

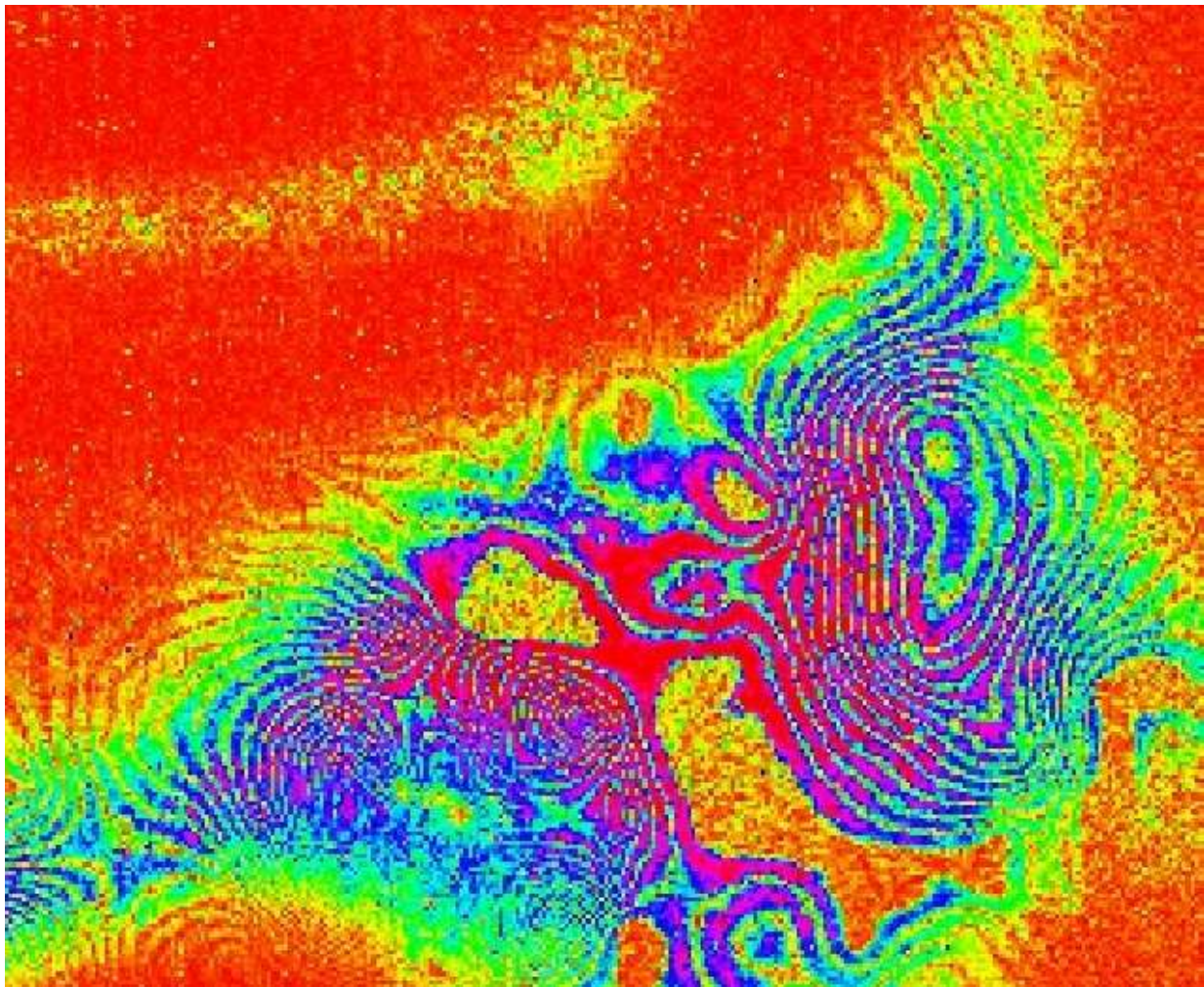
Irscat.ch

Optical Tomography

Gottfried Kellerstrasse 2
CH – 6010 Kriens
Tel.: +41 (0)76 578 05 07
floir@sunrise.ch
www.irscat.ch



Optische Tomografie in der Siegelnahtinspektion!



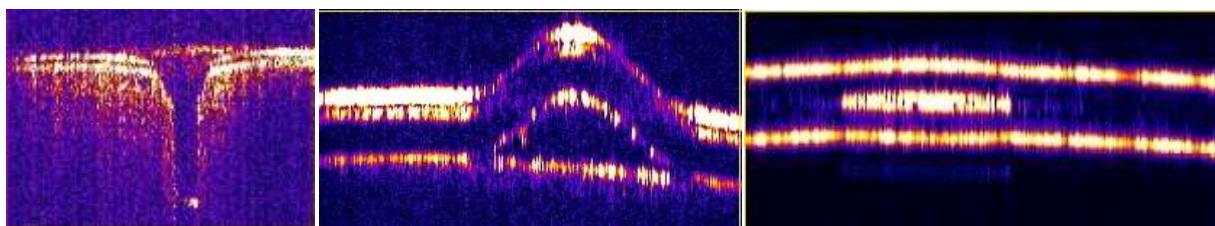
Eine der wichtigsten Aufgaben der Siegelnaht ist die Sicherstellung, dass das verpackte Produkt in der vorgesehenen Zeit nicht verrottet und keinen Schaden nimmt. Die optische Tomografie löst diese Aufgabe mit Lichtgeschwindigkeit, ohne jegliche Berührung und sehr genau.

Einleitung

Um die Menschen, die in Städten und Ballungszentren wohnen auch in Zukunft ernähren zu können, müssen Lebensmittel so verpackt werden, dass sie von der Ernte bis zum Verbraucher vor dem Verderben geschützt sind.

Weil ein Fünftel der Fleischproduktion auf der Welt weggeworfen wird und jährlich etwa 1,3 Milliarden Tonnen verdorbene Nahrungsmittel und Getränke unverbraucht entsorgt werden, ist es unabdingbar, eine fehlerlose Versiegelung verpackter Lebensmittel zu gewährleisten.

Optimierte Produktionsprozesse laufen täglich 24 Stunden und müssen deshalb kontinuierlich und mit grosser Geschwindigkeit überwacht werden, damit ein eventueller Ausfall klein gehalten werden kann. Ausschlaggebend dabei ist auch eine fehlerlose Versiegelung einer Verpackung. Die optische Tomografie bietet sich an, weil das Verfahren eine Überwachung komplexer Produktionsprozesse mit Lichtgeschwindigkeit erlaubt, berührungslos arbeitet, feinste Strukturen auflöst und weder auf Licht aus der Umgebung noch auf die Farbe des zu prüfenden Objektes oder auf Vibrationen reagiert.

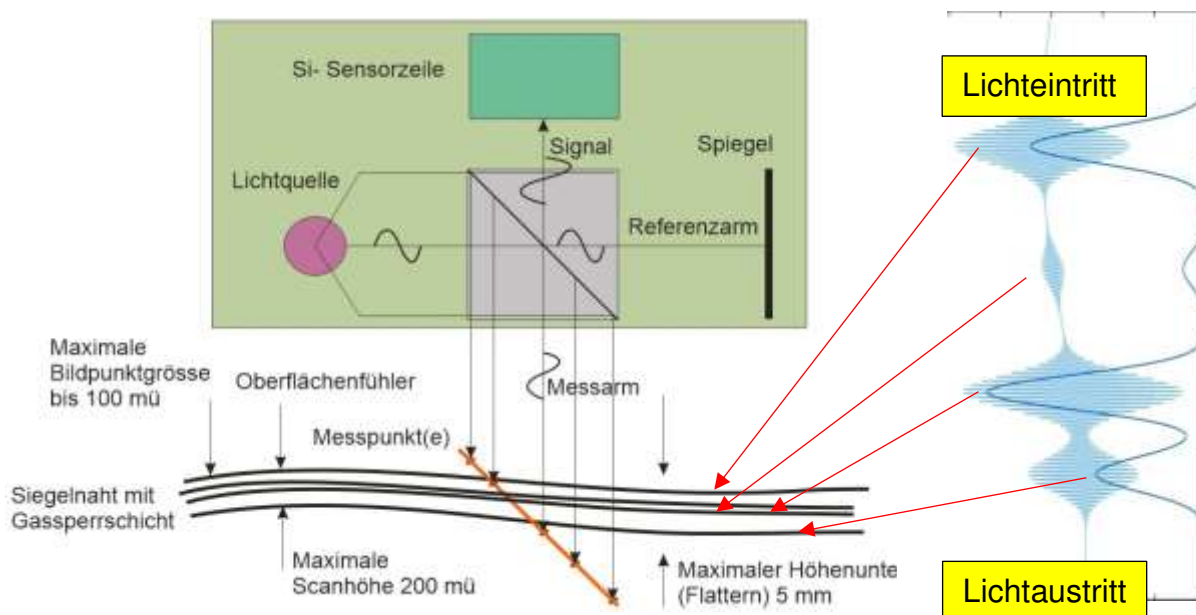


Mikroloch

Siegfelher

Delamination

Mit der optischen Tomografie Verfahren werden kontinuierlich Mikrolöcher festgestellt, eingeschweisste Partikel, Fasern oder Haare erkannt und auch Haftungsfehler oder Ablösungen von Deckfolien lokalisiert.

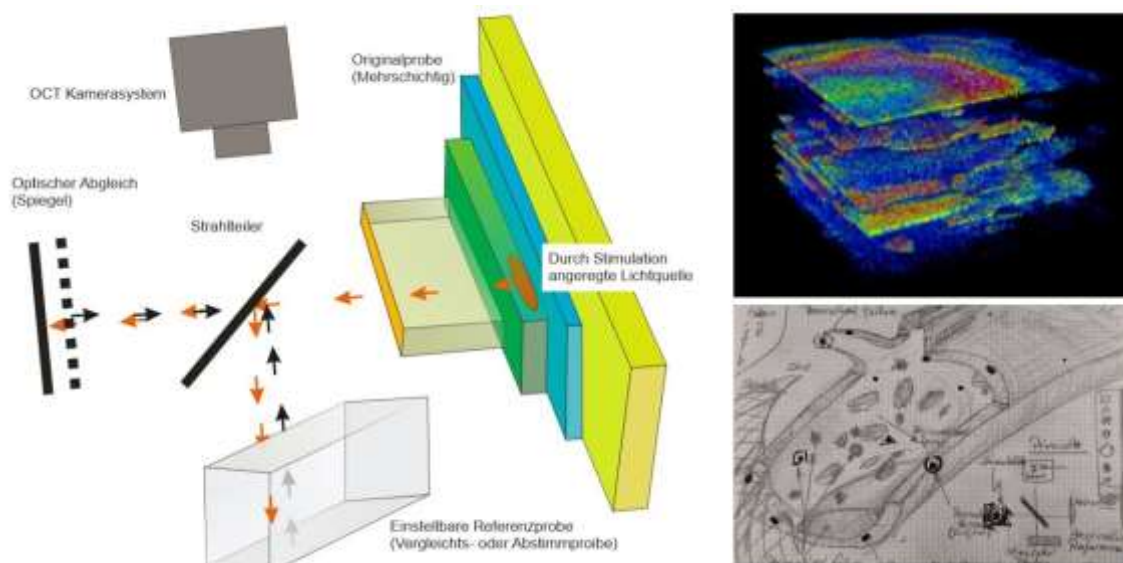


Bei der optischen Tomografie wird Licht aus dem Referenzarm mit dem Licht aus dem Messarm verglichen. Am Strahlteilerprisma interferieren die Lichtstrahlen aus dem Referenzarm und aus dem Messarm als Funktion der optischen Eigenschaft aus dem betrachteten Objekt. Das Verfahren ist sehr robust und deshalb für den Einsatz in der

Industrie geeignet. Als Resultat aus der optischen «Real Time Tomography» wird eine qualitative Information über einen definierten Tiefenabschnitt zu einem festgelegten Kriterium erzeugt. Das gemessene Signal wird über die Laufzeit des Lichts im untersuchten Bereich zum Beispiel als Schichtfolge in der Siegelnaht rekonstruiert.

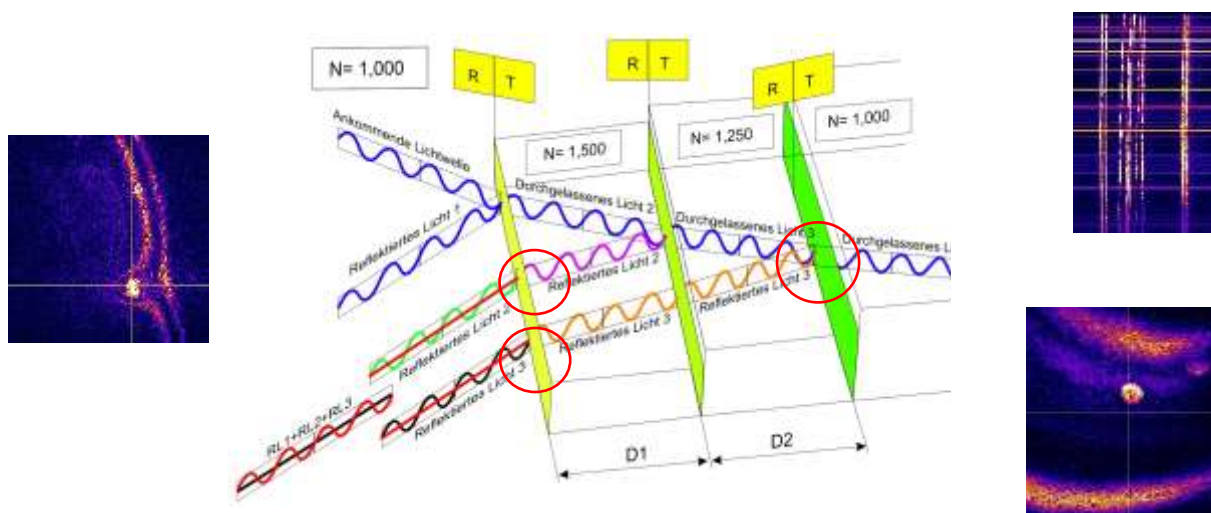
Öptische Tomografie

Die optische Tomografie basiert auf dem Michelson Interferometer, wobei auch andere Interferometer im Markt vertreten sind. Mit der Interferometrie wird die Flugzeit von Photonen gemessen und mit einem Referenzstrahl verglichen, sodass Rückschlüsse auf die Untersuchungsebene gezogen werden können.



Grundprinzip

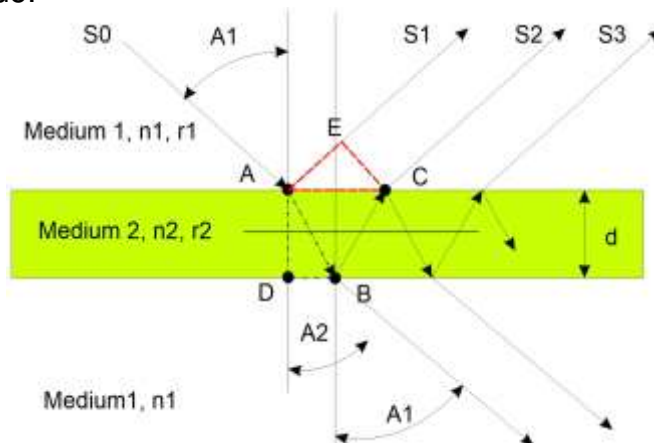
Für vollflächige OCT Messung sind verschiedene Anordnungen der Sensortechnik möglich. Von einer monochromen Lichtquelle wird eine Lichtfront ausgesendet. Die Lichtfront gelangt auf den Strahlteiler, von dem eine Hälfte auf einen Spiegel, die andere Hälfte auf das Objekt gelenkt wird. Am Spiegel wird die Lichtwelle vollständig um π gedreht und wieder zum Strahlteilerprisma zurückreflektiert.



Der Teil des Lichts, der auf das Objekt gelangt, wird dort reflektiert, absorbiert und/oder durchgelassen. Setzen wir keine Absorption voraus, genügt es, nur den periodisch schwingenden durchgelassenen Teil des Lichts zu registrieren, um eine Aussage zur

durchstrahlten Strecke – also zur Dicke der durchstrahlten Schicht - zu machen, weil der reflektierte Anteil nur um π gedreht wird.

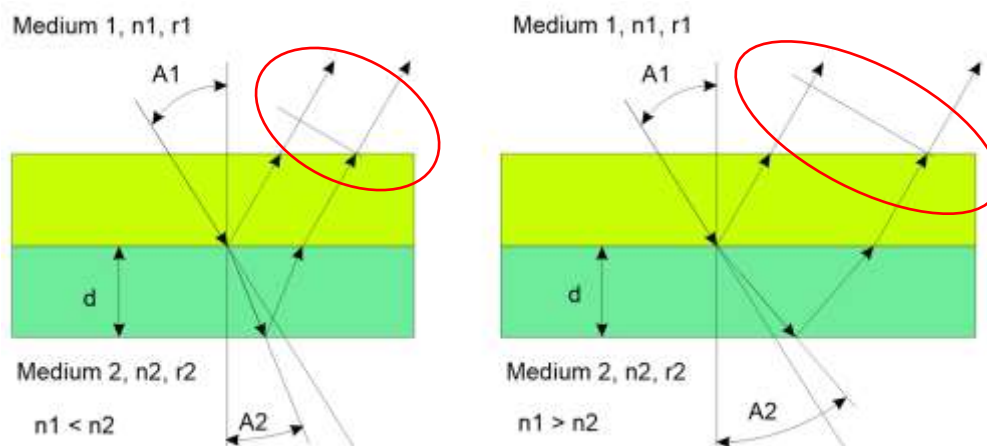
In der Grafik steht R für Reflektion und T für Transmission. Mit N ist der Brechungsindex des Materials bezeichnet und mit D die Dicke der Schicht, die vom Messlicht durchstrahlt worden ist. Die ausgesendete Lichtwelle bleibt in ihrer Frequenz immer erhalten. Es ergeben sich aber aufgrund der optischen Materialeigenschaft zeitliche Unterschiede.



Die zeitlichen Unterschiede sind:

- Die Lichtfront, die vom Spiegel reflektiert wird und die Lichtfront die von der Oberfläche des Objektes kommt, interferieren am Strahlteiler als Funktion der Eigenschaften im Objekt. (Abstand, optische Eigenschaft).
- Die Lichtfront, die vom Objekt (Trennstelle zwischen zwei Schichten) zurückgeworfen wird, beeinflusst die von der Objektoberfläche reflektierte Lichtwelle um den Gangunterschied, was am Strahlteiler zu einer Veränderung der Helligkeit des Interferenzmusters führt. Das Interferenzmuster beinhaltet neben dem Brechungsindex auch die Dicke der Schicht oder optische Eigenschaften.

Tatsächlich lassen sich die Ortslage der Oberfläche eines Objektes erkennen und aus dem Gangunterschied (Grafik oben, Strecke CE) die Dicke oder die „Signalveränderung“ in einer Schicht oder in einer Siegelnaht.



Sind die Brechungsindices nicht bekannt, werden zwei monochrome Lichtquellen eingesetzt. Die Grafik zeigt gleiche Schichtdicken, jedoch ungleiche Brechungsindices. Der Gangunterschied ist sehr deutlich. Der Gangunterschied (im roten Kreis) ist im Gegensatz zur Reflektion eine periodisch veränderliche Größe und eindeutig eine Funktion der Schichtdicke.

Das Array

Zur Extraktion der Interferogramm- Merkmale wenden wir das Time-of-Flight Prinzip (TOF) an. Die Sensorarchitektur bietet die Demodulation des optischen Signals innerhalb eines Bildpunktes mit bis zu 2 kHz und in der Folge die Rekonstruktion der Amplitude sowie ihrer Phase. Diese Eigenschaft ermöglicht es, Tomogramme mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Damit die zeitabhängigen Interferogramme entstehen, ist eine Lichtquelle im Strahlengang (LED oder SLD) eingebaut. Die optische Weglängendifferenz wird auf dem Sensor durch Bewegung des Referenzspiegels (TD) oder mit einer durchstimmbaren Lichtquelle (FD) erzeugt.

Das amplitudenmodulierte optische Signal und deren Trägerfrequenz sind proportional zur Abtastgeschwindigkeit. Das Signal enthält die Tiefeninformation zu jedem Bildpunkt. Jedes Maximum der Signalhüllkurve entspricht einer Reflexion im Inneren der geprüften Struktur. Das Array erzeugt gleichzeitig mehr als 100000 axiale Interferogramme.

An Stelle eines zweidimensionalen Arrays kann auch ein Zeilen- oder Punktsensor eingesetzt werden. Die Abtastgeschwindigkeit ist im Vergleich zu OCT Anlagen, die mit Standardkameras ausgerüstet sind, um zwei Zehnerpotenzen höher. Die Signaldemodulation zur Detektion der Hüllkurve ist nicht durch die Bildrate begrenzt. Fällt ein optisches Signal auf einen Bildpunkt, wird ein elektrisches Signal erzeugt. Der Hintergrund wird infolge der Kohärenzlänge ausgeblendet. Die Sättigung der Pixel durch eine hohe Lichtstärke wird konsequent vermieden. Das abgetastete Signal wird laufend integriert und durch ein Signal gleicher Frequenz multipliziert und über zwei Pfade, deren Phase um $\pi/2$ gegeneinander verschoben ist, gemittelt.

Die Ausgänge der beiden Wege werden zum Prozessor geleitet, wo die Hüllkurvenamplitude oder deren Phase berechnet und ein dreidimensionales Bild erzeugt werden.

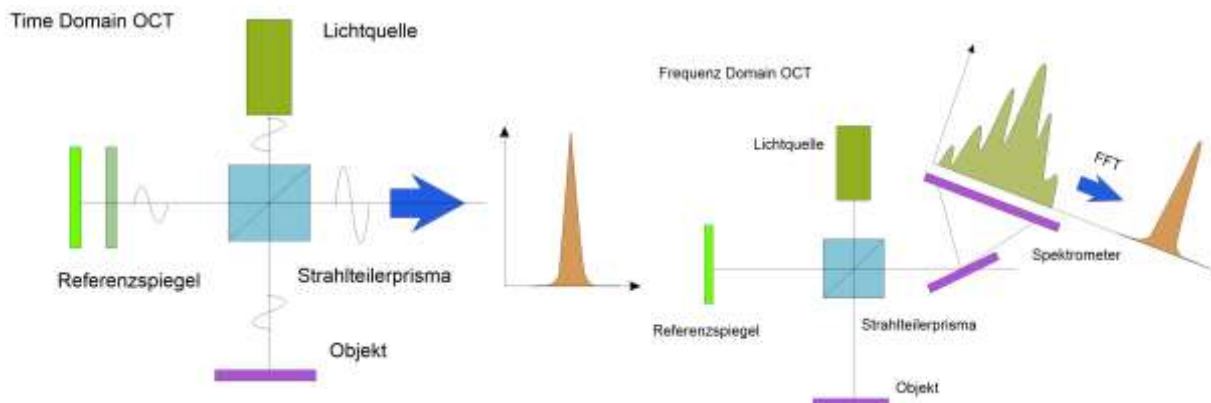
Das neue Messwerkzeug für die heutige Industrie.

Das OCT Verfahren ist für die industrielle Prozessüberwachung noch wenig bekannt. Heute, mehr als 10 Jahre nach der Entwicklung neuer Sensorkonzepte, sind viele Anwendungen soweit untersucht, dass das OCT Verfahren auch in industriellen Prozessen für die Echtzeitkontrolle und für die kontinuierlichen Inspektionen laufender Produktionsprozesse integriert werden kann. Mit einem Standard Sensor Array werden viele Axialscans nacheinander erfasst und einander überlagert. Die Signaldemodulation zur Hüllkurvenextraktion ist bei Standard- Systemen durch die Bildrate des Kamerasystems begrenzt. Die Ausgänge der beiden Pfade werden vom Sensor Array zum PC übertragen, wobei die Hüllamplitude und deren Phase berechnet und daraus die dreidimensionale halbtransparente Darstellung der Probe erzeugt werden.

Unterschiedliche OCT Verfahren

Aufgrund der Verknüpfung der Autokorrelation mit dem Frequenzspektrum einer Funktion über die Fourier Transformation gilt im optischen Bereich die gleiche Beziehung zwischen dem optischen Spektrum und dem Interferenzsignal. Deshalb spricht man vom Signal im Zeitbereich (time domain, TD) oder vom Signal im

Frequenzbereich (frequency domain, FD). Einfach ausgedrückt bedeutet dies, dass man entweder den Referenzarm in der Länge verändert und kontinuierlich die Intensität der Interferenz misst (time domain, Grafik links), oder die Interferenz der spektralen Komponente (frequency domain, Grafik rechts).



Eine Variante des FD-OCT nimmt die spektralen Komponenten zeitlich nacheinander auf, indem die Wellenlänge der Strahlungsquelle (z.B. von 400 nm bis 1000 nm) durchgestimmt wird (swept source, SS). Bei der SS-OCT Methode sind keine beweglichen Teile enthalten. Sie benötigt aber eine spektral durchstimmbare Lichtquelle.

Der Vorteil der FD-OCT Verfahren liegt in der einfachen, schnellen und parallelen Signalerfassung. Man erfasst simultan die vollständige Information über die Tiefe ohne ein mechanisch bewegtes Bauteil im Messkreis. Die Stabilität der Messung wird so verbessert und die Geschwindigkeit des Verfahrens deutlich erhöht. Man kann den Unterschied der Verfahren auch darin sehen, dass TD-OCT in jedem Messpunkt die Gesamtleistung des Referenz- und des Messarmes aufnehmen muss, obwohl der Anteil, der interferieren kann, nur einen kleinen Teil der Gesamtstrahlung ausmacht und deshalb das Rauschen des Gesamtsignals gegenüber dem Nutzanteil oft überwiegt.

Bei Aufnahme der Signale im Frequenzbereich (FD-OCT) wird in jedem spektralen Kanal nur die spektrale Leistung als Hintergrund gemessen, womit die Störungen aus den anderen spektralen Bereichen verlorengehen. Die notwendige Dynamik des Detektors sinkt mit der Gesamtleistung pro Kanal, weshalb beim FD-OCT Verfahren bei gleicher Empfindlichkeit nur ein Bruchteil der Lichtleistung erforderlich ist. FD-OCT Verfahren sind effektiver als TD-OCT.

Die Abtastrate im Frequenzbereich ist über die Fourier-Transformation mit der Messtiefe verknüpft. Eine höhere Abtastrate bzw. eine höhere Anzahl Bildpunkte eines Detektors innerhalb des gleichen Spektralbereiches erhöht also den Bereich, in dem mehrere Objekte eindeutig voneinander unterschieden werden können.

Methoden zur Signalerfassung

Es bestehen viele Methoden zur Signalerfassung. Die holografischen Verfahren sind das räumliche, transversale Pendant zum longitudinalen, zeitlichen Frequenzbereich der optischen Laufzeit. Es besteht also eine Fourier-Beziehung zwischen longitudinaler Laufzeit und der zeitlichen Frequenz sowie zwischen der transversalen Auslenkung und transversaler Ortsfrequenz. Prinzipiell unterscheidet man zwei

Untergruppen, bei denen einerseits das Signal zeitlich kodiert wird (time coded), also sequentiell aufgenommen wird, oder räumlich kodiert (patially coded), also räumlich aufgespalten, aber simultan aufgezeichnet wird. Die FD-Verfahren vergeuden kein Licht und besitzen eine höhere Empfindlichkeit als TD- OCT Verfahren. Ziel ist es, eine hohe Sensitivität, unter Einsatz möglichst weniger beweglicher Komponenten zu erreichen und damit eine möglichst hohe Abtastgeschwindigkeit.

Andererseits ist die Phasenkohärenz besser bei den potenziell langsameren TD-Verfahren. Darüber hinaus kommt es auf die Ausrichtung der Rastermethode und der Rasterdichte an, was durch SD- Systeme nur schwer geliefert werden kann.

Zusätzlich zur topografischen Information können weitere Daten aus dem Ursprungssignal ausgewertet werden. So kann über Messung mehrerer aufeinanderfolgender Tomogramme an der gleichen Stelle die lokale Dopplerverschiebung zur Geschwindigkeitsmessung oder zur Messung der Temperatur herangezogen werden (Doppler OCT). Darüber hinaus können verschiedene Materialeigenschaften wie Streuung, Absorption, Polarisationsveränderung und Dispersion ermittelt und dargestellt werden.

Der technologische Vorteil der OCT ist die Entkopplung der Tiefenauflösung von der Auflösung in der Ebene. Die rein auf optischer Reflexion basierende und damit berührungslose Messung erlaubt den Wegfall der in der Mikroskopie angewandten Dünnschnitte. Aufgrund der hohen Selektivität können noch sehr kleine Signale (unterhalb von Nanowatt) detektiert und einer Tiefe, bei geringsten Eingangsleistungen noch sicher zugeordnet werden.

Damit eignet sich dieses Verfahren auch sehr gut, um lichtempfindliche Strukturen zu untersuchen. Der Einsatz der OCT Methode ist durch die wellenlängenabhängige Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in das Untersuchungsobjekt sowie durch die Auflösung begrenzt. Hochentwickelte Breitbandlaser ermöglichen den Bau hochauflösender OCT Systeme mit einer Tiefenauflösung von Bruchteilen von Mikrometern. Sie ermöglichen die Darstellung biologischer Zellen, was in der Umwelttechnologie und in der Behandlung der Abwässer eine immer grösser werdende Bedeutung erlangt.

Die OCT Methode ist relativ jung und beginnt sich derzeit im industriellen Umfeld zu etablieren. Die geringe Belastung des Untersuchungsobjekts, die hohe Auflösung und zunehmende Geschwindigkeit machen das Verfahren sehr attraktiv zur Überwachung industrieller Produktionsprozesse. Neue Lichtquellen, Detektoren und Scanner werden es künftig erlauben, hochaufgelöste dreidimensionale OCT Bilder bewegter Objekte aufzunehmen. Derzeitige OCT Systeme erreichen bis zu 250 Megavoxel pro Sekunde, wobei der Stand im Jahre 2000 noch unterhalb von 100 Kilovoxel pro Sekunde lag. Die Hochgeschwindigkeits-OCT mit geringerer Empfindlichkeit erreicht heute durch parallele Detektion bereits 60 Gigavoxel pro Sekunde. Während ein Pixel mit den Koordinaten x und y definiert ist, ist ein Voxel mit dem x,y, und z- Wert sowie mit der „Durchsichtigkeit“ des Bildpunktes festgelegt.

Verfahrensauslegung

Um eine maximale Inspektionsgeschwindigkeit und grössere Messtiefen für eine vollflächige Inspektion von Siegelnähten zu erreichen, bestehen für den Einsatz des OCT Verfahrens in der industriellen Produktion verschiedene Möglichkeiten.

Dynamisch einsetzbare Verfahren verwenden Gitter, um die hohen Raumfrequenzen eines Interferogramms zu reduzieren und damit kostengünstigere Bauteile, die heute schon verfügbar sind, einzusetzen. Eine Übersicht der bestehenden OCT Verfahren ist in der folgenden Tabelle enthalten.

		Methode der Signalabtastung	
		Zeitdiskret	Parallel
Art des Signals	Spektrum (Spektral Domäne)	Swept source OCT (SS-OCT)	Spektralradar (FD OCT)
	Kohärenzfunktion (Ortsdomäne)	Time domain OCT (TD-OCT)	Lineare OCT (LOCT)

Unterschieden wird die Art der erfassten Informationen nach den Messungen (TD-OCT oder FD-OCT). In der oben stehenden Tabelle sind die verschiedenen OCT Verfahren nach der Art der Messdatenerfassung, als zeitabhängige Grösse oder als räumliche Intensitätsmodulation im Fall des Spektralradars aufgeführt. Durch diese Systematik ergibt sich noch eine vierte Möglichkeit zur Erfassung von OCT Signalen, bei der die Signale in der Ortsdomäne mittels eines räumlich ausgebreiteten Sensors erfasst werden. Dieses bisher weniger beachtete Verfahren wird als „Lineares OCT Verfahren“ bezeichnet.

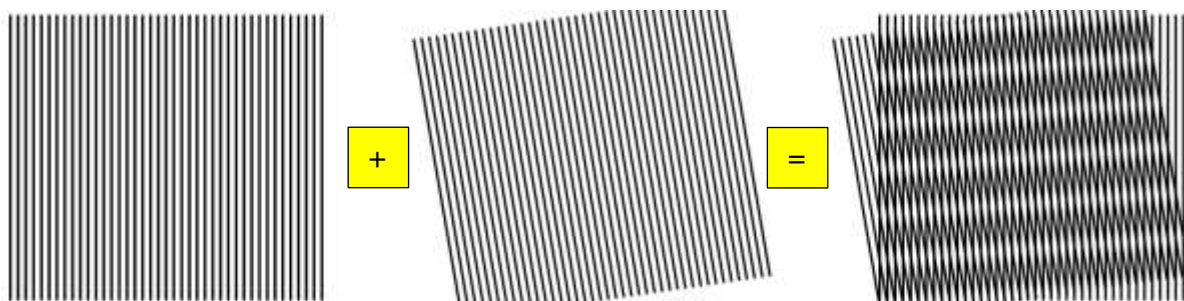
Weil mit den Phasenmodulatoren von TD-OCT Systemen keine für eine breite Nutzung hinreichende Messgeschwindigkeit realisiert werden kann wurden für den Einsatz zur Siegelnahtinspektion auch die parallele zeitdiskrete Signalabtastung (SS-OCT) oder das Spektralradar (FD-OCT) untersucht.

Werden durch Multiplikation der Raumfrequenz mit einer Transmissionsmaske Summen- und Differenzfrequenzen erzeugt, kann durch die geeignete Wahl der Maskenfrequenz die Differenzfrequenz so niedrig eingestellt werden, dass die Einhüllende der Interferenz mit wenigen Pixeln abgetastet werden kann. Wird ein Bildsensor im Fernfeld eines Phasengitters platziert und die Detektoroptik so eingerichtet, dass sich auf dem Sensor die erste Beugungsordnung des Referenzstrahls mit der nullten Beugungsordnung des Probenstrahls unter einem kleinen Winkel überlagert, führt dieser Aufbau zu einer Kippung der Phasenfronten des Referenzlichts. Bei Erhalt der Gruppenfront wird die Modulationsfrequenz um die Gitterfrequenz reduziert. Dem Vorteil des einfachen Aufbaus der Nachweisoptik, die nur aus einer Zylinderlinse und dem Bildsensor selbst besteht und den Bau kostengünstiger Geräte ermöglicht, steht eine niedrigere Bildqualität gegenüber.

Optisches Mischen mit Transmissionsgitter

Das Prinzip des Mischens mit periodischen Strukturen ist in der Optik unter dem Begriff Moire-Muster bekannt. Um dieses Prinzip für das OCT Verfahren zu nutzen, sitzt vor dem Bildsensor ein Transmissionsgitter mit einem sinusförmigen Transmissionsprofil in der Richtung der Sensorausdehnung. Proben- und Referenzlicht werden einander unter relativ grossem Winkel auf dem Gitter überlagert, sodass eine grosse Laufzeitdifferenz und Messtiefe erreicht wird. Wenn die Gitterfrequenz so eingestellt wird, dass sie in der Nähe der Trägerfrequenz der Intensitätsmodulation liegt, entstehen hinter dem Gitter, bzw. auf dem Sensor relativ niederfrequente Differenzfrequenzen. Diese können nun mit einem Sensor mit wenigen Bildelementen

abgetastet werden. Allerdings entstehen beim Mischen noch Terme mit höheren Frequenzen, die in den aus der Nachrichtentechnik bekannten Empfängern durch einen Tiefpassfilter unterdrückt werden können.



Messwertaufnehmer

Als primärer Messwertaufnehmer hat der Bildsensor bei den OCT Systemen mit räumlichem Nachweis einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Gesamtsystems. Die Kriterien für die Auswahl eines zur Lösung der Aufgabenstellung geeigneten Sensors wurden mit verschiedenen Sensoren betrachtet.

Type	Type no.	Page	Spectral response range (µm)												
			0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	
Short-wavelength enhanced type	G10899 series	9	Non-cooled type (0.9 to 1.7 µm)												
	G12180/G8370 series		Non-cooled type (0.9 to 1.7 µm)												
	G11193 series		Non-cooled type (0.9 to 1.7 µm)												
	G8941 series		Non-cooled type (0.9 to 1.7 µm)												
Standard type	COB	10	One-stage TE-cooled type (0.9 to 1.67 µm)												
			Two-stage TE-cooled type (0.9 to 1.85 µm)												
	Array	G13176 series	One-stage TE-cooled type (0.9 to 1.67 µm)												
		G6849 series	Two-stage TE-cooled type (0.9 to 1.85 µm)												
		G7150/G7151-16 G8909-01 G12430 series	Two-stage TE-cooled type (0.9 to 1.85 µm)												
ROSA	G12072-54	11	1.31 µm												
Long wavelength type	to 1.9 µm	G12181 series	11	Non-cooled type (0.9 to 1.9 µm)											
	to 2.1 µm	G12182 series		One-stage TE-cooled type (0.9 to 1.97 µm)											
				Two-stage TE-cooled type (0.9 to 1.85 µm)											
	to 2.6 µm	G12183 series	12	Non-cooled type (0.9 to 2.1 µm)											
				One-stage TE-cooled type (0.9 to 2.07 µm)											
				Two-stage TE-cooled type (0.9 to 2.05 µm)											
Non-cooled type (0.9 to 2.6 µm)															
One-stage TE-cooled type (0.9 to 2.57 µm)															
Two-stage TE-cooled type (0.9 to 2.55 µm)															

Im Markt werden handelsübliche Sensoren von 400 nm bis 2600 nm angeboten.

Erforderliche Lichtmenge am Sensor

Zur Bestimmung der Anforderungen an den Sensor für eine OCT Anlage ist die Abschätzung der Lichtmenge, die vom Sensor in ein Signal umgewandelt werden kann, notwendig.

Vom eingekoppelten Licht gelangt 50% in den Messarm und 50% in den Referenzarm. Im Messarm tritt das Licht aus und wird kollimiert auf die Siegelnaht fokussiert. Ein Teil des auf der Siegelnaht gestreuten Lichts gelangt wieder zurück zum Sensor. Dabei gelangen unter günstigsten Voraussetzungen 50% des ausgesendeten Lichts wieder zurück. Wird der Messarm mit einer Linse versehen, gehen für den Hin- und Rückweg des Lichts nochmals jeweils die Einfügedämpfung verloren. Das Licht läuft dann noch einmal durch den Strahlteiler, wo erneut 50% des Lichts verloren geht. Unter Berücksichtigung aller Einflüsse gelangen vom eingestrahlenen Licht bei einer

Reflektivität von 100% im Messarm noch -12 dB oder $63.2 \mu\text{W}$ zum Detektor zurück. Bei einer Wellenlänge von 800 nm entspricht das $3,8 \times 10^{14}$ Photonen pro Sekunde.

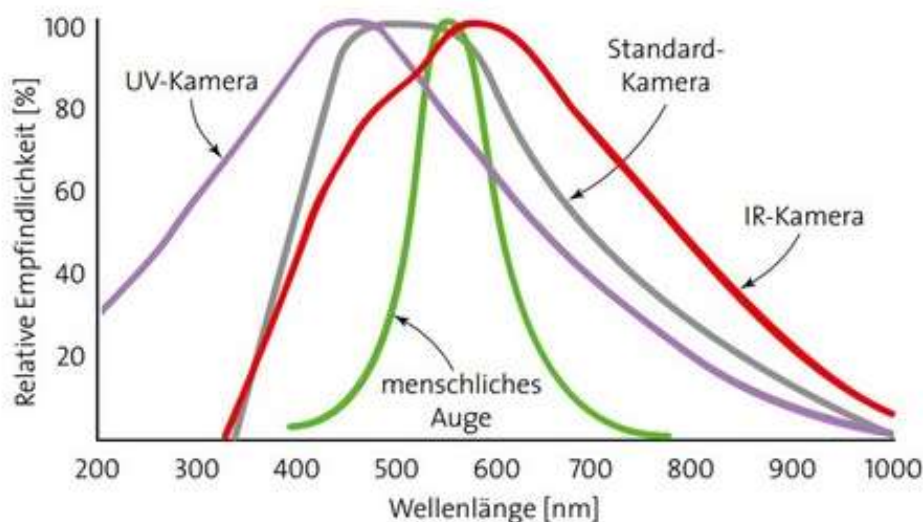
Messlicht

In OCT Systemen sind Mess- und Referenzlicht Gauß'sche Strahlenbündel. Es stellt sich die Frage, welcher Strahldurchmesser gewählt werden soll, um eine möglichst optimale Ausleuchtung des Bildsensors zu erreichen. Es wird deutlich, dass mit schmalen Beleuchtungsprofilen eine grössere Sensitivität in der Mitte des Sensors erreicht wird, mit einem steilen Abfall gegen den Rand des Sensors hin. Dies führt zu einem höheren Rauschen an der Ober- und Unterseite der Signale.

Wenn ein sehr breites Beleuchtungsprofil gewählt wird, sind die Amplituden über den Bildsensor hinweg ähnlicher. Zunächst steigt auch die Sensitivität am Rand des Bildsensors. Allerdings gehen gleichzeitig grössere Anteile der zur Verfügung stehenden Lichtmenge verloren, wodurch sich die mittlere Sensitivität reduziert. Der beste Kompromiss wird bei einem Strahldurchmesser erzielt, dessen Halbwertbreite der Sensorbreite entspricht. Der Anteil des Lichts, das dann noch auf den Sensor trifft, liegt bei etwa 76%.

Sensor

Für die Auswahl des Sensormaterials ist Silizium zugrundegelegt, weil diese Sensoren auf der ganzen Welt kostengünstig verfügbar sind. Die Quanteneffizienz dieser Sensoren ist bis etwa 750 nm konstant und sinkt dann relativ schnell bis ca. 1100 nm gegen Null. Die Quanteneffizienz eines Sensors bei 830 nm liegt zwischen 40% und 70%. Das verfügbare Licht aus am Ausgang des Strahlteilers, das zur Verfügung steht beträgt wie vorgängig abgeschätzt $3,8 \times 10^{14}$ Photonen pro Sekunde. Sie generieren einen Photostrom von ca. $1,4 \times 10^{14}$ Elektronen pro Sekunde.



Um eine Sättigung des Detektors zu vermeiden, soll das Produkt aus der Sättigungsladung (FWC) und der Ausleserate grösser als der Photonenstrom sein. Bei maximaler Anzahl Ladungsträger pro Bildpunkt von z.B. 5×10^6 Elektronen entspricht das einer Ausleserate von $28,4 \text{ MHz}$. Praktische Messungen haben gezeigt, dass die Intensität, die bei industriellen Anwendungen des OCT Verfahrens notwendig ist, typischerweise nur etwa 1% der eingestrahlteten Lichtleistung beträgt.

Auf dem in CMOS-Technologie hergestellten Zeilensensor enthalten die einzelnen Bildpunkte bereits grosse Teile der Funktionalität, die bisher ausserhalb des Sensors realisiert wurden. Es sind sogenannte Aktive Sensor Pixel Arrays (ASP). Besitzt jeder Bildpunkt eine eigene Ladungsverstärkerschaltung, hat das den Vorteil, dass die kleinen photonengenerierten Ladungen nicht zuerst über die Busleitungen des Sensors geführt werden müssen, sondern bereits im Bildpunkt auf dem Chip in die Signalspannung umgewandelt wird. Dadurch werden die Signale unabhängiger von Störungen durch die Schaltvorgänge und das Übersprechen aus den Logikbaugruppen. Die externe Beschaltung dieses Sensors ist wesentlich.

Zur maximal auftretenden Lichtintensität aus einer Siegelnaht muss noch die Lichtleistung aus dem Referenzarm addiert werden. Die Intensität aus dem Referenzarm eines idealen OCT Systems kann ohne Einschränkung der Sensitivität reduziert werden, solange sie grösser bleibt als die Lichtintensität aus dem Messarm. In zeitaufgelösten OCT Systemen wird diese Möglichkeit in der Regel nicht genutzt, da die Photodioden bei den diskutierten Strömen noch deutlich linear arbeiten.

Für OCT Systeme mit Si-Bildsensoren ermöglicht die Reduzierung der Lichtintensität im Referenzarm eine Reduzierung der erforderlichen Ausleserate. Wird die Lichtintensität im Referenzarm auf 4% gesenkt, prägt das Referenzlicht die Gesamtintensität am Detektor noch deutlich. Der Sensor muss dann aber nur noch $5,6 \times 10^{12}$ Elektronen pro Sekunde verarbeiten, was bei einem OCT-System mit 1 mW Strahlungsquelle eine noch sinnvolle Ausleserate von 1,1 MHz ergibt.

Empfindlichkeit einer Messung

Die minimale Empfindlichkeit von OCT Messungen entspricht der kleinsten nachweisbaren Reflektivität auf der Siegelnaht und hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Messungen.

Ist das OCT System richtig ausgelegt, kann man voraussetzen, dass keine systematischen Messfehler bestehen und die dominante stochastische Rauschquelle das Quantenrauschen des Lichts ist. Das Quantenrauschen entspricht der Unsicherheit bei der Zählung der Lichtquanten bzw. der Ladungsträger und bildet die fundamentale Untergrenze für das Rauschen von OCT Systemen. Die Sensitivität von OCT Systemen kann als Quotient definiert werden zwischen dem Signal, das entsteht, wenn im Probenarm ein Objekt mit einer Reflektivität von 100% eingebracht wird und dem Rauschuntergrund mit sehr geringem Signal.

Das grösstmögliche Signal wird bei einem Kohärenzgrad von 1 (Maximum) erreicht. Der Kohärenzgrad sinkt, z.B. wenn Proben- und Referenzlicht nicht gleich polarisiert sind oder wenn nichtinterferenzfähiges Licht auf den Detektor trifft. Werden die Ströme betrachtet, die von den Lichtquanten generiert werden, kann man mit dem Wirkungsgrad ein Mass für die Quanteneffizienz des verwendeten Detektors festlegen. Bei den Systemen werden durch die Modulation Transfer Funktion (MTF) der Bildsensoren hohe Raumfrequenzen gedämpft. Zudem fällt bei Systemen mit Bildsensoren in der Regel nicht das gesamte Licht auf den Sensor. Es zeigt sich, dass eine Vergrösserung des Messbereichs oder die Erhöhung der Messgeschwindigkeit, des Wirkungsgrades der Nachweisoptik, sowie auch die Verbesserung der Messauflösung zu einer Reduzierung der Sensitivität führen. Zudem besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Kohärenzgrad und der

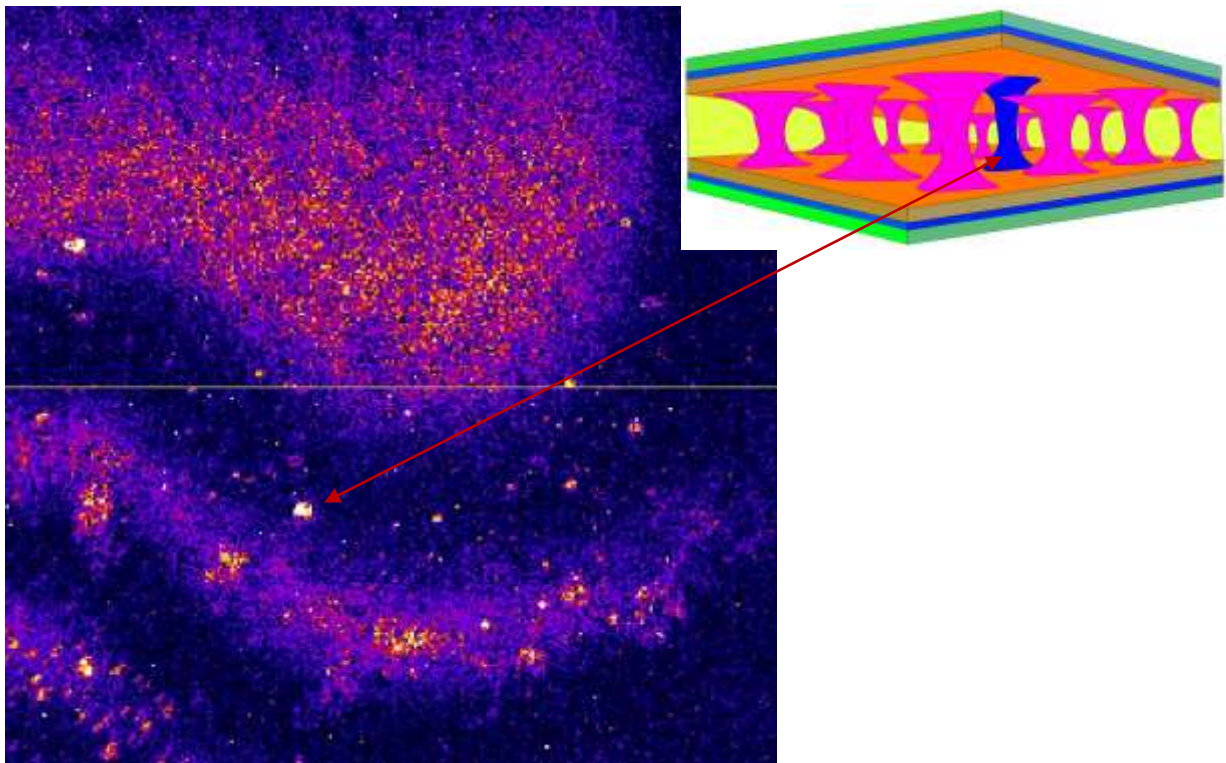
Modulationstransferfunktion (MTF). Die Referenzintensität hat keinen Einfluss auf die Sensitivität, solange sie deutlich grösser als die Probenintensität ist.

Dynamik der OCT Messung

Die Messdynamik, die bei OCT Messungen mit linearen Bildsensoren erreicht werden kann, ist der Quotient aus dem kleinsten und dem grössten zur gleichen Zeit messbaren Signal. Das grösste mit einem Bildsensor messbare Signal liegt vor, wenn sowohl Messarm und Referenzarm jeweils ein Viertel der Sättigungskapazität aufweisen.

Die Signalgrösse wird durch den Kohärenzgrad und die MTF des Bildsensors begrenzt. Das kleinste messbare Signal entspricht dem Rauschen, welches in diesem Fall durch das Quantenrauschen der mittleren Ladungsträgermenge als Funktion der Bandbreite der Messung gegeben ist. Die Bandbreite ist keine Funktion der für eine Messung zur Verfügung stehenden Zeit, sondern skaliert mit Pixel-1 und hängt von der Anzahl der Pixel auf dem Bildsensor ab. Damit kann die Messdynamik in dB für die Einzelmessung mit dem Bildsensor bestimmt werden.

Sichere Siegelnahtinspektion

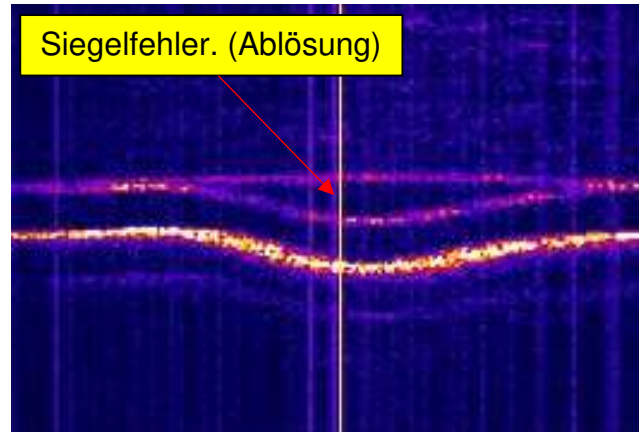
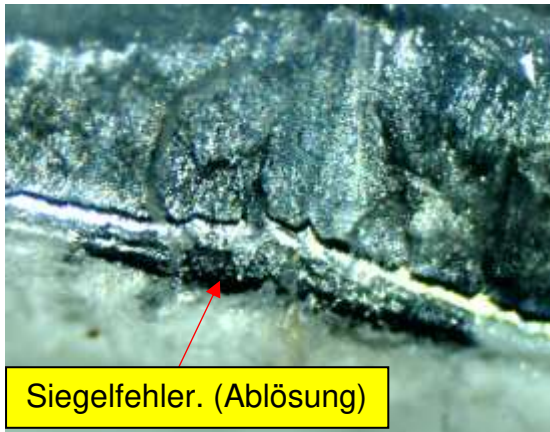


Jede einzelne Schicht in einer Folie wird mit dem OCT-Verfahren mikrometergenau und völlig berührungslos vermessen.

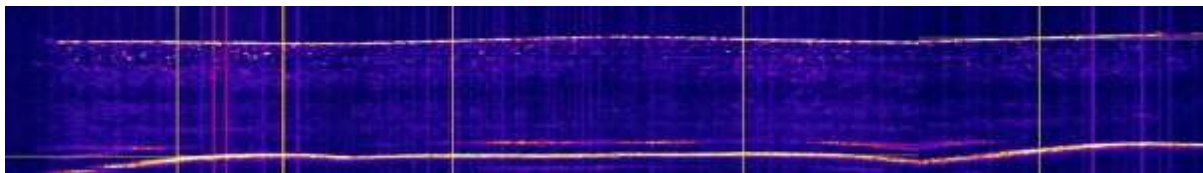
Siegelnahtinspektion

Mit dem ASP- Array werden bei einem Scan auf der Siegelnaht 300 * 300 Bildpunkte erfasst. Die Tiefe des zu vermessenden Volumens kann mehrere mm betragen. Aus den gemessenen Signalen werden die Siegelnahtbreite vermessen (z.B. Minimale Breite der Siegelnaht 1,6 mm) und die Qualität der Siegelnaht bewertet.

Die geometrische Ortsauflösung beträgt 10 Mikrometer (Zwischen 0,1 bis 40 Mikrometer). Die ASP Kamera (Active Sensor Pixel Array) liefert 1 Million Bilder pro Sekunde. Klare Signale geben Auskunft über die Breite der Siegelnaht, über die Tiefenlage eines Siegelfehlers oder auch über die Qualität der Siegelnahtverbindung.

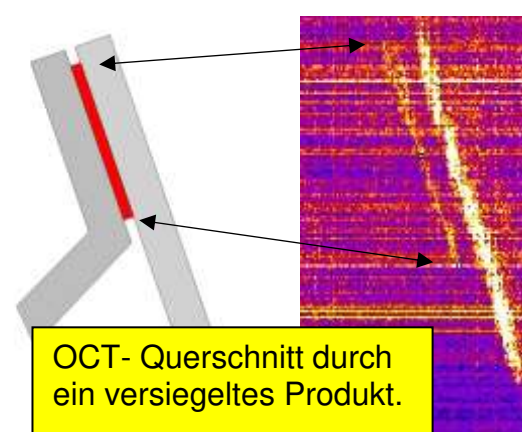
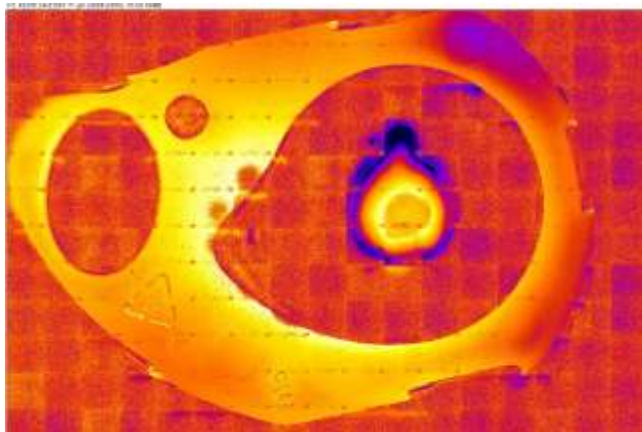


Die Besonderheit bei der Lichtlaufzeitmessung ist die Tatsache, dass in einem einzigen Arbeitsprozess die Geometrie des Bauteils, die Siegelnahtqualität oder der Füllgrad mit höchster Präzision vermessen werden können.



Die Geometrie eines Bauteils und der Füllgrad werden in einem Messvorgang erfasst.

Breite der Siegelnaht (Schwarze Linie)

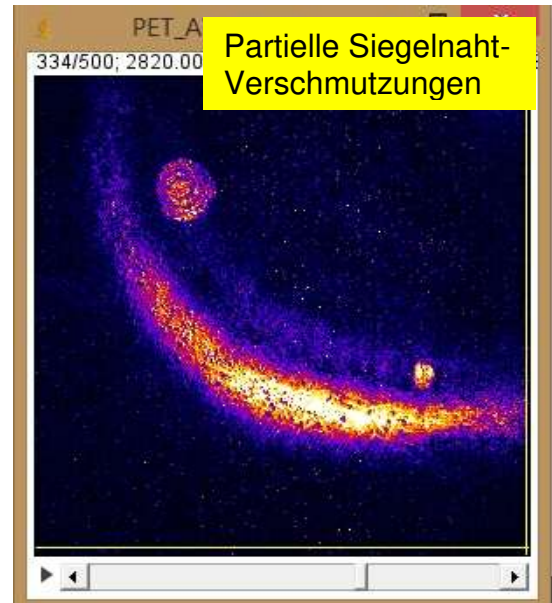
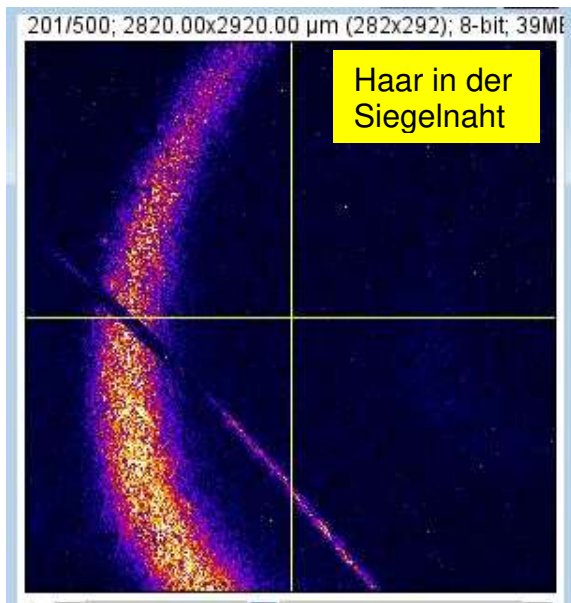


Wir finden sogar das berühmte Haar in der Siegelnaht

Im Gegensatz zu allen herkömmlichen Systemen zur Siegelnahtinspektion liefert das OCT- System klare Informationen. Ein eingeschweisstes Haar wird ebenso erkannt wie Ölspritzer, Falten oder Kaltschweissnähte. Das System liefert geometrisch hochaufgelöste Informationen in der notwendigen Geschwindigkeit, weitgehend unabhängig vom es um Material.

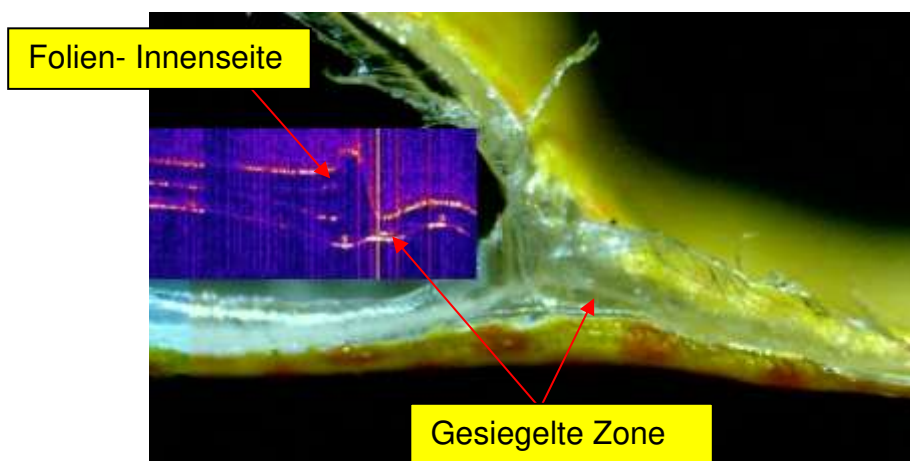
Die folgenden 2 Bilder zeigen ein Haar in der Siegelnaht und eine partielle Verschmutzung. Der OCT- Sensor erfasst 1 Mfps (1 Million Bilder pro Sekunde) und

erkennt Fehler in Mikrometergrösse. Was Sie bei uns standardmässig bekommen, sind eine klare Sicht in die Siegelnähte und einzigartige, moderne Messtechnik in höchster Qualität.



Kunststoffbeutel

Kunststoffbeutel aus mehrlagigen Folien ohne Metalleinlage werden mit dem OCT-Verfahren sicher und zuverlässig geprüft. Für die Messungen stehen verschiedene Lichtquellen zur Verfügung damit sich Oxide oder Pigmente nicht auf das Prüfergebn auswirken. Beim OCT Verfahren ist die laterale Auflösung von der Auflösung in z- Richtung entkoppelt, ein besonderer Vorteil bei der Prüfung von Siegelnähten. Kleinste Unterbrüche in der Haftvermittlerschicht werden dadurch noch sicher erkannt.

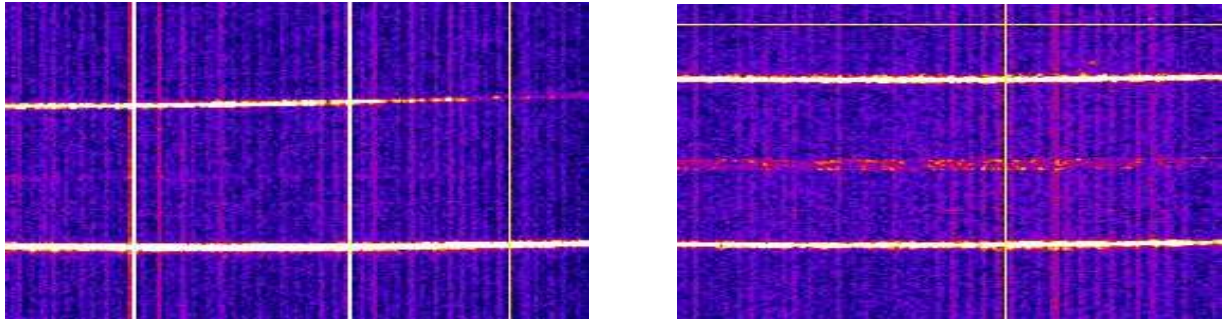


Messen der Dicke einer Gasperrschicht in einer mehrlagigen Folie:

Das ASP- OCT- System eignet sich zur Vermessung einer mehrlagigen Folie. Die folgenden Bilder zeigen die Gesamtdicke der Folie sowie Lage und die Dicke der Gasperrschicht im Innern der Folie.

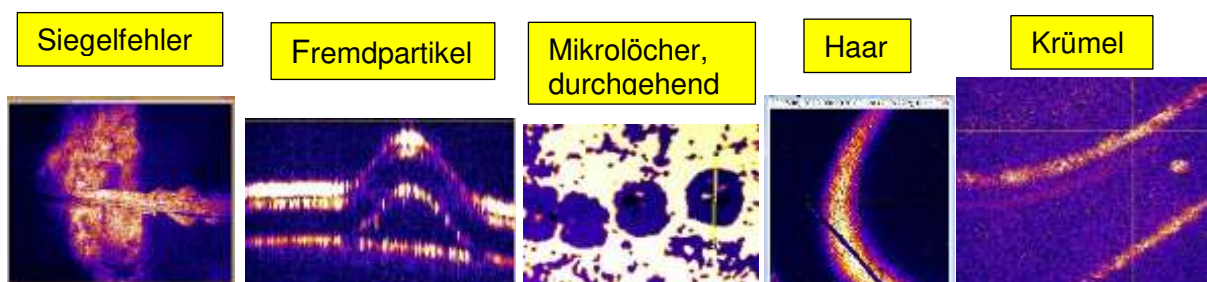
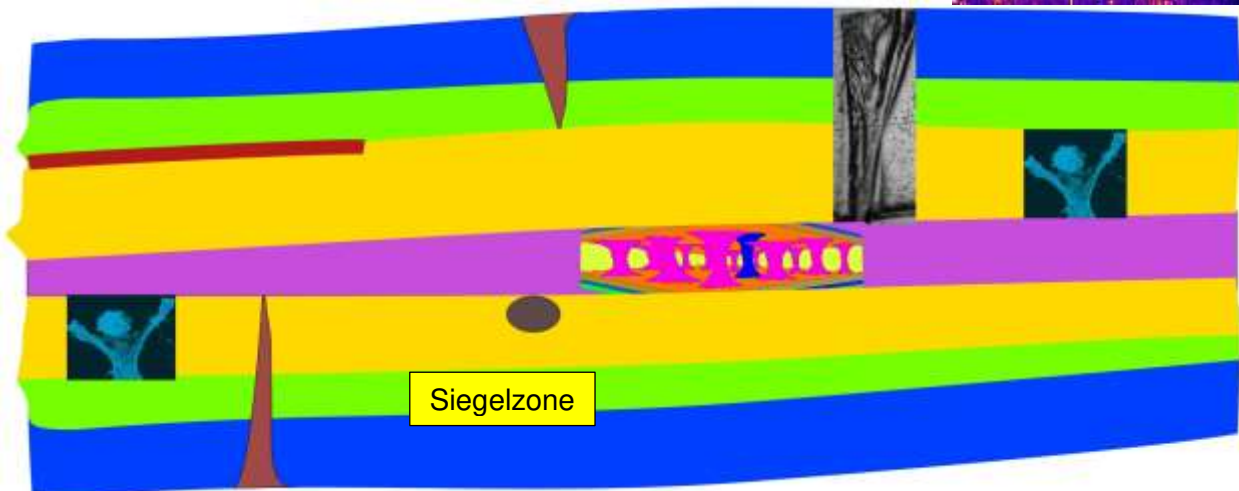
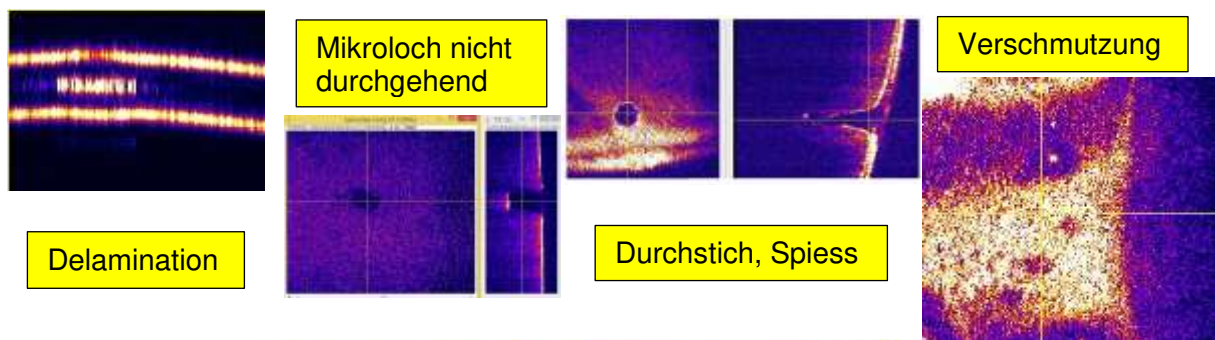
Bei der Folie links sind die EVOH Schicht und die Gesamtdicke viel dünner als bei der Folie rechts. Im Bild links ist die Gesamtdicke 700 µm und die EVOH Schicht kaum

vorhanden, im Bild rechts (Auf derselben Folie) ist die Gesamtdicke 750 μm und die EVOH Schicht 46 μm .



OCT Verfahren zur Siegelnahtinspektion

Mit der optischen Tomografie neuen Technologie können wir Siegelnähte lückenlos und vollflächig überprüfen. Damit kann erstmals eine einwandfreie Funktion der Siegelnähte gewährleistet werden.

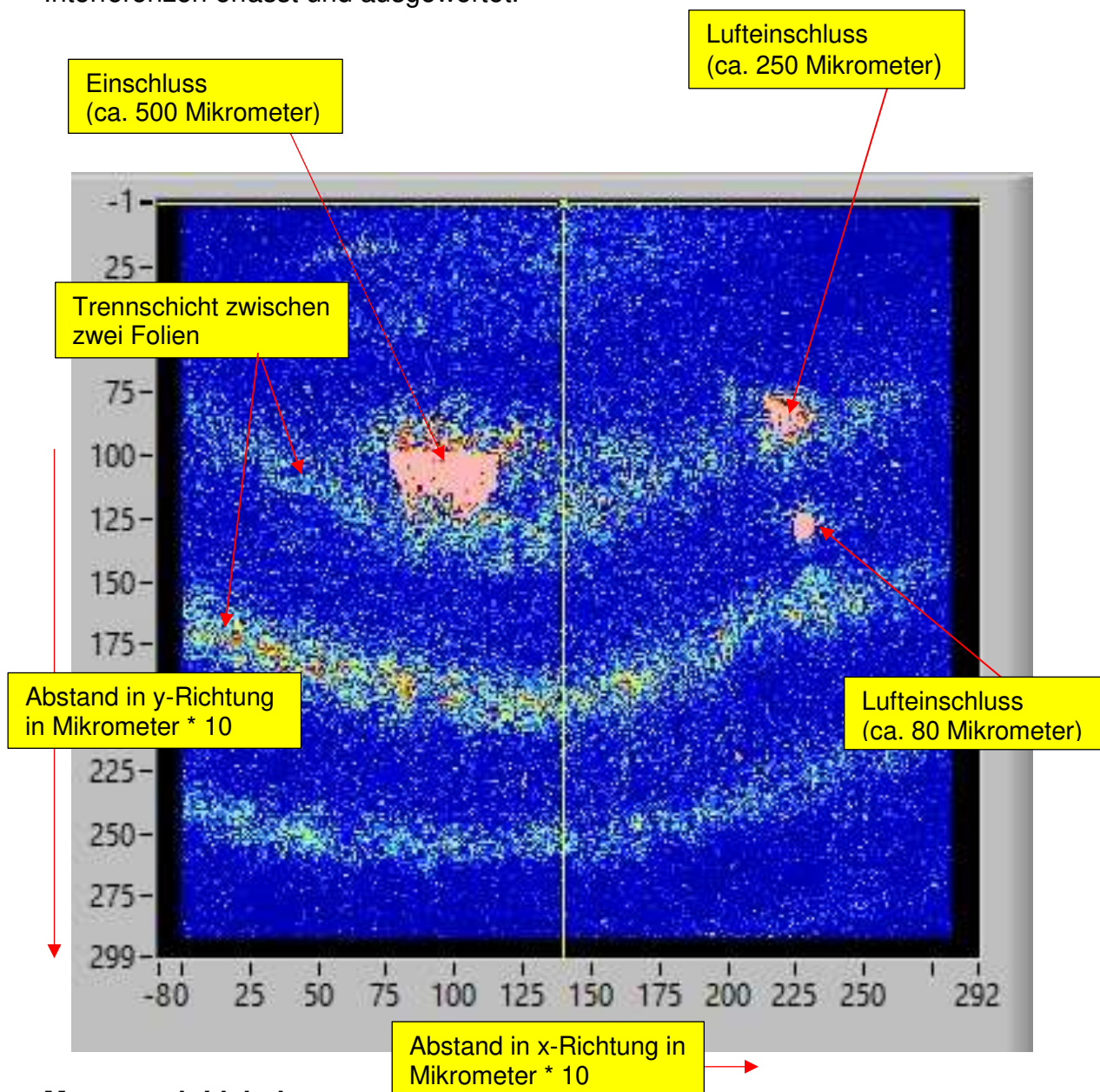


Wir haben viele Erfahrungen in mehreren hundert Messversuchen an Proben aus der Praxis an Siegelnähten gesammelt. Wir haben mit der OCT Methode Verpackungen

von Augenlinsen und Seren, Rösti-Verpackungen und Verpackungen von Filtern oder Kindernahrung inspiziert. Die Kriterien für die Auswertung der Signale haben wir systematisch untersucht.

Was erkennt man im OCT Signal

Im Gegensatz zu Visualisierungssystemen werden mit dem OCT Verfahren nur Interferenzen erfasst und ausgewertet.



Messen mit Licht ist

→ sehr schnell

→ extrem präzise

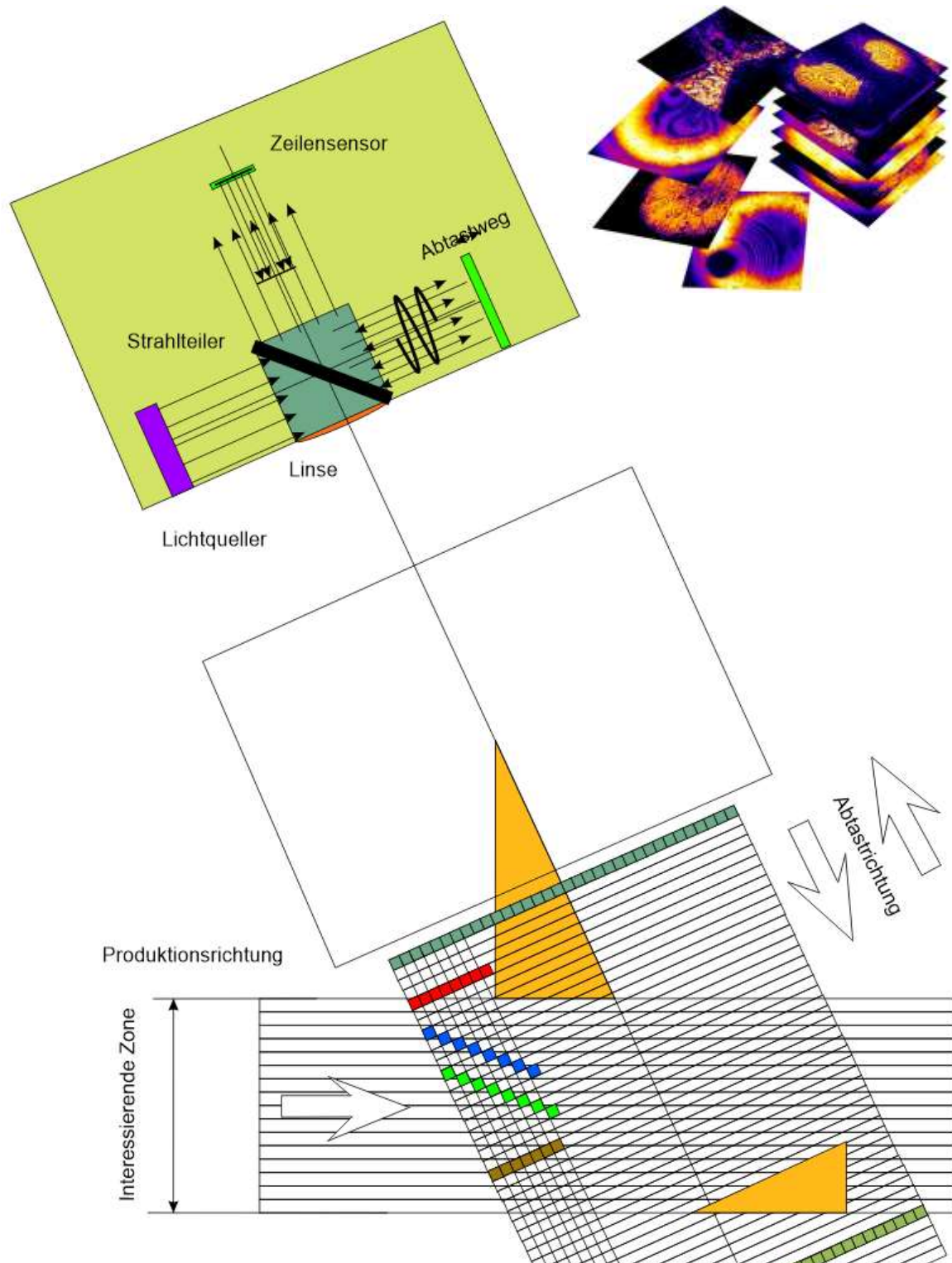
→ berührungslos

und liefert Resultate zu komplexen Fragestellungen!

Abtastsystem

Mit der Anordnung, dass der Referenzarm in der gleichen Richtung ausgerichtet ist wie der Messarm, können mit einem schnellen Sensor die Signale in den einzelnen Ebenen in der interessierenden Zone nacheinander aufgenommen werden.

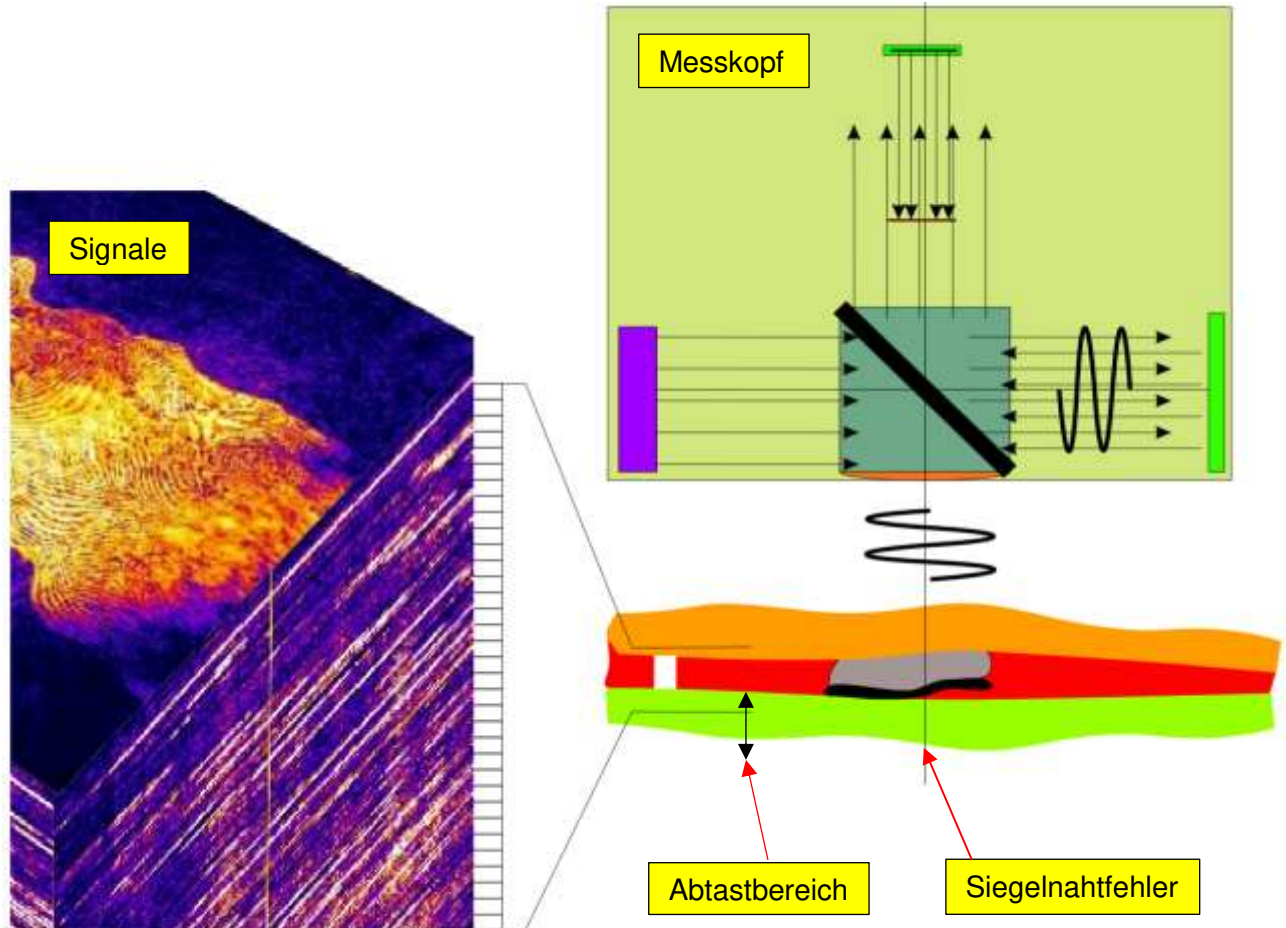
Bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s - 2 m/s (Bahngeschwindigkeit und Vibration) werden die Messdaten noch reproduzierbar erfasst und ausgewertet. Vibrationen des Objektes wirken sich nicht aus.



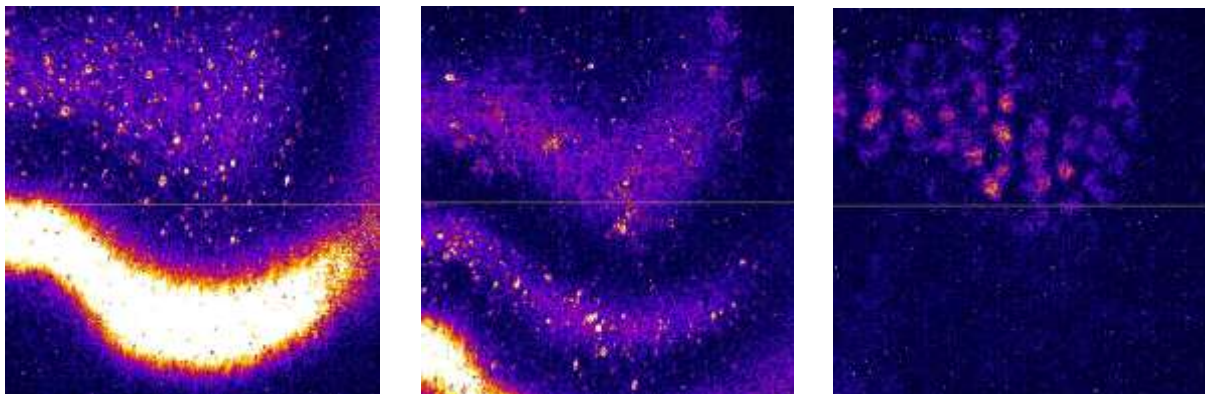
Skizze einer Aufnahmesituation (Beispiel)

Resultate

Der Bereich, der abgetastet werden soll, ist durch das Sensorelement festgelegt. Jede einzelne Schicht die abgetastet wird, übernimmt die Signale einer definierten Phase des Messsignals und wandelt dieses in ein elektrisches Signal um.



Die drei folgenden OCT- Bilder aus einem Bilderstapel zeigen partielle Zonen in einer definierten Tiefenlage in der die optische Eigenschaft gegenüber der gleich tief liegenden Umgebung verändert ist. Die vielen kleinen hellen Punkte im Bild links haben einen Durchmesser von 10 bis 30 Mikrometer. Die Anzahl heller Punkte verschwindet mit zunehmender Tiefe (Bilder 2 und 3), wo neue Zonen mit einem grösseren Durchmesser sichtbar werden.



Aus den Daten lassen sich die Grösse der Bereiche und deren Dimension in z-Richtung bestimmen.

Mit der optischen Tomografie werden erkannt:

Merkmal	Beschreibung
Beschädigte Folie	Bestehen Löcher, Risse oder Lücken in der Folie? Gibt es Mikrolöcher?
Schmutz	Sind Fremdkörper in der Folie eingebettet?
Falten	Gibt es Falten in der Folie?
Ausrichtung	Ist die Folie richtig ausgerichtet oder gibt es Formatfehler?
Dichtung	Ist die Dichtung/Siegelnaht mit der geforderten Minimaldicke und der notwendigen Breite am richtigen Ort? Ist die Dichtung/Siegelnaht richtig zentriert?
Schalenschaden	Ist der Verpackungskörper oder Teile davon beschädigt, gebrochen, gerissen, verbogen, defekt oder verschmutzt?
Luftblasen	Bestehen Hohlräume oder Durchbrüche in der Klebezone?
Blister	Ist die Dicke der Verpackung homogen oder bestehen Unterschiede in der Dicke oder in der Form?
Fehlende Schalen	Fehlen einzelne Schalen auf einem Blisterstreifen?
Siegelnahtfehler	Weist die Siegelnaht Durchbrüche oder Kanäle auf? Entspricht die Haftung der Siegelnaht auf beiden Seiten den Anforderungen (Kaltverklebung)?
Siegelnaht	Wie ist die Siegelnahtbreite? Wie ist die Siegelnahtfestigkeit? Schwache (schlecht haftende) Siegelnaht, Breite der Siegelnaht (z.B. <1 mm bis > 2 mm) oder offene Siegelnaht.
Anderes	Hat es Kantenfehler oder Formatierungsfehler am Endprodukt?
Verpackungsfolie	Sind alle Schichten in der Verpackungsfolie vorhanden? Fehlen Schutz- oder Funktionsschichten?
Geometrie	Wie ist die Geometrie des Produktes (falsche Form, Deformation)?
Produkt	Ist ein Produkt in der Verpackung?

Die obenstehende Tabelle zeigt eine Übersicht der Kriterien, welche mit einem OCT System berührungslos und mit höchster Präzision festgestellt werden. Sind metallische Schichten im Einsatz oder müssen nicht transparente Beschichtungen vermessen werden, ergänzen wir unsere Schichtdicken-Messsysteme mit andern Sensoren.



Moderne Prüfverfahren inspizieren die Siegelnähte und die Verpackung von Gütern vollflächig und zuverlässig auf Durchbrüche, Mikrolöcher und Fehler aller Art, zum Schutz des Inhaltes vor äusseren Einwirkungen.

So sehen Siegelnahtfehler in „Echtzeit“ aus!

Übrigens spielt es beim der OCT Verfahren keine Rolle, ob Siegelzonen kontrolliert, Löcher gesucht oder Schichtdicken gemessen werden. Die Messeinrichtung unterscheidet sich im Wesentlichen nur durch die Auswertalgorithmen.

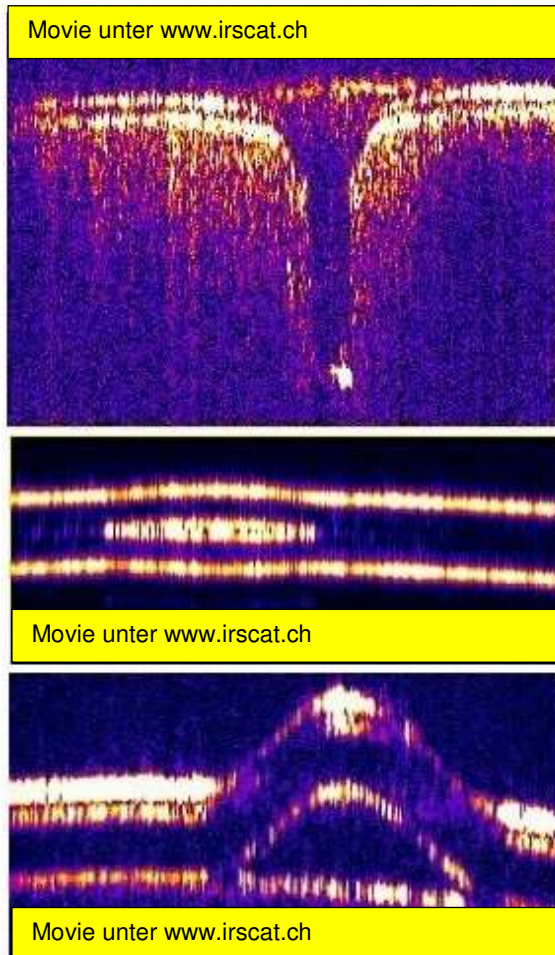


Bild oben: Mikroloch in einem Nahrungsmittelbeutel.

Bild Mitte: Loslösung zwischen zwei Folien.

Bild unten: Siegelnahtfehler. Die obere Folie löst sich vom Träger ab.

→ Bei Verpackungsfolien (PET) werden Fehlergrößen zwischen 150 µm bis 500 µm vollflächig gesucht.

→ Bei technischen Folien ist man bestrebt, Fehler der Größe am 50 µm bis 200 µm noch sicher zu finden.

→ Bei Schutzfolien ist eine Fehlergröße von 60 µm bis 160 µm relevant. Diese Fehlergröße wird sicher erkannt.

→ Bei Funktionsschichten in Folien werden Fehler von 20 µm bis 100 µm sicher erkannt.

Die Vorteile der optischen Tomografie:

- Grosse Zuverlässigkeit
- Robust im industriellen Einsatz.
- Wartungsarm und höchste Betriebssicherheit.
- Sichere Vorder- und Hintergrundausleuchtung.
- Geringer Platzbedarf
- Höchste Prüfgeschwindigkeit
- Der Prüfprozess kann flexibel ausgebaut und automatisiert werden.
- Alle Messungen werden automatisch protokolliert und dokumentiert.
- Fehler werden archiviert und dokumentiert.
- Jeder Prozessschritt ist mit Datum, Zeit und Aktion gesichert.
- Das Prüfprotokoll entspricht internationalen Standards.
- Die Prüfteile können automatisch aus dem Produktionsprozess ausgeschleust und in die Prüfanlage übernommen werden.

Weitere Informationen → SwissQuali AG, Ringstrasse 15, 4600 Olten.

C:\Siegelnaht\Siegelnahtinspektion_korr_2023.docx