

HVG-Mittlung Nr.2120

Messung von Temperaturen und Temperaturverteilungen im Formgebungsbereich von Behälterglasmaschinen

Gesine Bergmann, HVG, Offenbach

Vortrag auf der DGG-Jahrestagung 2007 in Aachen

1 Einleitung

Die Möglichkeit berührende Temperaturmessungen einzusetzen, ist an Behälterglasmaschinen selten gegeben. Pyrometrie und Thermographie sind berührungslose Messverfahren zur Bestimmung von Temperaturen. Sie erfassen die Infrarotstrahlung eines Körpers oder Fluids. Die vom jeweiligen Sensor aufgenommene IR-Strahlung wird in eine punkt- oder flächenhafte Information über die Temperatur umgewandelt. Dabei muss grundsätzlich zwischen 2 Einsatzbereichen unterschieden werden. Der qualitative Einsatz dient zum Schaffen eines ersten Überblicks. Die danach oft nötige viel aufwendigere quantitative Messung erfordert grundlegende Kenntnisse der Strahlungsphysik und des Messobjektes.

Die klassischen Einsatzbereiche liegen in der Instandhaltung und der Bauphysik. Im Bereich der Instandhaltung wird die Thermographie meist eingesetzt, um Schaltkästen, Transformatoren, Wärmetauscher und Kesselanlagen zu überwachen. Dies ermöglicht das frühzeitige Erkennen von Veränderungen des thermischen Zustandes der Betriebsanlagen und erhöht damit deutlich die Anlagensicherheit. In der Bauphysik werden meist Wärmebrücken an Gebäuden gesucht und energetische Bilanzuntersuchungen im Wohnbereich vervollständigt (Energiepass).

Auch für die Untersuchung des Formgebungsprozesses von Behälterglas können Pyrometrie und Thermographie eingesetzt werden. Die Herstellung von Erzeugnissen aus Glas ist geprägt vom gleichzeitigen Ablauf thermischer und mechanischer Prozesse. Für die Veränderung und Optimierung der mechanischen Prozesse sind die Kenntnisse über die thermischen Abläufe während der Formgebung sehr wichtig. Aus diesem Grund erfolgt zunehmend eine Untersuchung der thermischen Zustände während des Formgebungsverfahrens.

2 Grundlagen der Temperaturmessung im Infraroten

Die Temperaturmessung durch Auswertung der vom Messobjekt abgegebenen IR-Strahlung benötigt zunächst einige grundlegende Kenntnisse. Das breite Spektrum der elektromagnetischen Strahlung wurde zur besseren praktischen Handhabung in verschiedene Wellenlängenbereiche eingeteilt (Bild 1). Die infrarote Strahlung deckt dabei etwa einen Bereich zwischen 780 nm und 1 mm ab. Sie liegt damit zwischen dem sichtbaren Licht und den Mikrowellen. Technisch genutzt werden jedoch nur Ausschnitte aus diesem Bereich. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die meisten Messungen durch Umgebungsluft hindurch erfolgen. In der Luft sind auch CO₂ und Wasserdampf enthalten. Sie sorgen für Absorptionen in bestimmten Wellenlängenbereichen. Diese Wellenlängenbereiche sind damit nicht nutzbar.

Alle Körper und Fluide senden über das IR-Spektrum verteilt Strahlung aus. Die Beschaffenheit des Körpers und seine spezifischen physikalischen Eigenschaften entscheiden darüber, ob es sich bei dem zu betrachtenden Messobjekt um einen Bandenstrahler handelt oder ob eine Emission im gesamten Wellenlängenbereich stattfindet. Zudem muss darauf geachtet werden, in welchem Wellenlängenbereich das Messobjekt möglicherweise als Volumenstrahler und nicht als Oberflächenstrahler emittiert. Volumenstrahler unterscheiden sich von Oberflächenstrahlern dadurch, dass die

Strahlungsinformation sowohl von der Oberfläche, als auch aus tieferen Schichten des Fluids kommt. Dies trifft auf Gase und Flüssigkeiten, teilweise auch auf das Glas zu.

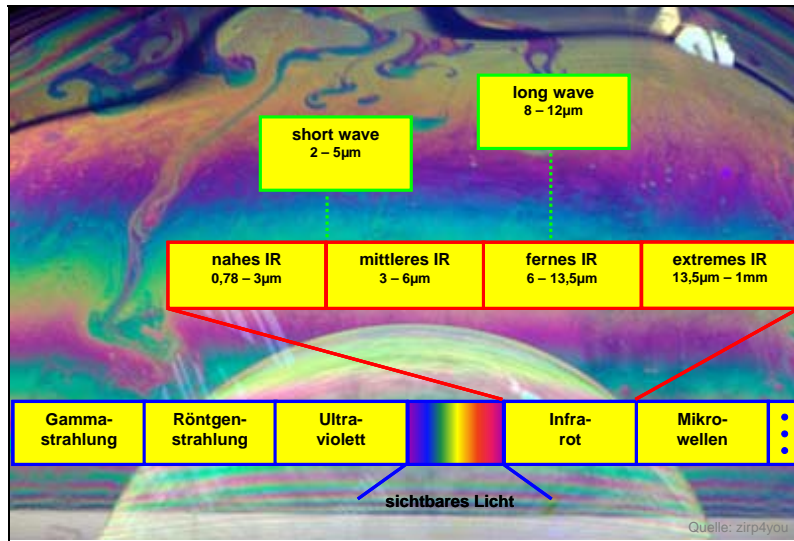


Bild 1: Einordnung des IR-Bereichs im elektromagnetischen Spektrum

Der ideale Strahler wäre ein sogenannter "schwarzer Strahler" (Gustav Kirchhoff, 1860), d.h. die gesamte auftreffende Energie des gesamten Spektrums wird absorbiert. Nach dem Strahlungsgesetz von Gustav Kirchhoff sind das Emissionsvermögen und das Absorptionsvermögen bei jeder Wellenlänge proportional zueinander. Ist bei jeder Wellenlänge das Absorptionsvermögen und das Emissionsvermögen maximal, spricht man vom "schwarzen Strahler". Nahezu alle Untersuchungsobjekte haben jedoch gravierende Unterschiede zwischen Absorptions- und Emissionsvermögen und werden deshalb als "graue Strahler" mit einem Emissionsgrad kleiner 1 bezeichnet. Hierzu gehören zum Beispiel die metallischen Oberflächen des Formenmaterials (Oberflächenstrahler), wobei hier zusätzlich eine starke Abhängigkeit des Emissionsgrades vom Abstrahl- bzw. Betrachtungswinkel vorliegt. Das Glas ist dagegen im Wellenlängenbereich zwischen 0,3 und 4,4 μm ein Volumenstrahler. Die Größenordnung der Strahlung aus dem Volumen ist stark abhängig von der Zusammensetzung des Glases. Im Vordergrund stehen dabei die Eisen- und Chromverbindungen.

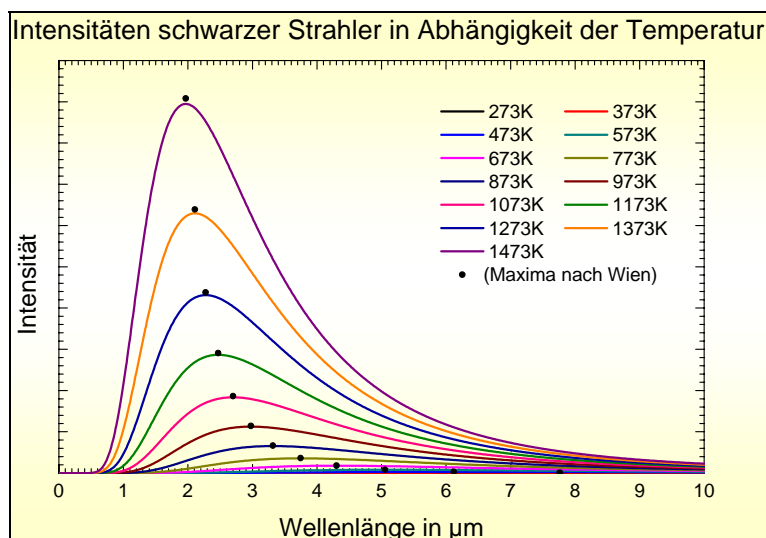


Bild 2: Gesetz von Planck und Wien'sches Verschiebungsgesetz

Grundlage für Bestimmungen der Temperatur ist das Planck'sche Strahlungsgesetz, welches die Intensität der Strahlung bei jeder Wellenlänge und beliebiger Temperatur für schwarze Körper ermittelt. Es vereinigt das Wien'sche Verschiebungsgesetz und das Gesetz von Rayleigh-Jeans.

Aus der Integration über alle Wellenlängen ergibt sich dabei die Gesamtenergiedichte (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Die abgestrahlte Leistung ist demnach proportional der 4. Potenz der Temperatur, d.h. bei Verdopplung der Temperatur versechzehnfacht sich die Gesamtstrahlungsmenge.

3 Aufbau und Funktionsweise von Pyrometern und Thermokameras

3.1 Allgemeines zum Aufbau von Pyrometern und IR-Kameras

Radiometrische Temperaturmessungen können je nach Einsatzzweck und Einsatzort als Punktmessungen (Pyrometer), Linienmessungen (Zeilenkameras) oder Flächenmessungen (IR-Kameras) durchgeführt werden.

Die Strahlungsleistung kann schmalbandig bei einer Wellenlänge, oder in einem Wellenlängenbereich erfasst werden. Würde der gesamte Spektralbereich erfasst, handelt es sich um ein Gesamtstrahlungs-pyrometer. Dies ist technisch jedoch nicht möglich, da auch die optischen Komponenten und Fenster nur für bestimmte Wellenlängenbereiche zur Verfügung stehen. Praktisch müssen für ein Gesamtstrahlungs-pyrometer mindestens 90 % der gesamten Strahlung ausgewertet werden. Mit Hilfe eines Quotientenmessgerätes werden die Intensitäten von 2 eng nebeneinander liegenden Wellenlängen ermittelt und ausgewertet. Störeinflüsse wie Reflexionen spielen damit keine Rolle mehr und unter der Voraussetzung gleicher Emissionsgrade bei beiden Wellenlängen wird die Messung somit unabhängig vom Emissionsgrad. Eine spezielle Bauform stellen die Glühfadenpyrometer (Vergleichspyrometer) dar, hier wird das Licht eines Wolframbandes so angepasst, das es mit der Strahlungsfarbe des Messobjektes übereinstimmt. Die Einstellung am Wolframfaden definiert hierbei die Temperatur. Sie haben praktisch jedoch quasi keine Bedeutung mehr.

In den spezifischen Bauweisen und Funktionsprinzipien gibt es teilweise recht große Unterschiede. Dies hat seine Ursache unter anderem in der Rauschleistung, der Detektorempfindlichkeit, der Spektralempfindlichkeit und der Trägheit der verwendeten Detektormaterialien. Bezüglich dieser Materialien wird grundsätzlich zwischen thermischen Detektoren und Quantendetektoren unterschieden.

Die thermischen Detektoren absorbieren die einfallende Strahlung. Dies hat eine Veränderung der Materialspezifika durch den Seebeck-Effekt, den Bolometer-Effekt oder pyroelektrische bzw. pyromagnetische Effekte zur Folge. So treten zum Beispiel Änderungen des elektrischen Widerstands oder der Polarisierung auf. Dies wird elektrisch detektiert. Da sie eine Temperaturdifferenz auswerten, müssen sie in der Regel nicht gekühlt werden. Allerdings sind die Zeitkonstanten im Vergleich zu den Quantendetektoren deutlich größer. Als thermische Detektoren kommen oft pyroelektrische Sensoren oder Bolometer zum Einsatz. Bolometer können in Form von Metall-Bolometern auf Basis von Gold- oder Platinmaterial oder als empfindlichere Halbleiter-Bolometer auf der Grundlage von Oxiden (beispielsweise Mn, Ni, Co) Einsatz finden.

In Quantendetektoren dagegen heben die einfallenden Photonen Elektronen in das Leitungsband. Die Auswirkungen des inneren lichtelektrischen Effektes werden als Änderung der Leitfähigkeit durch Eigenphotoleitung oder Störstellenphotoleitung detektiert. Es kommen je nach nötigem Wellenlängenbereich verschiedene Photowiderstände wie PbS (2,0-2,8 μ m) bzw. PbSe (2,0-5,0 μ m) oder Photodioden aus Si (0,7-1,1 μ m) oder InGaAs (1,1-2,1 μ m) zum Einsatz. Quantendetektoren benötigen mit steigender Wellenlänge deutlich stärkere Kühlung. Die absolute Empfindlichkeit ist allerdings bei Quantendetektoren höher, auch die Ansprechzeiten sind hier deutlich niedriger.

3.2 IR-Kameras

Grundsätzlich müssen 2 Arten von Kameras, Scanner-Kameras und FPA-Kameras, unterschieden werden. Die Scanner-Kameras besitzen nur einen einzigen Detektor. Die Information aus dem gesamten Strahlungsfeld wird über schwenkende und drehende Spiegel nach und nach dem Detektor zugeführt. Das Bild entsteht damit zeilenweise. Die FPA-Kameras (Focal Plane Array) besitzen heute zwischen 76800 und ca. 328000 Einzeldetektoren. Deren Größe und Anzahl bestimmt die geometrische Auflösung des Messsystems entscheidend. Das gesamte Messobjekt kann bei diesen Kameras gleichzeitig erfasst werden.

Die bei Bolometerkameras detektierte Spannung wird zunächst durch Kompensation von Offset-Schwankungen und der Eigenstrahlung der Kamera aufbereitet. Soweit möglich werden äußere Störeinflüsse durch die Vorgabe von Objektparametern ausgeschaltet. Über die Kalibrierungskennlinien wird dann der Zusammenhang zwischen detektierter Strahlung und der Objekttemperatur hergestellt. Die Kalibrierkennlinien von Langwellenkameras besitzen gegenüber den Kennlinien für Kurzwellenkameras einen stetigeren und weniger steilen Verlauf. Das vorhandene Spannungsrauschen wird über die Kalibrierkurve in ein thermisches Rauschen umgewandelt und stellt die thermische Auflösung des Systems bei der entsprechenden Temperatur dar.

4 Durchführung von Messungen, Praxisbeispiele

Temperaturmessungen an Behälterglasmaschinen können prinzipiell immer dann erfolgen, wenn mindestens Sichtkontakt mit dem Messobjekt gegeben ist. Grenzen ergeben sich häufig durch die Geschwindigkeit der ablaufenden Prozesse und Bewegungen (Tropfenfall, Tropfenbewegung in der Rinne) und störende Reflexionseffekte. Die Reaktions- bzw. Aufnahmegeschwindigkeiten von Pyrometern und Thermokameras stiegen in den vergangenen Jahren zwar deutlich und verbessern damit das Auflösungsvermögen. Das vollständige Ausschalten von Reflexionen ist während dynamisch ablaufender Prozesse nicht möglich, sofern es nicht machbar ist, den betrachteten Bereich einzukapseln. Bei statischen Prozessen können durch die Verwendung von Metallgitterfiltern Reflexionen häufig gut unterdrückt werden. Dennoch können bei entsprechenden Anlagenkonfigurationen vor allem vergleichende Messungen durchgeführt werden. Im Folgenden sind einige Messsituationen beschrieben.

Die Qualität von Messungen an fallenden Tropfen (Bild 3) werden hauptsächlich durch die Geschwindigkeit des Tropfenfalls bestimmt. Äußere Störeinflüsse durch Reflexionen können in diesem Maschinenbereich weitgehend durch Abschattungen ausgeschaltet werden. Deutlich sichtbar ist (auch) nach der Berücksichtigung der Randeffekte die höhere Temperatur an den Innenseiten der Tropfen durch das gegenseitige Anstrahlen der Innenflächen.

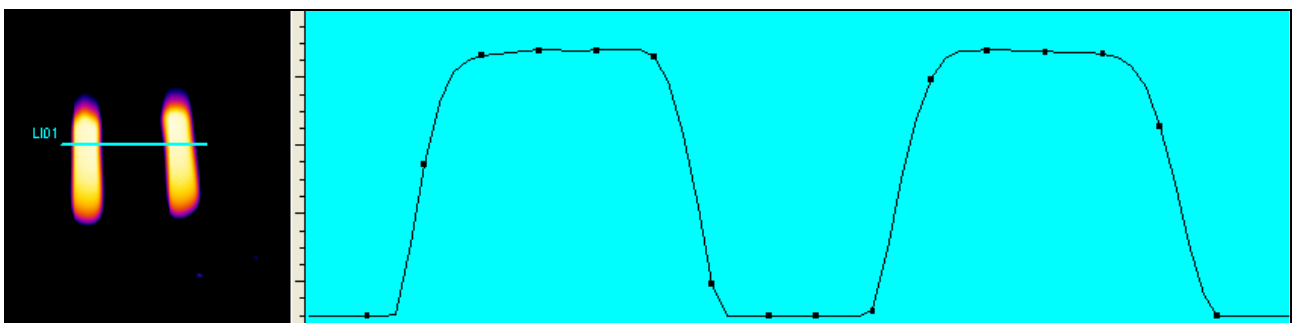


Bild 3: Temperaturen fallender Zweifachtropfen

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden Messungen an einer Maschine durchgeführt, welche Braunglasflaschen produziert (Bild 4).

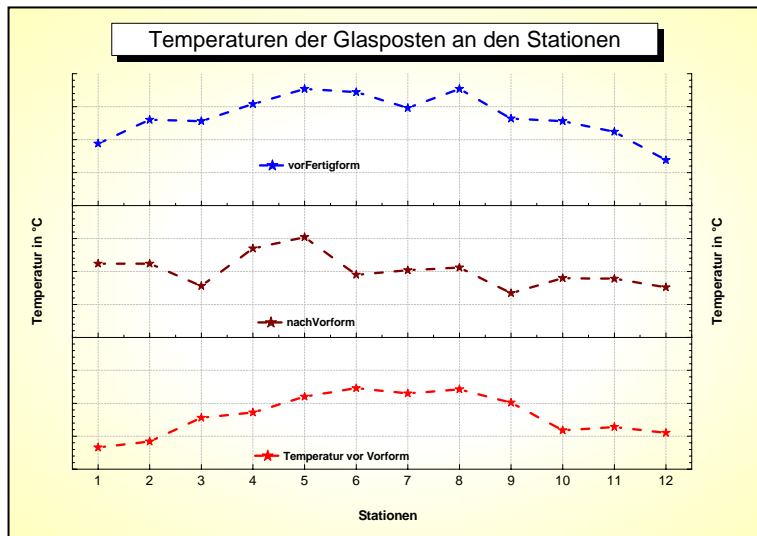


Bild 4: pyrometrisch ermittelte Temperaturen vor und nach dem Vorformprozess

Anhand dieser Ergebnisse ist deutlich sichtbar, wie durch die verschieden ausgeprägten Kühlwirkungen der einzelnen Vorformen dem oberflächennahen Glasbereich Temperaturen aufgeprägt werden, die die zuvor stetige Temperaturverteilung entlang der Maschinenlängsachse verändern. Im Verlauf des Rück erwärmungsprozesses ist eine Vergleichmäßigung in Richtung des Zustandes vor der Vorformgebung zu erkennen.

Der thermische Zustand bezüglich Temperaturverteilungen des Bodenbereiches und das Abkühlungsverhalten über dem Plate kann ebenfalls mit einer Thermokamera gut beobachtet werden. In Auswertung von Videosequenzen der Strahlungsmessungen sind der zeitliche und örtliche Verlauf der Temperaturänderungen darstellbar (Bild 5). Die waagerechte Achse beschreibt den Zeitverlauf über etwa 4 Sekunden, die senkrechte Achse beschreibt die Anzahl der Messpunkte. Die Ausprägung des wellenförmigen Temperaturverlaufs ist hier besonders gut sichtbar

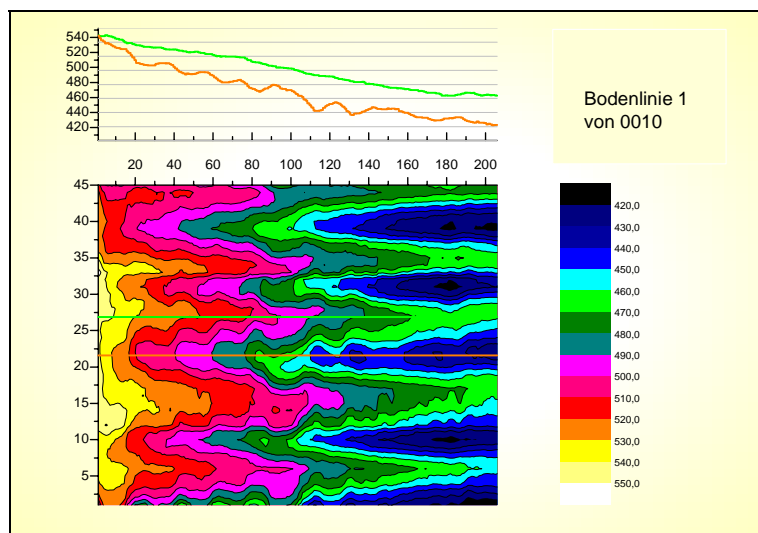


Bild 5: zeitlicher Verlauf der Temperaturen in Bodennähe beim Abkühlen am Plate

Die entsprechende 3-Bilder-Serie hebt die kalten Bereiche und deren Ausbreitung hervor.

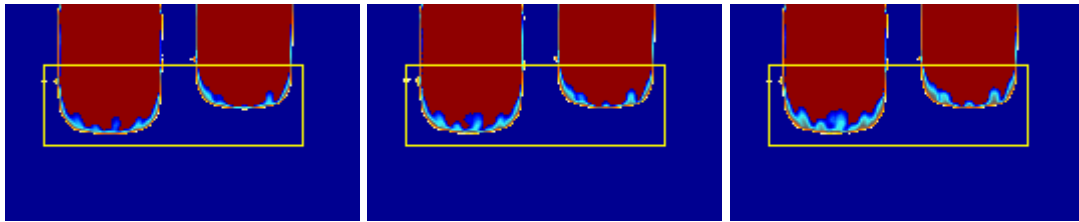


Bild 6: Thermobilder mit Hervorhebung kalter Bereiche des Bodens

Im folgenden Beispiel in Bild 7 sind mehrere Dinge deutlich sichtbar. Die noch am Greifer hängende Flasche lässt sehr deutlich die Naht erkennen. Es ist auch ohne Abzählen sehr gut zu sehen, welche Flaschen aus einer Station kommen. Weiterhin ist die unterschiedliche Ausrichtung der Flaschen durch die Bewegung auf dem Plate und die Übergabe an das Maschinenband sichtbar. Die heißeren und die kälteren Zonen sind deutlich voneinander zu unterscheiden.



Bild 7: Übersichtsbild eines Bereiches des Maschinenbandes

Auch das langfristig korrekte Abstellen der Flaschen auf den Hot Spots des Maschinenbandes (Bild 8) oder die Umlencke können untersucht werden.

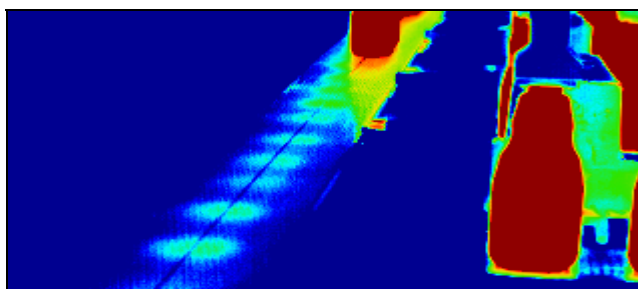


Bild 8: Hot Spots des Maschinenbandes

Weiterhin sind Anwendungen bei der Überwachung und Bestimmung von Formtemperaturen möglich. Bei der Wiederinbetriebnahme von Stationen geben Kameramessungen Auskunft über den thermischen Zustand der Station und lassen eine sehr gute Verfolgung des Aufheizprozesses der Station zu.

5 Zusammenfassung

Relative Temperaturmessungen durch nicht berührende Messverfahren wie die Nutzung der vom Messobjekt ausgesandten Infrarotstrahlung bieten eine ganze Reihe von Messmöglichkeiten zur Prozessüberwachung. Mit pyrometrischen oder thermographischen Untersuchungen kann der thermische Zustand des Glaspostens an wichtigen Übergabestellen zwischen einzelnen Produktionsschritten ebenso untersucht werden, wie der des formgebenden Materials bzw. relevanter Maschinenteile. Durch kontinuierliche Untersuchungen der Formeninnentemperatur oder des Abkühlverhaltens an Flaschen über dem Plate können beispielsweise Hot Spots / Cold Spots aufgedeckt werden, bevor diese zu Produktionsausfällen führen. Es können somit zeitlich früher im Prozess Maßnahmen zur Produktions- und Qualitätssicherung ergriffen werden. Kontrollen an schwierig herstellbaren Artikeln können genutzt werden, um Formen, Kühlbohrungen und Taktzeiten zu optimieren.

Mit jeder Messaufgabe sind dabei spezifische Schwierigkeiten verbunden. Reflexionen, hohe Prozessgeschwindigkeiten und sich während des Prozesses ändernde Oberflächeneigenschaften sorgen für anspruchsvolle Messaufgaben und Auswertelgorithmen.