

Online-Überwachung des Spritzgießens mit einem Radarsensor

C. Sklarczyk, Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)
Saarbrücken;

A. Surkov, Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, jetzt IZFP;

M. Knoblauch-Xander, Fraunhofer Institut Chemische Technologie (ICT), Pfinztal

1. Einleitung

Zunehmend wird beim Spritzgießen von Kunststoffformteilen die Gasinjektions- und Wasserinjektionstechnik (GIT, WIT) eingesetzt /Eyerer, 2003/. Diese erlaubt die Herstellung thermoplastischer Formteilen mit funktionalen Hohlräumen. Vorteile dieser Techniken sind u.a.: Einsparung von Material, Bewahrung der Form und kurze Zykluszeiten. Die Prozessüberwachung erfolgt bislang hauptsächlich indirekt mittels Temperatur oder Druck. Daher besteht ein zunehmender Bedarf an einer *direkten online-Überwachung im industriellen Umfeld*.

2. Experimentelle Untersuchungen mit Mikrowellen

Eine Möglichkeit der direkteren online in-Process-Überwachung besteht im Einsatz von Mikrowellenverfahren. Die physikalische Grundlage besteht darin, dass in die Kavität eingestrahlte Mikrowellen an Grenzflächen, darunter die Gasblase, reflektiert oder gestreut werden. Beim Vorbeilaufen der Schmelze und der Blase an der Position eines Mikrowellensensors bzw. seiner Antenne werden die vom Sensor ausgesandten Mikrowellen dementsprechend reflektiert und gestreut und damit das empfangene Signal bzgl. seines Betrag und seiner Phase verändert. Diese Technik wurde bereits seit Mitte der 90er Jahre am IKP, Universität Stuttgart, erprobt /Diener, 1996, 1995/, wobei amplitudenempfindliche Sensoren eingesetzt wurden. Das Fraunhofer-IZFP, Saarbrücken, hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-ICT, Pfinztal, und dem Fraunhofer-IAF, Freiburg, diese Technik auf Sensoren erweitert, die neben der Amplitude auch die Phase erfassen /Sklarczyk, 2004/, wodurch der aus dem Prozessraum stammende Informationsgehalt erhöht wird.

2.1 Radarsensor

Der eingesetzte Mikrowellensensor basiert auf einem frequenzmodulierten 94 GHz-Dauerstrich-Radarmodul (**f**requency **m**odulated **c**ontinuous **w**aves, FMCW), das auch in einer 77 GHz-Variante existiert (W-Band). Die Mikrowellen im Millimeterwellenbereich werden von einem spannungsgesteuerten Oszillator (**v**oltage **c**ontrolled **o**scillator, VCO) erzeugt, dessen Frequenz über eine Bandbreite von bis zu ca. 5 GHz gewobbelt werden kann. Das Herzstück des Sensors ist ein auf der GaAs-Technologie basierender hochintegrierter Chip (MMIC, **m**onolithic **m**icrowave **i**ntegrated **c**ircuit) mit einer Größe von ca. $3 \times 2 \text{ mm}^2$, der alle benötigten Hochfrequenzbauelemente enthält und vom Fraunhofer-IAF entwickelt wurde /Tessmann, 2002/. Der Chip ist in ein Metallgehäuse eingelötet, das neben dem Anschluss für einen Rechteck-Wellenleiter zur Ausbreitung der Mikrowellen die niederfrequenten Anschlüsse für die Spannungsversorgung, die Modulationsspannung und das Ausgangssignal enthält (Bild 1). Die emittierte Leistung liegt im Bereich weniger mW, so dass das Prüfobjekt nur in vernachlässigbarem Maße

erwärmt wird, d.h. die Messung erfolgt zerstörungsfrei. Das sinusförmige Sensor-Ausgangssignal (Zwischenfrequenzsignal, ZF) ist das Mischprodukt aus dem Oszillatorsignal und dem am Prüfobjekt gestreuten Empfangssignal und besitzt eine Frequenz von normalerweise wenigen kHz. Es kann daher mit herkömmlicher Niederfrequenzelektronik digitalisiert und weiterverarbeitet werden.

Der Sensor arbeitet im monostatischen Modus, d.h. mit nur einer Antenne für Senden und Empfangen. Die Mikrowellen werden mit einem rechteckigen oder runden Hohlwellenleiter in die Kavität eingeleitet, wobei ein für Mikrowellen durchlässiges Fenster das Eindringen der Schmelze in den Hohlleiter verhindert (Bild 2). Die Reichweite der Mikrowellen in der Kavität hängt von der Geometrie des Fensters und der Schwächung in der Kavität ab.

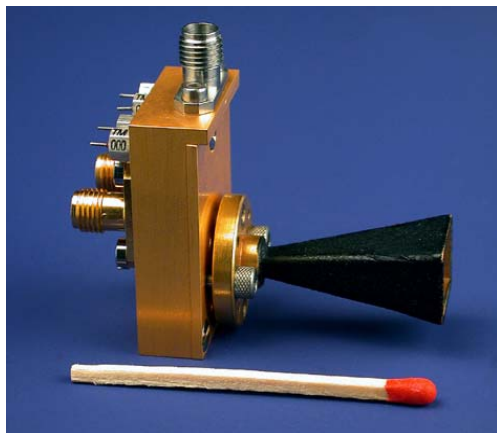


Bild 1: 94 GHz-FMCW-Radarmodul (Foto: IAF)

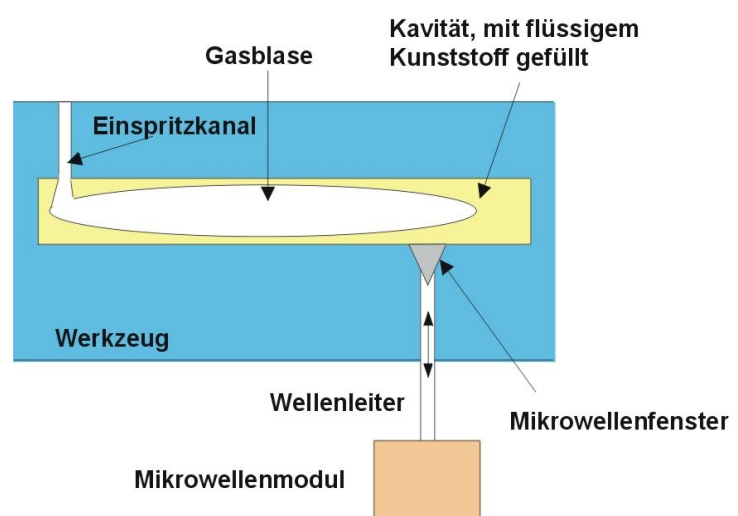


Bild 2: Schema der Messanordnung

2.2 Experimentelle Untersuchungen beim Spritzgießen

Experimentelle Untersuchungen an einer Spritzgießmaschine mit Gasinjektion im ICT haben gezeigt, dass sich das ZF-Signal abrupt verändert, wenn sowohl die Schmelzefront als auch die Gasblase die Position des Sensors passieren. Dies konnte auch dadurch verifiziert werden, dass synchron zur Aufzeichnung des Mikrowellensignals ein Videofilm der Prozesse mit einer Bildrate von 40 Hz aufgenommen wurde. Dazu wurde eine Seite des stählernen Werkzeugs durch ein optisch transparentes Fenster ersetzt. Die Abmessungen der Kavität betragen $200 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$.

Die Signaländerung fällt für die Passage der Gasblase an der Position des Mikrowellenfensters geringer aus als für die Passage der Schmelze (Bild 3 und 4). In jedem Falle wurde aber eine Signaländerung gefunden. Ihre Höhe kann jedoch gering sein, wenn nur eine einige Messgröße, z.B. die Amplitude, betrachtet wird. Daher ist es günstig, wenn das ZF-Signal nicht nur hinsichtlich seiner Amplitude sondern auch hinsichtlich seiner Phase und möglichst seiner Frequenz ausgewertet wird. Die Momentanfrequenz des ZF-Signals ergibt sich dadurch, dass die Signalphase mittels eines Polynoms approximiert und zeitlich abgeleitet wird. Der Koeffizient bei dem linearen Polynom-Glied entspricht im Wesentlichen der Stei-

gung der Phasenkurve und damit der Momentanfrequenz. Durch die Kombination mehrerer Messgrößen wird die Sicherheit der Detektion der Gasblase erheblich verbessert.

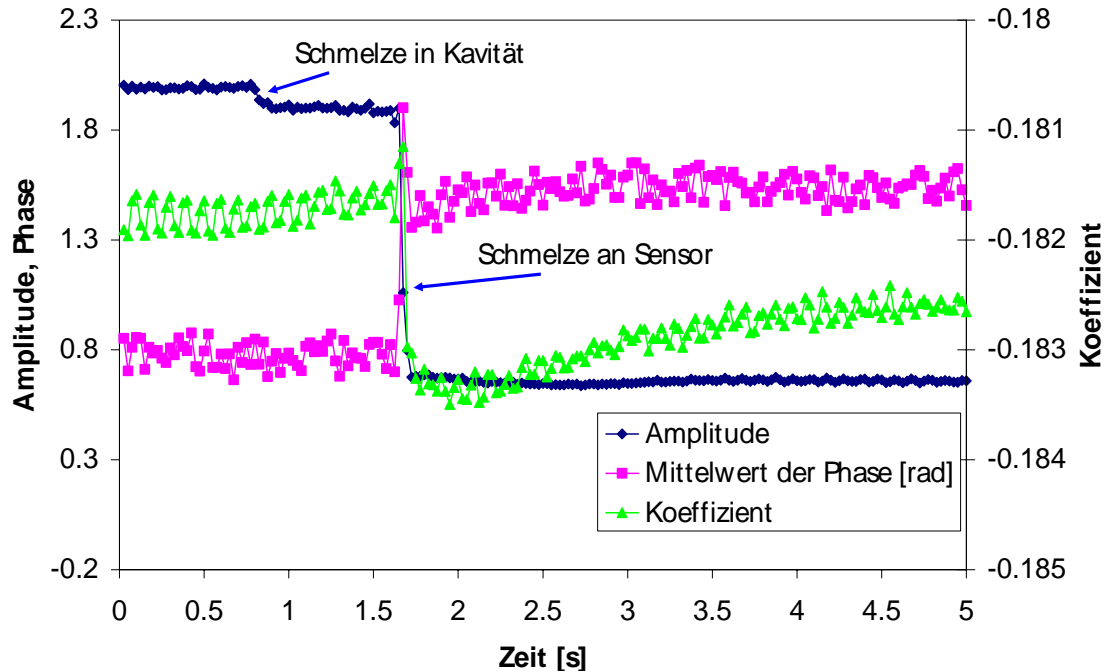


Bild 3: Signalverläufe von ZF-Amplitude, Phase und Frequenz (Koeffizient) beim Spritzgießen ohne Gasinjektion

3. Simulationsberechnungen

Die Größe des experimentell gefundenen Signalsprungs und seine Polarität (Sprung rauf oder runter) kann in Abhängigkeit von den experimentellen Bedingungen stark variieren. Um diese Vorgänge besser zu verstehen, wurden in Kooperation mit der Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, (Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, Prof. Langenberg) umfangreiche Finite-Element-Simulationsberechnungen mit dem Software-Paket ANSYS durchgeführt. Dazu wurde ein dreidimensionales Gitternetz erstellt, das die Kavität und den rechteckigen oder runden Hohlwellenleiter umfasst. Die elektromagnetische Wellenausbreitung wurde für verschiedene Mikrowellenfrequenzen und Blasengeometrien (Querschnittsfläche) modelliert und daraus der komplexe Reflexionskoeffizient im Wellenleiter für alle drei elektrischen und magnetischen Wellenkomponenten ermittelt. Der Gitterpunktabstand betrug höchstens 1/10 der Wellenlänge in der Kavität.

Das Voranschreiten der Gasblase durch die Kavität wurde über unterschiedlich lange Blasen modelliert. Bild 5 zeigt die Wellenverteilung für eine Kavität, die mit der Schmelze gefüllt ist und in der sich die Gasblase noch ca. 5 mm links von der Wellenleiteröffnung befindet, d.h. die Blase hat die Wellenleiteröffnung noch nicht erreicht. In Bild 6 dagegen befindet sich die Gasblase ca. 5 mm rechts von der Wellenleiteröffnung, d.h. die Blase hat die Öffnung knapp überschritten. Man erkennt, dass sich das dreidimensionale Wellenmuster, das symmetrisch um die Wellenleiteröffnung herum angeordnet ist, deutlich verändert hat. Um eine zu große Zahl von Gitterpunkten zu vermeiden und um die benötigte Rechenzeit in

Grenzen zu halten, wurde die Gasblase rechteckig modelliert und die Kavitätslänge kleiner als im Experiment gehalten.

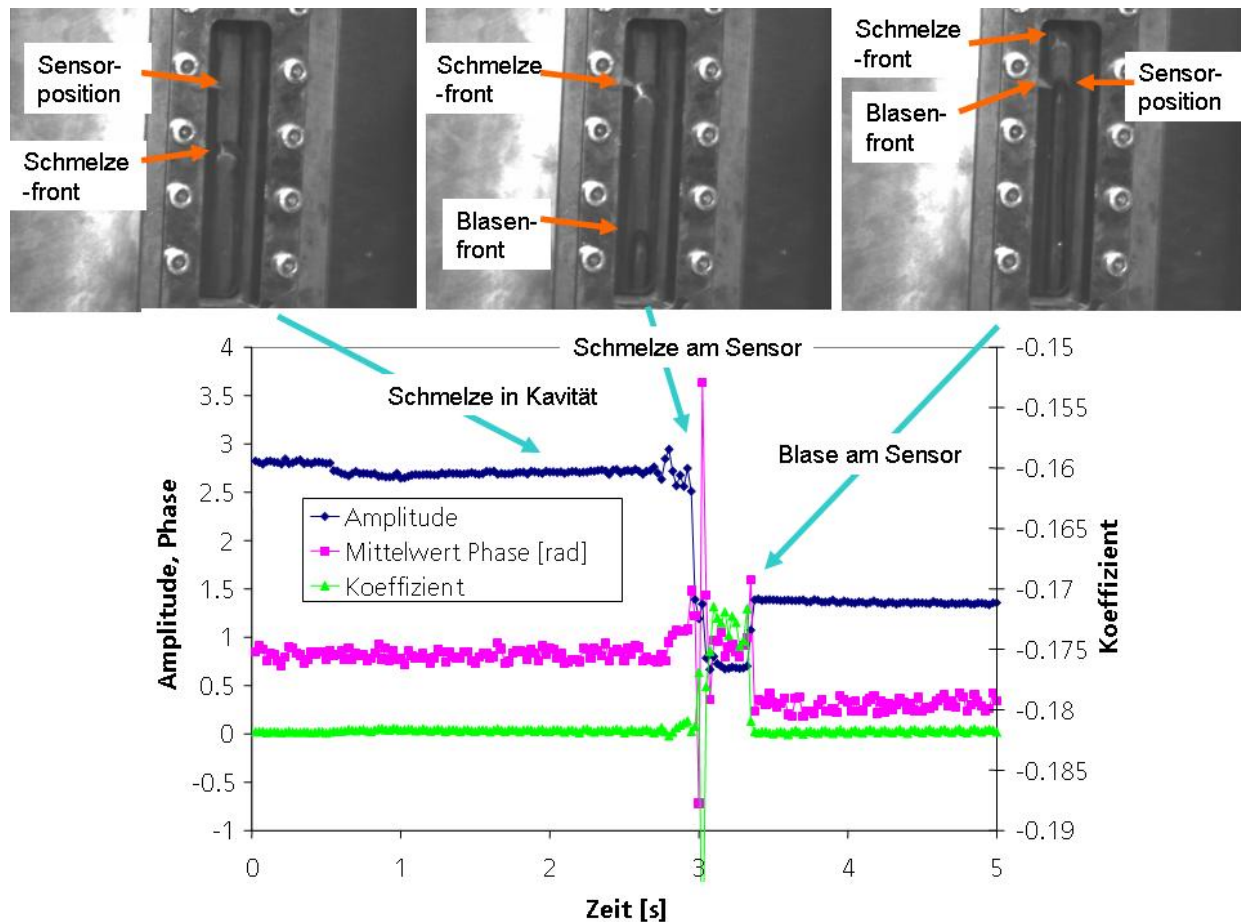


Bild 4: Phasen des Voranschreitens von Schmelze und Gasblase (aus dem Videofilm, oben) sowie Signalverläufe von ZF-Amplitude, -Phase und -Frequenz (Koeffizient) beim Spritzgießen mit Gasinjektion

Lässt man bei den Simulationsrechnungen die Gasblase allmählich die Kavität durchwandern und bestimmt Betrag und Phase des komplexen Reflexionskoeffizienten an einer Position in der Mitte des Wellenleiters, so erhält man für verschiedene Blasenquerschnitte die in Bild 7 und 8 gezeigten Kurven. Hierbei wurden zuerst die Raumtemperaturwerte der komplexen Dielektrizitätskonstante für Plexiglas ($\epsilon = 2,592 + 0,01887i$) im W-Band zugrunde gelegt, da keine Werte für die Schmelzetemperatur zur Verfügung standen /Friedsam et al., 1997/.

Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen (Bild 3 und 4) weisen die Kurven in Bild 7 und 8 komplexe Verläufe mit vielen Minima und Maxima auf, so dass die Passage der Blase an der Wellenleiterposition in einigen Fällen nicht klar erkannt werden kann und insgesamt keine befriedigende Übereinstimmung mit dem Experiment besteht. Erhöht man jedoch den Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante um den Faktor 16, d.h. vergrößert man die Mikrowellenabsorption, so werden die Kurven glatter und man erhält klare Änderungen nur noch im Bereich der Position des Wellenleiters (Bild 9 und 10). Diese Kurven ähneln qualitativ den experimentell gewonnenen (Bild 3 und 4).

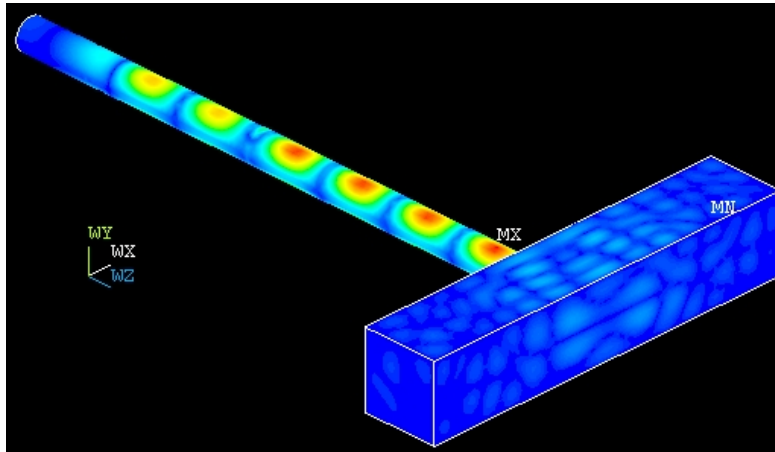


Bild 5: Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Kavität und mit einem runden Wellenleiter (Kavitätslänge 3 cm, Querschnittsfläche $6 \times 6 \text{ mm}^2$, Position der Wellenleiteröffnung bei 15 mm); die Gasblasenfront hat die Position des Wellenleiter noch nicht passiert (Blasenfront bei 10 mm).

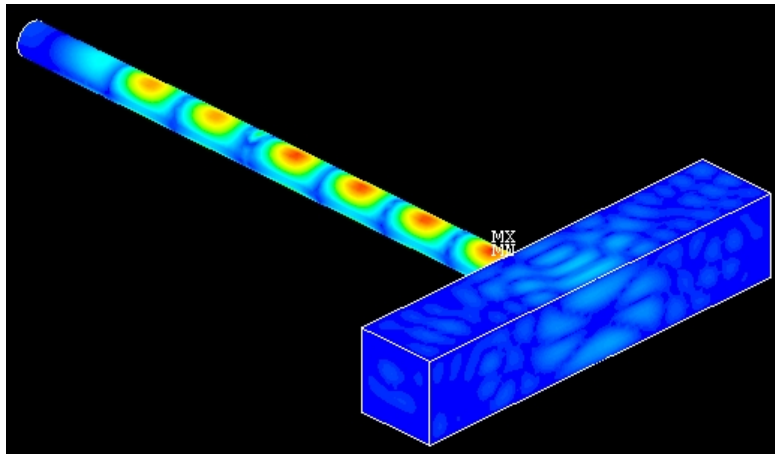


Bild 6: Die Gasblase hat die Position der Wellenleiteröffnung passiert; Blasenfront bei 20 mm.

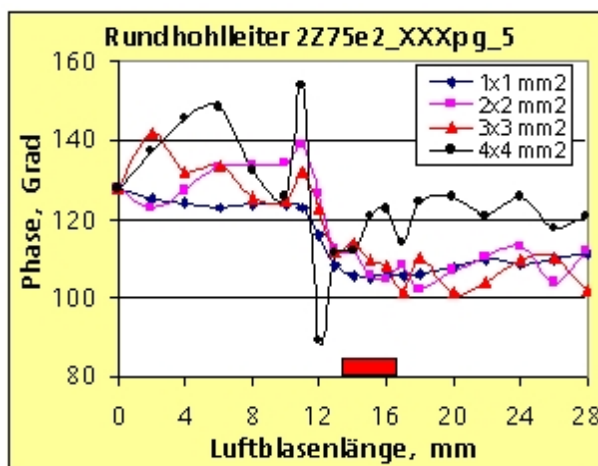


Bild 7: Simulationsrechnungen für die Phase des Reflexionsfaktors bei 75 GHz für verschiedene Querschnitte der Gasblase (Kunststoff: Plexiglas bei Raumtemperatur), rot: Apertur des Wellenleiters

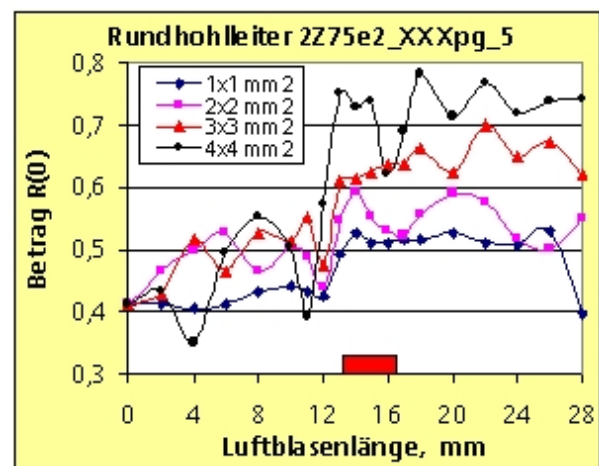


Bild 8: Simulationsrechnungen für den Betrag des Reflexionsfaktors bei 75 GHz für verschiedene Querschnitte der Gasblase

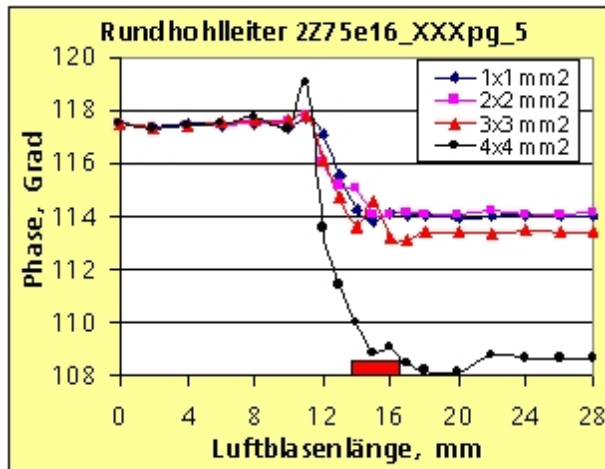


Bild 9: Simulationsrechnungen für die Phase des Reflexionsfaktors bei 75 GHz für verschiedene Querschnitte der Gasblase (Kunststoff: Plexiglas mit um den Faktor 16 gegenüber Raumtemperatur erhöhtem Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante)

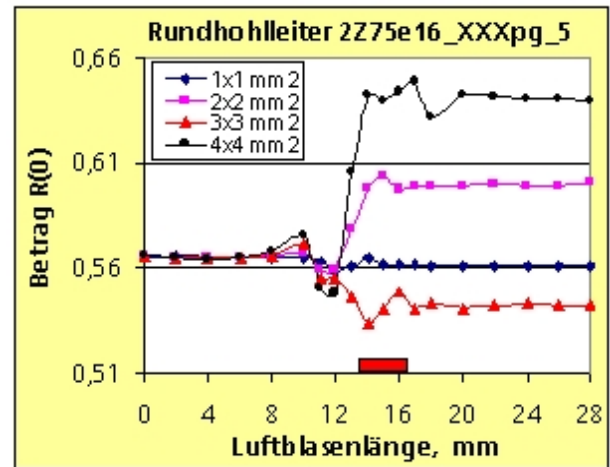


Bild 10: Simulationsrechnungen für den Betrag des Reflexionsfaktors bei 75 GHz für verschiedene Querschnitte der Gasblase

Hierbei ändert sich die Größe des Sprunges in nichtlinearer Weise als Funktion des Querschnittes. Auch die Polarität des Sprunges kann sich für verschiedene Querschnitte verändert (Bild 10). Experimentelle Untersuchungen an aufgeschmolzenen Kunststoffen im IZFP haben im Vergleich zur Raumtemperatur in der Tat eine erhöhte Mikrowellenabsorption gezeigt, während der Realteil der Dielektrizitätskonstanten im Rahmen der Messgenauigkeit unverändert blieb. Die Annahme eines deutlich erhöhten Imaginärteils bei höheren Temperaturen ist damit gerechtfertigt.

Variiert man die Mikrowellenfrequenz, so ergeben sich in einigen Fällen einfache, eindeutige und nahezu lineare Kurvenverläufe, die es gestatten, den Blasenquerschnitt aus einer Mikrowellenmessgröße eindeutig zu bestimmen. Dies ist beispielsweise in Bild 11 für die Frequenz 77 GHz möglich.

Weitere Simulationsrechnungen demonstrieren darüber hinaus, dass es möglich ist, auch kleinere Mikrowellenfrequenzen einzusetzen, vorausgesetzt die Mikrowellen sind in der Kavität noch ausbreitungsfähig. Dann ist es möglich, kommerzielle Mikrowellensensoren einzusetzen, deren Frequenz geringer als die des oben beschriebenen Sensors ist (ca. 9 – 35 GHz) und die deutlich preisgünstiger sind. In diesem Fall wird es möglich sein, durch Einsatz mehrerer Sensoren verschiedene Stellen in der Kavität gleichzeitig zu überwachen.

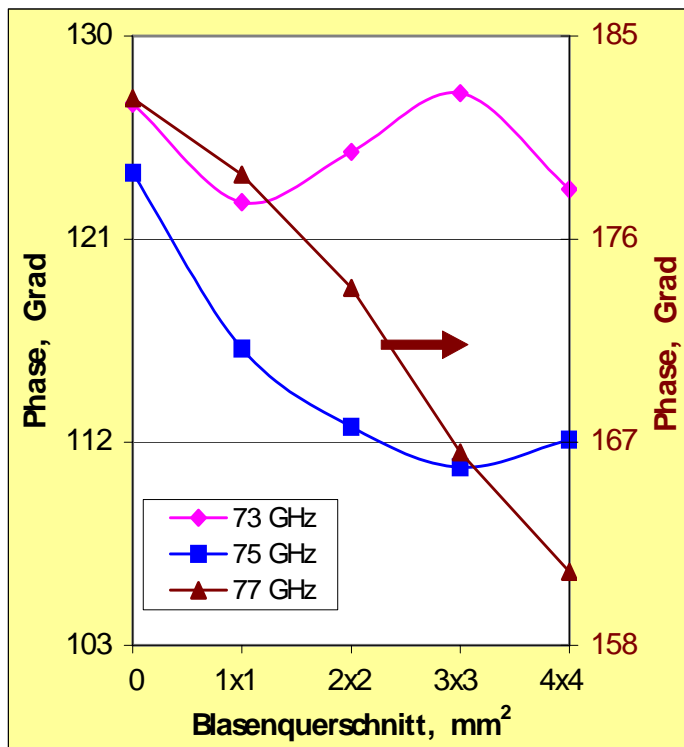


Bild 11: Phase des Reflexionsfaktors gegen den Luftblasenquerschnitt bei den Frequenzen 73, 75 und 77 GHz für Plexiglas (hohe Absorption)

Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass auch wassergefüllte Blasen ähnliche Signaländerungen wie gasgefüllte Blasen hervorrufen, so dass die Mikrowellenmethoden auch für die Überwachung der Wasserinjektionstechnik eingesetzt werden kann. Bei dieser relativ neuen Technik ist aufgrund kritischer Eigenschaften des Prozessmediums Wasser die Prozessüberwachung noch wichtiger als bei der GIT.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen sowie mit Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, die Position einer Gasblase beim Spritzgießen von Kunststoffformteilen mit der Gas- und Wasserinjektionstechnik (GIT, WIT) mit Hilfe von Mikrowellen im Millimeterwellenbereich zerstörungsfrei und online zu ermitteln. Die Methode eignet sich somit zur Prozessüberwachung. Aus dem Vergleich von Simulation und Experiment lassen sich im Einzelnen folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Es gibt einige günstige Bedingungen mit einfachen, eindeutigen Kurvenverläufen. Dies bietet die Möglichkeit der Bestimmung des Blasendurchmessers aus dem Mikrowellensignal.
- Die Signalauswertung sollte zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten sowohl die Phase als auch den Betrag beinhalten.
- Die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Blase kann bei ca. ± 1 mm liegen, hängt aber von der Art der Antenne bzw. des Mikrowellenfensters ab.

- Die Mikrowellenschwächung ist bei hoher Temperatur (Schmelztemperatur) deutlich größer als bei Raumtemperatur.
- Experiment und Simulation stimmen qualitativ überein.

5. Literatur

Diener, L., Maertins, R., „Mikrowellentechnik für Gasinnendruck“, Kunststoffe, Vol. 85, 1995, 616 - 618

Diener, L., Busse G., „Nondestructive quality and process control in injection moulding polymer manufacture with microwaves“, Materials Science Forum Vols. 210-213, 1996, 665-670

Eyerer, P., Elsner, P., Knoblauch-Xander, M., von Riewel, A., Gasinjektionstechnik, Hanser-Verlag 2003

Friedsam, G.L., Biebl, E.M.: „Precision free-space measurement of complex permittivity of polymers in the W-band“, 1997 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, New York, NY, USA, Vol. 3, 1997, 1351 - 1354

Sklarczyk, C., „Surveillance of gas assisted injection moulding process by means of microwaves“, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Emerging Technologies in Non Destructive Testing, 26 – 28 May 2003, Thessaloniki, Greece, Van Hemelrijck, Anastasopoulos & Melanitis (eds), Balkema Publishers 2004, 333 - 336

Tessmann, A., Kudszus, S., Feltgen, T., Riessle, M., Sklarczyk, C., Haydl, W.H., „Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial high-resolution sensor applications“, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, Vol. 50, No. 12, 2995 – 3001

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Vorhabens.