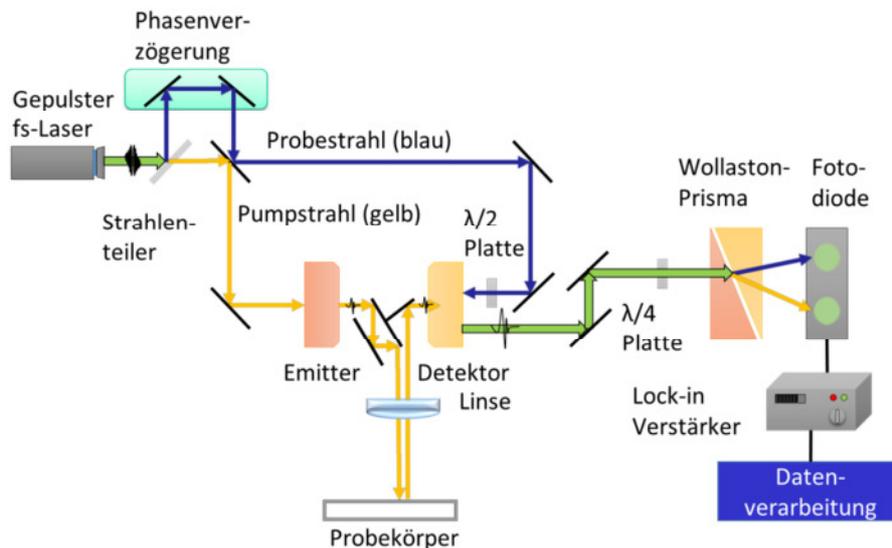


Abb. 1: Blockschaltbild THz System [1]

Bei einem THz-System erzeugt ein mit der Pulswiederholfrequenz gepulster Femtosekundenlaser einen Laserstrahl, dessen zeitlicher Verlauf für die Entfernungsmessung genutzt wird. Mit der Fourier-Transformation erhält man zusätzlich noch spektrale Informationen des Messsignals (sog. spektrale Signaturen), daher auch die Bezeichnung Time Domain Spectrometer [2]. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf einen Strahlenteiler wird der gepulste Laserstrahl in einen Probestrahl und einen Pumpstrahl aufgespalten. Der Pumpstrahl steuert den Emitter mit der Aufgabe der Erzeugung und Aussendung der elektromagnetischen Wellen (siehe Abb. 1). Die THz-Wellen werden per Reflexionsmodul, einem optischen Spiegelsystem, das Send- und Empfangssignal trennt, auf die Linse gelenkt. Das Probeobjekt, in diesem Fall die Pappkartonproben bzw. Pakete, sollten sich im Idealfall im Brennpunkt der jeweiligen Linse befinden. Beim Auftreffen der elektromagnetischen Wellen wird ein Teil der abgestrahlten Leistung an der ersten Pappwand des Pappkartons reflektiert. Der andere Teil wird transmittiert und an einer weiteren Pappschicht erneut reflektiert und transmittiert. Die unterschiedlichen zurückgelegten Weglängen verursachen unterschiedliche Laufzeiten, mit denen nach (3) die Wandstärke eines Pappkartons bestimmt werden kann. Die Reflexionen der Probe werden mittels der Linse gebündelt und auf den Empfangsteil des Reflexionsmoduls fokussiert. Die reflektierte Welle wird zusammen mit dem Probestrahl auf einen Detektor gelenkt. Das bei Auftreten eines kurzen Empfangspulses erzeugte elektrische Feld führt zu einer Elektronenbewegung, so dass ein

Stromfluss ist messbar wird [3]. Die Reflexionen der Pappe werden im Detektor auf den Probestrahl moduliert und zu einem Wollaston-Prisma weitergeleitet, welches das eintreffende Signal in zwei rechtwinklig zueinander linear polarisierte Signale aufspaltet (horizontal und vertikal polarisiert) [4]. Diese treffen auf Fotodioden, die eine Wandlung der Laserstrahlen in elektrische Signale durchführen. Das elektrische Signal wird im Anschluss dem Lock-in Verstärker übergeben.

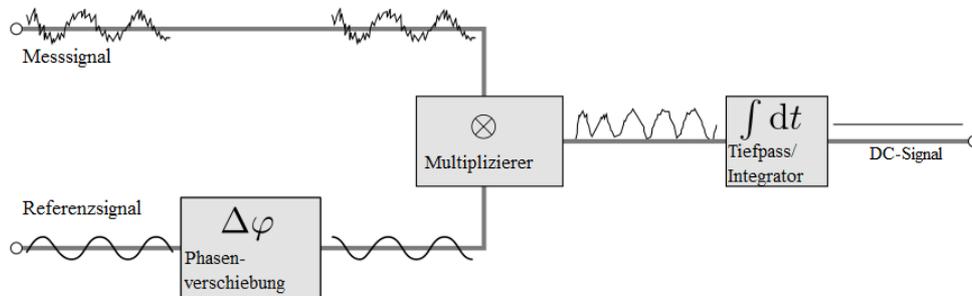


Abb. 2: Funktionsprinzip Lock-in Verstärker [3]

Der Lock-in Verstärker ist in der Lage, schwache und verrauschte Wechselsignal zu detektieren. Er nutzt einen Mischer, der beide Signale multipliziert und anschließend mithilfe eines Tiefpasses integriert [5]. Der Verstärker führt eine Kreuzkorrelation mit dem Messsignal und dem Referenzsignal durch. Nur bei Signalen gleicher Frequenz und einem Phasenunterschied ungleich 90° wird eine Gleichspannung am Ausgang erzeugt.

3. Der Messaufbau

Das Radar wurde vor der Perforationsmaschine auf einer an der Decke befestigten stoßunempfindlichen Plattform aufgebaut. Die Pakete werden auf einer Rollenbahn in Richtung Radar geführt und treffen auf einen Anschlag, so dass die elektromagnetische Welle nahezu senkrecht auf eine Pappwand fällt (siehe Abb. 3 und Abb. 4). Damit wird sichergestellt, dass die reflektierte elektromagnetische Welle wieder auf die Linse des Radars trifft und somit genügend reflektierte Leistung am Detektor zur Verfügung steht. Die Pakete verweilen etwa 3 s vor dem Radar, so dass in dieser Zeit durch den internen Integrator Leistung akkumuliert werden kann. Diese Messzeit hat damit direkten Einfluss auf den Signal-Rausch-Abstand und damit auf die Erfolgsquote einer korrekten Wandstärkenbestimmung. Darüber hinaus wurde der Abstand zwischen Linse und dem Anschlag so gewählt, dass die Pakete sich stets im Brennpunkt der Linse befinden.



Abb. 3: Übersicht Messplatz



Abb. 4: Mini-Z während des Messvorganges mit Paketanschlag

4. Datenverarbeitung

4.1. Maximal messbare Wandstärke

Zur Bestimmung der maximalen Wandstärke wurde mit dem Mini-Z eine Reflexionsmessung ohne Probe durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 5 gezeigt. Nach dem eintreffenden Sendesignal am Empfänger bei etwa 64 ps ist nach weiteren 134 ps ein weiterer Puls zu verzeichnen, der höchstwahrscheinlich durch eine geräteinterne Reflexion entsteht. Da dieser zweite Empfangspuls im realen Messsignal mit einem reflektierten Puls überlagern würde, ist eine maximale Signallaufzeit von 70 ps erlaubt, was gemäß (3) einer maximalen Wandstärke von 10,5 mm entspricht.

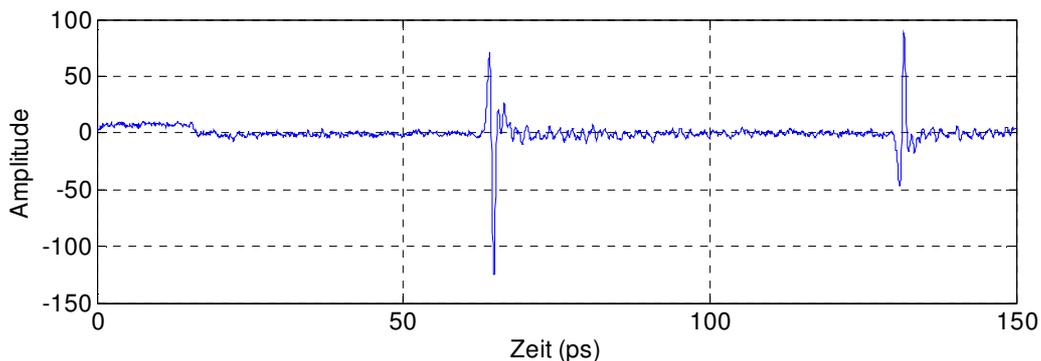


Abb. 5: Reflektiertes Sendesignal des Mini-Z mit Reflexionsmodul

4.2. Signalauswertung

Mit Matlab wurden die digitalisierten Rohdaten in einen Vektor abgespeichert. Aus dem kompletten Empfangssignal wurde ein Zeitfenster, welches einer Dicke von 10 mm entspricht, extrahiert (Abb. 6 a)) und anschließend mit einem Moving Average Filter geglättet (Abb. 6 b)). Da Reflexionen aber auch negative Signalwerte annehmen können, wurde das geglättete Signal noch quadriert (Abb. 6 c)). Nach dieser Vorverarbeitung der Empfangssignale wurde die Matlab-Funktion *findpeaks* genutzt [6]. Diese bietet die Möglichkeit, ein Signal nach einer bestimmten Anzahl (*npeaks*), Mindesthöhe (*minpeakheight*) und Mindestabstand (*minpeakdistance*) von Peaks zu untersuchen und diese dann auszugeben. Die somit gefundenen Spitzenwerte wurden in einem separaten Vektor gespeichert. Diese Peaks dienen einer ersten Einstufung der vermessenen Pappe in entsprechende Kategorien, welche sich nach der Anzahl der Pappwände unterscheiden. Wurden bei der Suche weniger als 3 Peaks gefunden, so wurde die Mindesthöhe der *findpeaks*-Funktion reduziert. Auf der einen Seite sind schwächeren Reflexionen mit dieser Vorgehensweise auch noch analysierbar, während auf der anderen Seite bei leistungsstarken Reflexionen verhindert wird, dass zu viele Peaks detektiert werden. Anschließend erfolgt eine weitere Prüfung, bei der die Amplituden einzelner Peaks zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Diese Verhältnisse werden mit empirisch ermittelten Werten verglichen, um eine korrekte Kategorisierung der Pappkartons zu erhalten. Im letzten Schritt erfolgt nach einer abschließenden Plausibilitätsprüfung aus der Laufzeitdifferenz der Peaks von Vorder- und Rückwand als Resultat die Wandstärke der Pappe. Abb. 7 zeigt exemplarisch ein vorverarbeitetes Messsignal mit gut erkennbaren Reflexionen der einzelnen Pappschichten. Ein vereinfachtes Signalfussdiagramm der Prozessierung der Messdaten ist in Abb. 8 dargestellt.

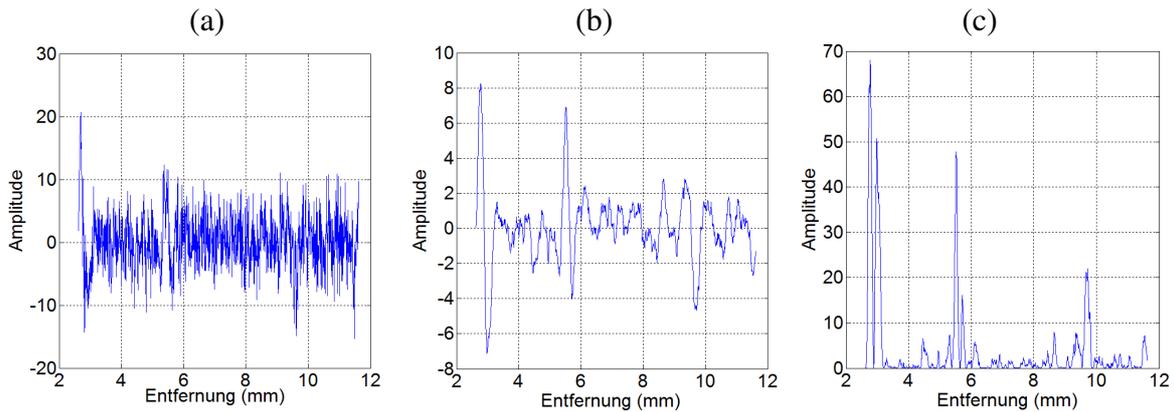


Abb. 6: a) Rohdaten b) Moving Average gefiltertes c) quadriertes Signal einer 3-wandigen Papp

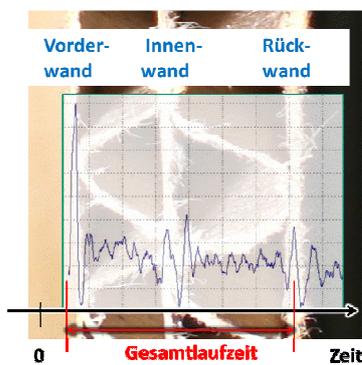


Abb. 7: Empfangssignal mit Zuordnung der Einzelreflexionen

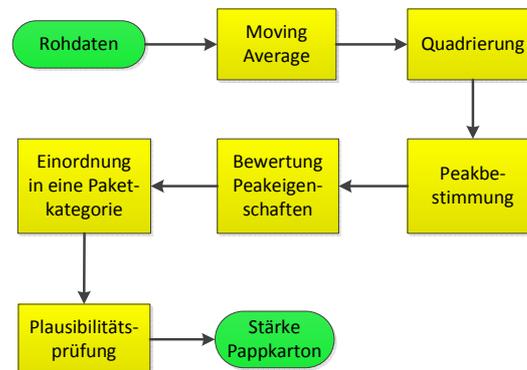


Abb. 8: Vereinfachtes Signalflussdiagramm

5. Ergebnis

Zur Verifikation der entwickelten Signalverarbeitungsmethoden wurde eine Vielzahl von Messungen im operativen Betrieb durchgeführt. Um eine korrekte von einer unkorrekten Bestimmung der Wandstärke zu unterscheiden, wurden die in Tabelle 1 gezeigten Toleranzbereiche definiert. Dabei entspricht Δd der Differenz der gemessenen und der tatsächlichen Wandstärke. Der akzeptable Bereich wurde im positiven Toleranzbereich bis 2 mm ausgedehnt, während im negativen nur 0,9 mm Abweichung zugelassen sind. Hintergrund dafür sind die unterschiedlichen praktischen Anforderungen an die Perforation. Wird eine Pappwand zu dick geschätzt und damit zu tief perforiert, so ist prinzipiell die Perforation zunächst erfolgreich. Da die Ware in der Regel einen Sicherheitsabstand von einigen Millimetern zur Pappwand hat, wird diese auch nicht beschädigt. Wird hingegen zu dünn geschätzt, so wird die nachfolgende Perforation unzureichend oder gar nicht durchgeführt.

Insgesamt ergab sich nach Auswertung aller Messungen eine Erfolgsquote von 73%. Eine detailliertere Aufstellung der Ergebnisse zeigt Abb. 9. Pappen, bestehend aus 2 Wänden, tendierten zu dick und Pappen mit 4 Wänden zu dünn gemessen zu werden. Ursache für die zu dicken Wandstärken bei Pappen mit 2 Wänden waren zusätzliche Trennpappen zwischen Waren und Karton oder Schuhkartons innerhalb der Pakete. Die zu dünne Einordnung der Pappen mit 4 Wänden beruht auf der Parameterwahl zur Kategorisierung, um eher dünner zu messen und damit das Risiko einer Warenbeschädigung zu minimieren. Mehrfachreflexionen zwischen einzelnen Pappwänden, die im Empfangssignal zu Geister-

zielen führen könnten, konnten aufgrund der geringen Reflexionsfaktoren sowie der geringen Signal-Rausch-Abstände nicht detektiert werden.

Tabelle 1: Übersicht der Toleranzbereiche; $\Delta d < 0$: zu dünn perforiert, $\Delta d > 0$: zu dick perforiert

| Δd in mm | Kategorie |
|------------------|------------------------------|
| -0,3 bis +0,3 | sicher erkannt |
| +0,4 bis +0,9 | positiver Toleranzbereich |
| -0,4 bis -0,6 | negativer Toleranzbereich |
| +1,0 bis +2,0 | positiver kritischer Bereich |
| -0,6 bis -0,9 | negativer kritischer Bereich |
| > +2,0 | inakzeptabler Bereich |
| < -0,9 | inakzeptabler Bereich |

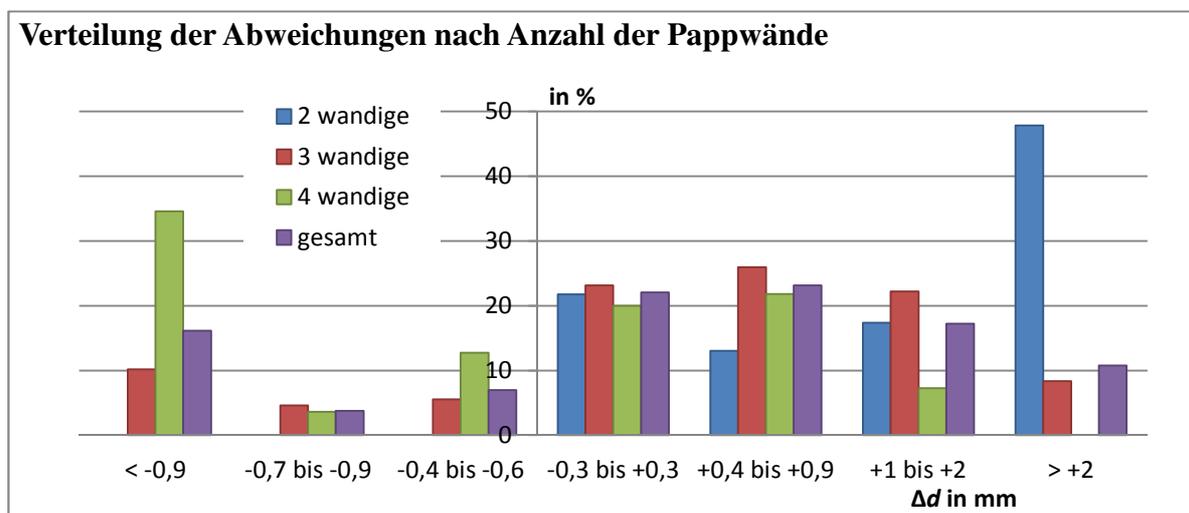


Abb. 9: Verteilung der Abweichungen nach Toleranzkategorie

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Bestimmung der Wandstärke bei Verwendung eines gepulsten THz Radarsystems mit 73% Erfolgsquote die Erwartungen übertroffen hat; vor allem vor dem Hintergrund, dass für die Messungen ein Laborsystem verwendet wurde, welches nicht für den Einsatz in einer industriellen Umgebung optimiert worden war. Allgemein bietet dieses Verfahren einen entscheidenden Vorteil: Die berührungslose Messung kann im operativen Betrieb stattfinden, und zwar ohne zusätzliche Eingriffe in Transport- bzw. Produktionsprozesse. Jedoch kann dieses Messprinzip auch an seine Grenzen gelangen. Dazu zählen beispielsweise Reflexionen von Objekten im Inneren des Paketes, die von der Reflexion der Rückwand schwer zu differenzieren sind (besonders bei Pappkartons innerhalb eines Paketes). Weitere Problemfelder sind die derzeit noch teils zu hohen Kosten kommerziell verfügbarer THz-Systeme sowie die benötigten Messzeiten von etwa 3 Sekunden, um einen genügend hohen Signal-Rausch-Abstand im Empfangssignal zu gewährleisten. Diesen Herausforderungen wird aber mit Sicherheit in Zukunft mit neuer Sensortechnologie begegnet, die nach und nach die technologisch bedingte „THz-Gap“ schließt [7]. Dazu zählen u.a. rauschärmere Empfänger, höhere Sendeleistungen, finanziell günstigere Einzelkomponenten, stoß- und verschmutzungsunempfindlichere Optiken, integrierbare Systemschnittstellen sowie adaptive Messgeschwindigkeiten. Seitens der

Signalverarbeitung könnte eine Datenbank mit Probemustern angelegt werden, mit der eine Korrelation mit den Messdaten bzw. eine Mustererkennung bis hin zu selbstlernenden neuronalen Netzen durchgeführt werden kann. Damit würde sich die Genauigkeit der Einordnung der Pappen nach der Anzahl der Wände spürbar erhöhen lassen. Eine Verbesserung dieser Einordnung könnte auch dadurch erreicht werden, wenn an mehreren Stellen des Paketes gleichzeitig gemessen wird, um anschließend eine Mittelung durchzuführen.

7. Referenzen

- [1] M. Demming, D. Nüßler, „Rekonstruktion der Dicke der einzelnen Kartonagen - Erste Ergebnisse“, Fraunhofer FHR, interne Präsentation
- [2] F. Ellrich, J. Klier, J. Jonuscheit, „Terahertz-Wellen – ein neuer Spektralbereich für die industrielle Messtechnik“, Technisches Messen 77 (2010) 9. http://www.physik.uni-kl.de/fileadmin/beigung/PDF_zum_download/Ellrich2010.pdf
- [3] „Amts- und Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Berlin“ 120. Jahrgang, Heft 3, September 2010 http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/mitteilungen/2010/PTB-Mitteilungen_2010_Heft_3.pdf
- [4] H.-J. Gevatter und U. Grünhaupt, „Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion“, Springer-Verlag, 2. Auflage, 2006
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Lock-in-Verstärker>
Zelbar, Christian Nölleke, „Lock-In-Amplifier“, lizenziert unter CC BY-SA 3.0 über Wikimedia Commons - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lock-In-Amplifier.svg#/media/File:Lock-In-Amplifier.svg>
- [6] Dokumentation und Hilfe zu MATLAB, www.mathworks.com.
- [7] M. Walther, A. Ortner, A. Bitzer, A. Thoman, J. Wallauer, S. Waselikowski, H. Helm, B. Fischer, „Chemische Analytik und Bildgebung mit gepulster Terahertz-Strahlung“, Online-Labormagazin analytic-news.de.
http://frhewww.physik.uni-freiburg.de/terahertz/frames/pdf/Conferences2009_WaltherAnalytikNews.pdf

Berührungslose Messung der Stärke von Pappkartons mit einem gepulsten THz-Radarsystem für die automatisierte Perforation

Sebastian Hantscher¹, Mathias Lange¹, Matthias Demming²

¹Hochschule Magdeburg-Stendal, Institut für Elektrotechnik, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

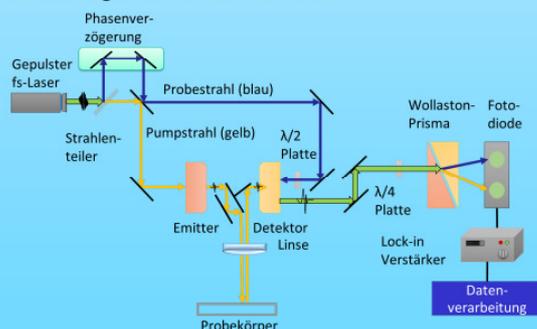
²Fraunhofer FHR, Fraunhoferstraße 20, 53343 Wachtberg

1. Problemstellung

In einem Logistikunternehmen werden an den unterschiedlichsten Orten Kartonagen geöffnet oder zur Öffnung vorbereitet (perforiert). Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keine industrietauglichen Verfahren, mit denen die Kartonstärke vorher gemessen wird, um auf Basis dieses Ergebnisses eine automatische Öffnung / Perforation individuell je Kartonnorm und Kartonstärke automatisch vorzunehmen. Dies wäre aber eine Möglichkeit, um einerseits eine ausreichende Perforationstiefe zu erzielen und andererseits maximal wahrenschonend zu arbeiten.

2. Warum ein THz-Radarsystem verwenden?

Der entscheidende Vorteil für den Einsatz eines Radarsystems liegt in der berührungslosen Messung der Kartonstärke. Das Funktionsprinzip beruht auf der Reflexion der abgestrahlten elektromagnetischen Wellen an den einzelnen Pappschichten, da deren relative Dielektrizitätskonstante größer ist als die von Luft.



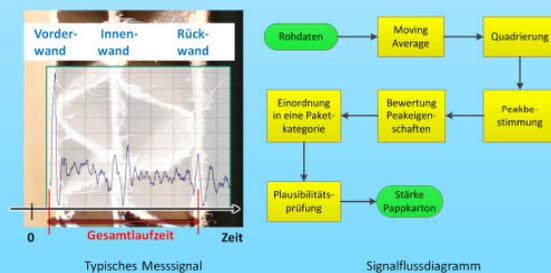
Für die Durchführung der Messung wurde das Mini-Z der Fa. ZOMEGA verwendet. Es erzeugt kurze THz-Pulse von lediglich 3 ps Dauer. Damit lässt sich eine Auflösung von 0,5 mm erzielen, so dass einzelne Pappschichten im Messsignal von einander separiert werden können.

3. Messaufbau und Analyseprogramm



Messaufbau

Da die Leistungen einzelner Reflexionen sich oft nah an der Rauschgrenze befinden, ist eine einfache Erkennung im Messsignal oft nicht möglich. Daher werden Eigenschaften wie u.a. Peakhöhe und Peakabstand verwendet, um eine Signalklassifikation durchzuführen, wodurch jedes Paket in eine Paketkategorie eingeordnet wird.



4. Zusammenfassung

- Korrekte Bestimmung der Wandstärke bei 73% der Pakete innerhalb eines vorher festgelegten Toleranzbereiches.
- Fehlmessungen treten u.a. durch unzureichenden Signal-Rausch-Abstand auf. Außerdem können Pappkartons in Kartonagen das Ergebnis verfälschen.